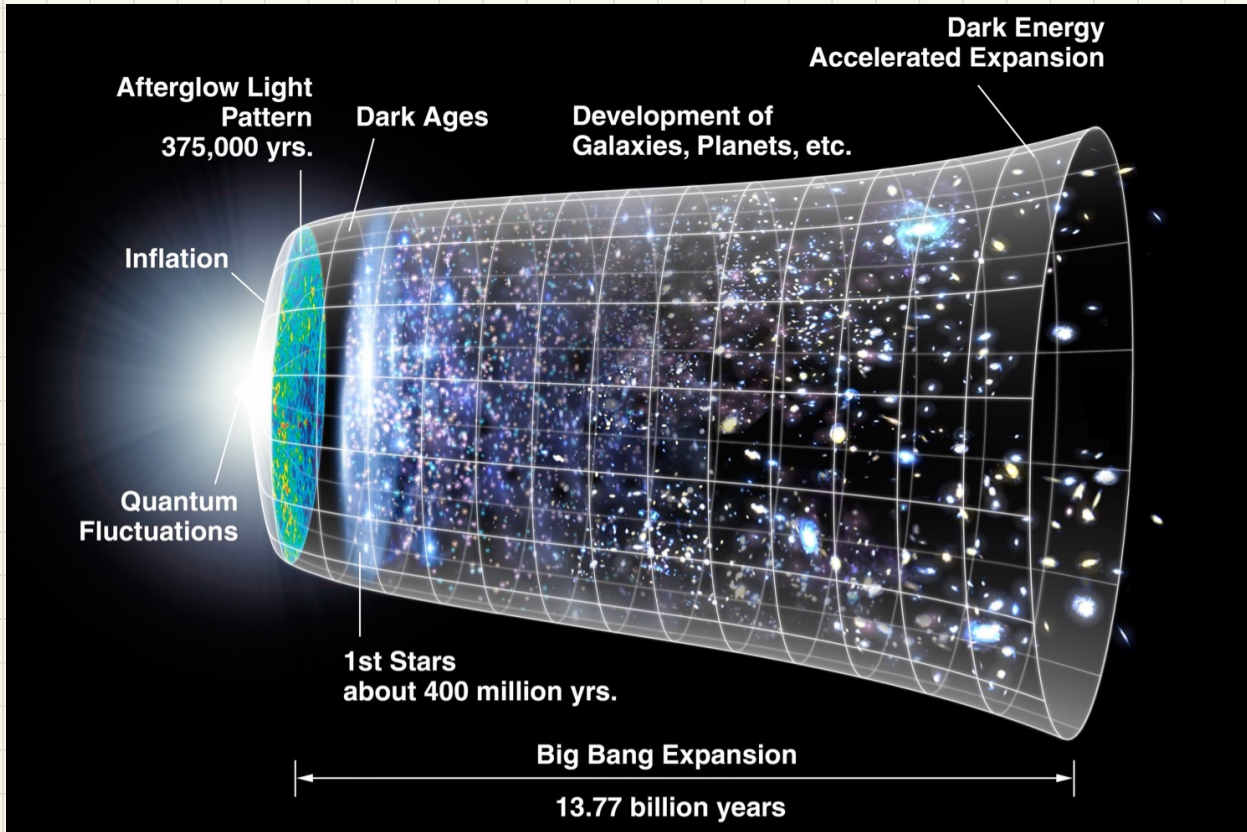
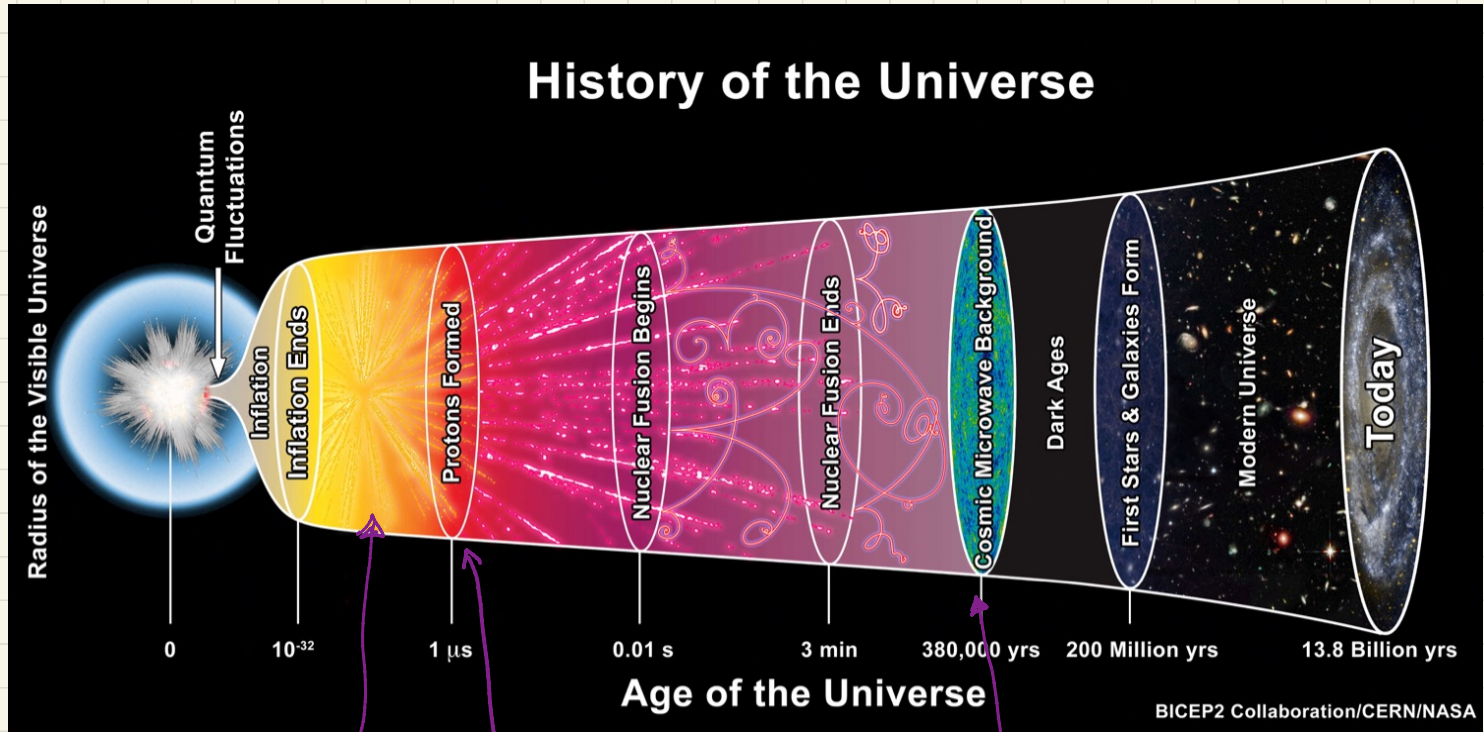



30. Kosmologisches Standardmodell



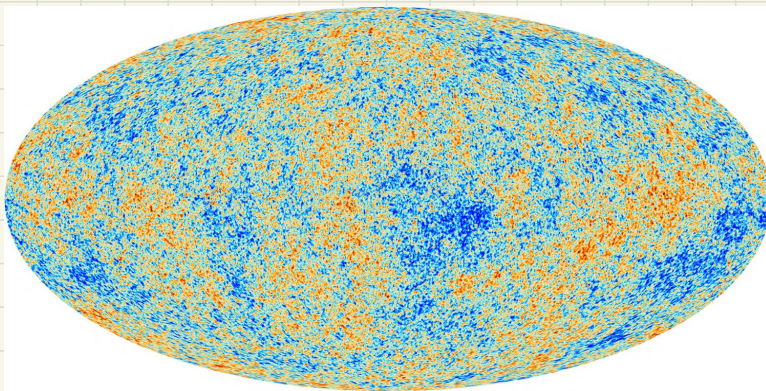
Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang , 20.7.2020



QCD-Phasenübergang

Quark-Gluon-Plasma

Atomