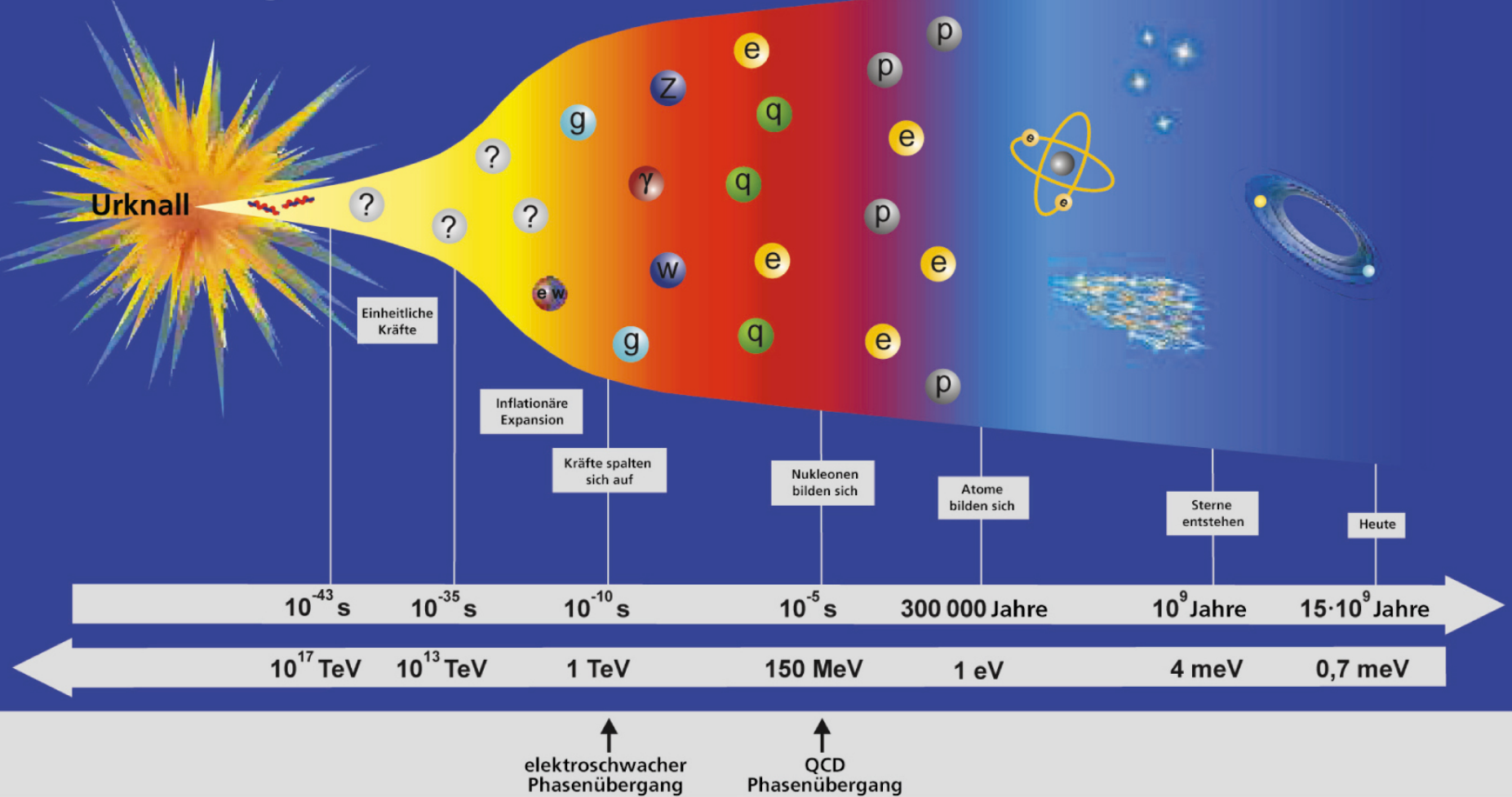


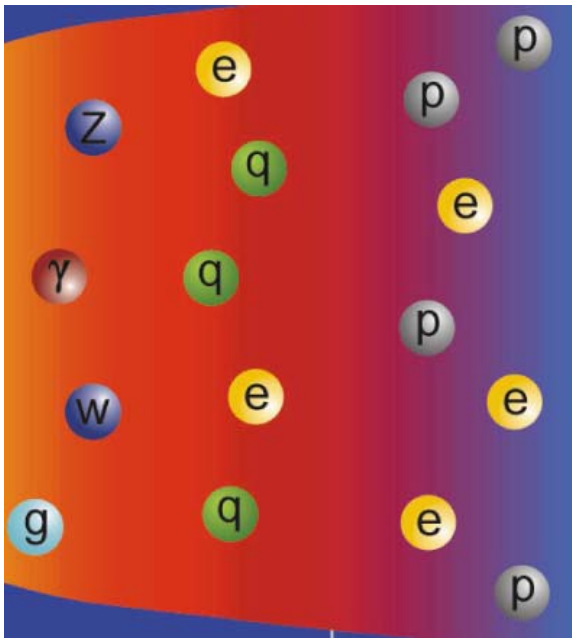
Entwicklungsphasen des frühen Universums

Entwicklung des Universums



Expansion, Abkühlung, Entkopplung

$$t \sim R^2 \sim \frac{1}{T^2} \sim \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$



$$\Gamma < H$$

thermisches Gleichgewicht
durch Reaktionen:

$$\Gamma = n \langle \sigma v \rangle$$

Phasen der kosmologischen Entwicklung

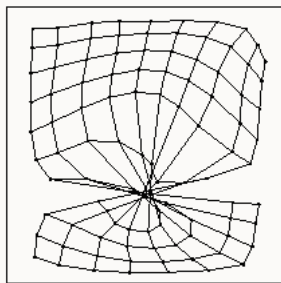
t [s]	E [GeV]	T [K]	R [m]	
10^{-44}	10^{19}	10^{32}	10^{-5}	Planckzeit, $\lambda_{Compton} \approx r_S$
10^{-36}	10^{15}	10^{28}	10^{-2}	$E \approx M_X$, GUT-Symmetrie-Brechung, Baryogenese
10^{-10}	10^2	10^{15}	10^{12}	$E \approx M_W$, $SU(2)_L \times U(1)$ -Symmetrie-Brechung
10^{-6}	10^0	10^{13}	10^{14}	Quark-Confinement, $p\bar{p}$ -Annihilation
10^0	10^{-3}	10^{10}	10^{17}	Neutrinos entkoppeln, e^+e^- -Annihilation
10^2	10^{-4}	10^9	10^{18}	Bildung leichter Kerne (Nukleosynthese)
10^{12}	10^{-9}	10^4	10^{23}	Photonen entkoppeln, Übergang von Strahlungs- zu Materie-Dominanz, Bildung von Atomen, Sternen, Galaxien
10^{17}	10^{-13}	10^0	10^{26}	Bildung des Sonnensystems und von organischem Leben, heute ($t_0 \approx 2 \cdot 10^{10}$ Jahre)

Probleme des Urknallmodells (I)

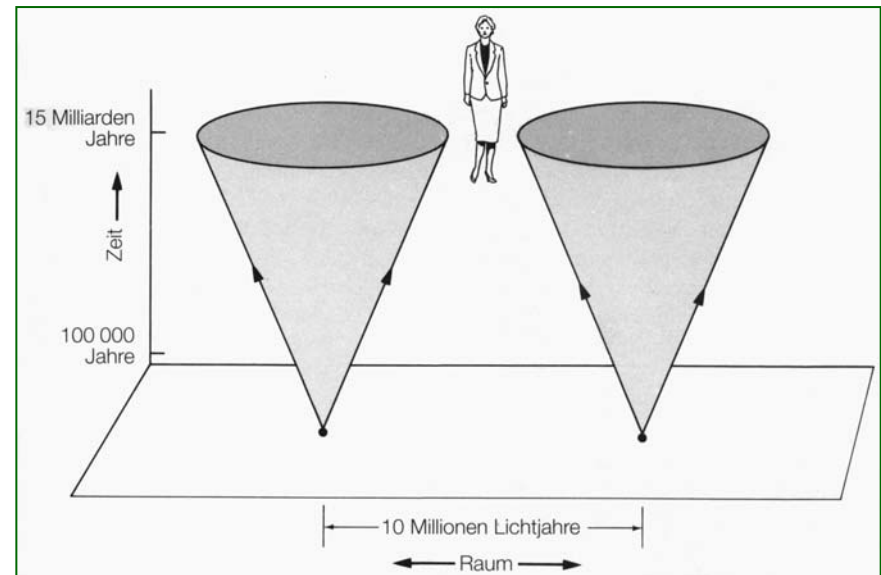
Flachheitsproblem:

$$\Omega - 1 \sim \frac{1}{R^2} \sim t^{2/3} \dots t$$

Monopolproblem:



Horizontproblem:

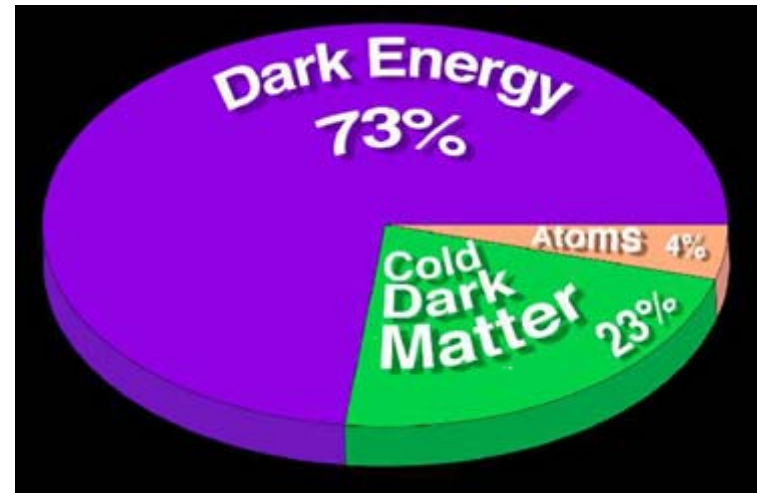


Probleme des Urknallmodells (II)

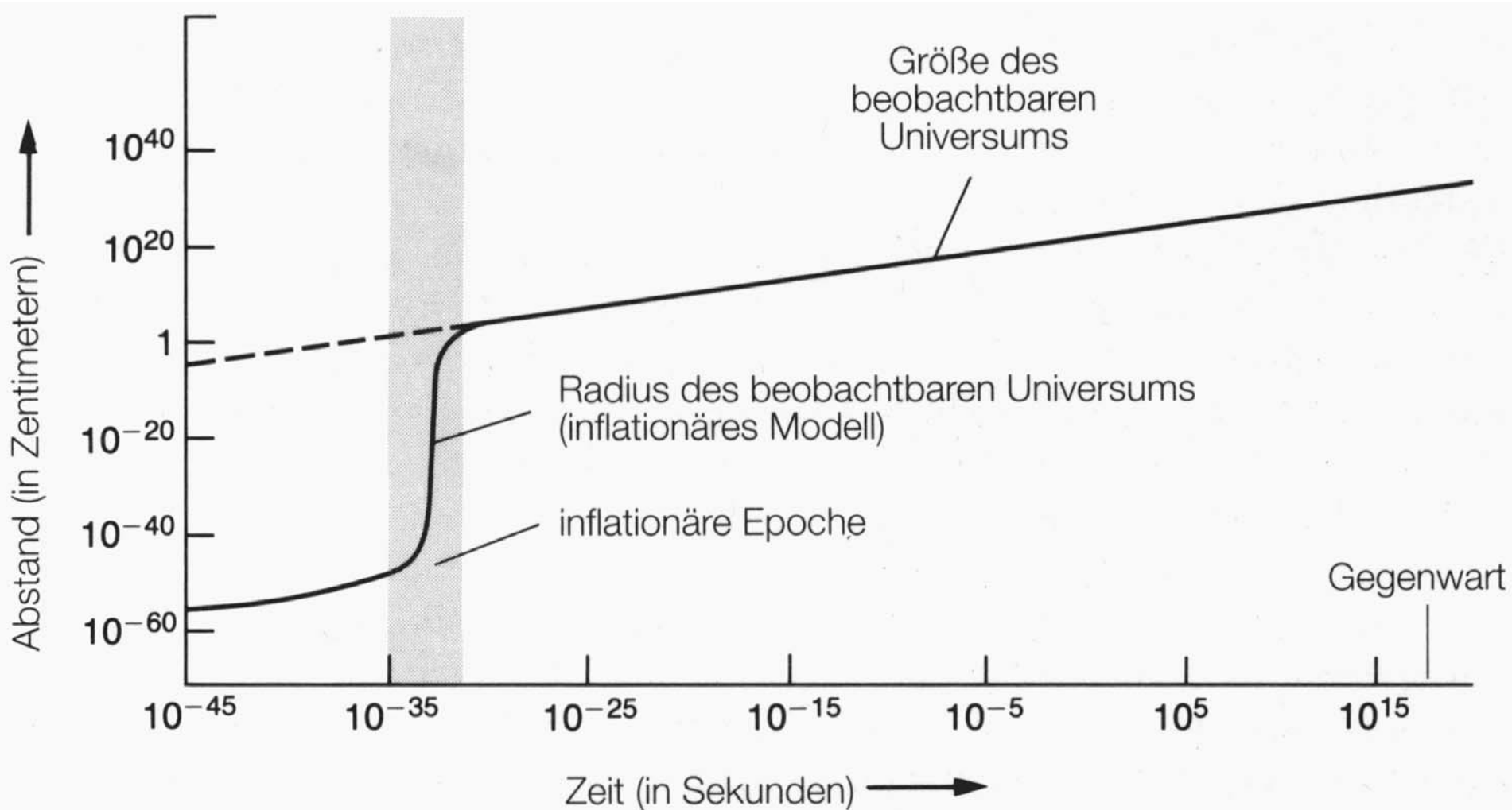
Baryonasymmetrie:

Dunkle Materie:

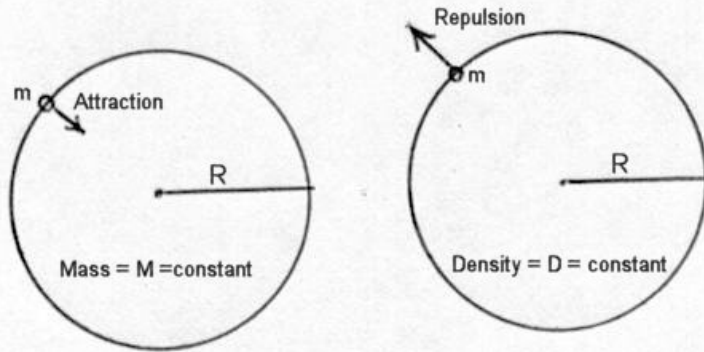
Kosmologische Konstante:



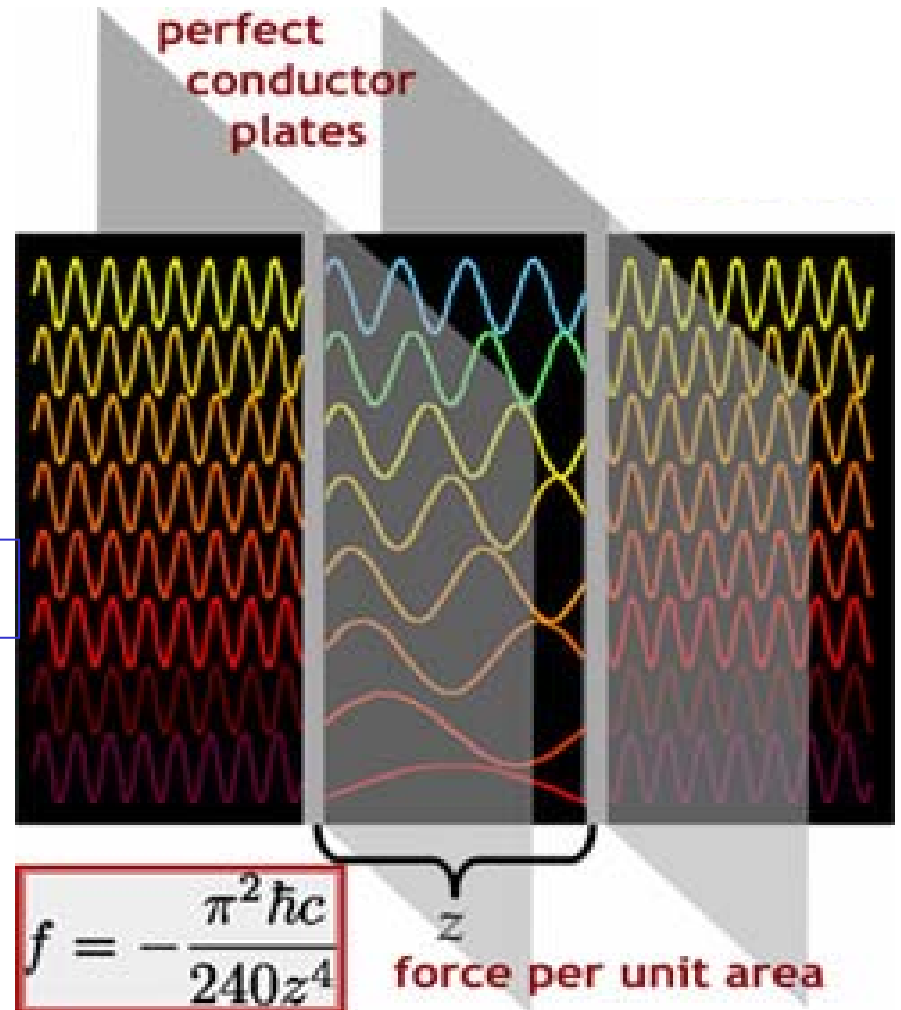
Problemlösung: Inflation



Vakuumenergie



Casimir-Effekt:



Inflation: exponentielle Expansion

$$H(t)^2 = \left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} - k \frac{c^2}{R^2} + \frac{\Lambda}{3} \rightarrow \frac{\Lambda}{3} = \frac{8\pi G \rho_v}{3} = \textit{konst} \quad (2.55)$$

Die Lösung von

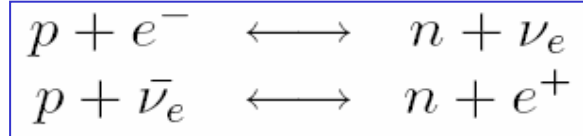
$$\left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = H^2 \quad (2.56)$$

ist ein exponentielles Anwachsen der Expansion (für $H > 0$):

$$R(t) = R_i \cdot e^{Ht} \quad (2.57)$$

.. bis zur Entkopplung der Neutrinos

- **0.02 s 10 MeV:** Nukleonen haben sich gebildet, p, n im **Gleichgewicht:**



- **1 s 1 MeV:** **Neutrinos** beginnen zu **entkoppeln**

$$\begin{array}{l} \Gamma \sim G_F^2 T^5 \\ H \sim \frac{1}{t} \sim T^2 \end{array}$$

$$\frac{\Gamma}{H} \approx \left(\frac{kT}{0.8 \text{ MeV}} \right)^3$$

- **0.8 MeV, 10¹⁰ K:** Ausfrieretemperatur T_f, Boltzmann-Vert. n/p

$$\frac{n_n}{n_p} = \exp \left(-\frac{\Delta mc^2}{k T_f} \right) \approx 0.20$$

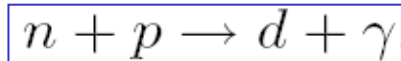
$$\Delta m = 1.293 \text{ MeV}$$

- **< 10¹⁰ K** Neutronen zerfallen (τ=886 s)
oder werden in Kerne eingebaut

... .. nach Ausfrieren der Nukleonen

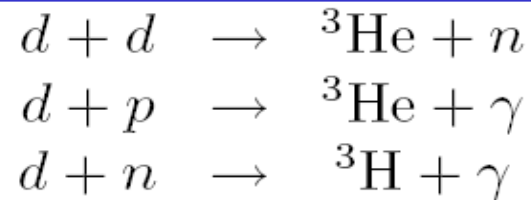
- **> 10⁹ K**

Produktion ↔ Dissoziation von D (hohe Photondichte!)



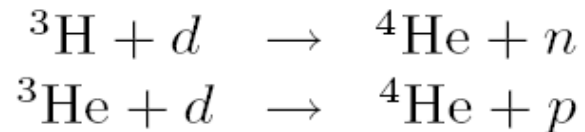
- **< 0.1 MeV, < 10⁹ K**

Produktion von ³He, ³H



- **225 s, < 10⁹ K, n/p=0.14**

Produktion von ⁴He beginnt

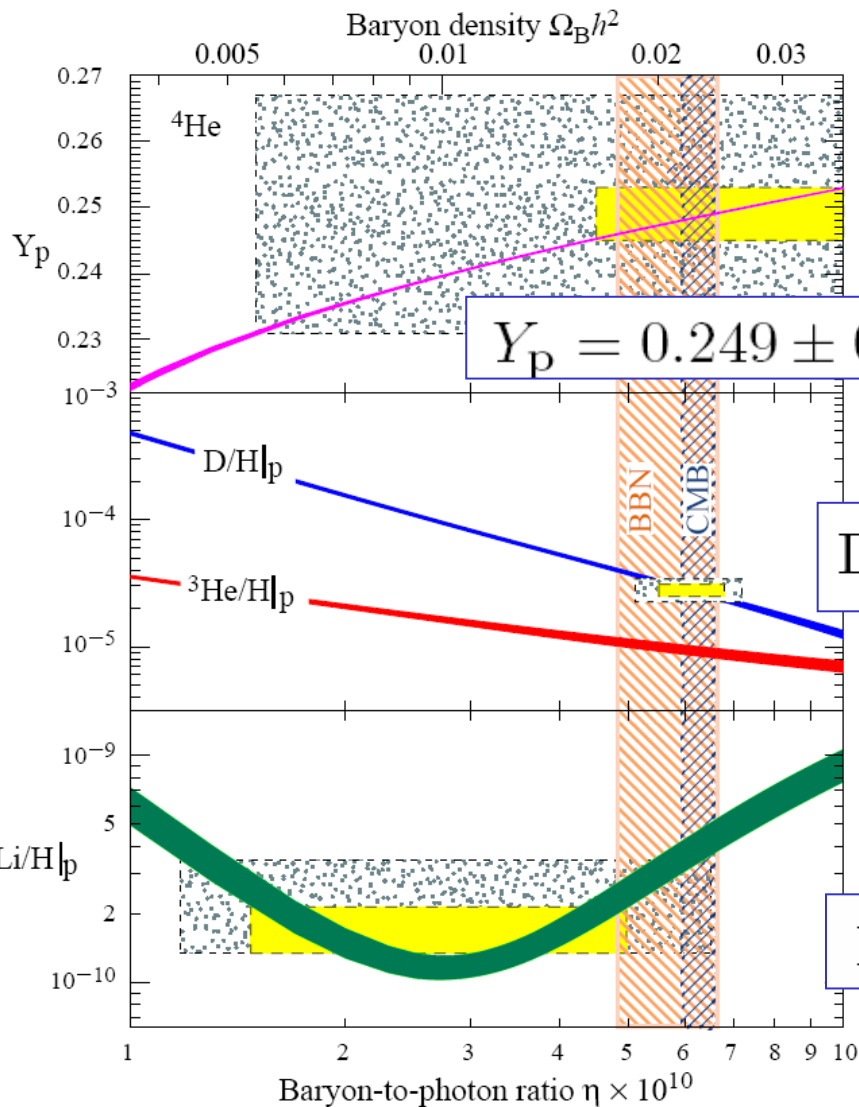


$$n_{\text{He}} = n_n/2 \Rightarrow \frac{n_{\text{He}}}{n_{\text{H}}} = \frac{0.14}{2(1 - 0.14)} = 0.082$$

- Schwere Elemente: nicht durch Anlagerung von n, p, weil keine stabile Kerne mit A=5 und 8



Nukleosynthese: Messungen - Theorie



Theorie sensitiv auf **alle WW**:

- Gravitation (H)
- schwach (n-Zerfall)
- elektro-magnetisch (γ 's)
- stark (Kerne)

Abhängigkeiten der Nukleosynthese

- das **Baryon/Photon-Verhältnis** bestimmt den Beginn der 4He -Synthese (weniger Photonen \Rightarrow mehr Helium);
- die **Lebensdauer des Neutrons** bestimmt
 - a) die Reduktion des n/p -Verhältnisses,
 - b) die Ausfrieretemperatur, (τ_n größer \Rightarrow Reaktionsrate geringer $\Rightarrow T_f$ höher \Rightarrow mehr Helium);
- die **Anzahl der leichten Neutrinos** bestimmt ebenfalls die Ausfrieretemperatur, wegen

$$H \sim \sqrt{g^*}$$
 (g^* =Anzahl der Arten relativistischer Teilchen)
- die **Baryonendichte** bestimmt alle Reaktionsgeschwindigkeiten.

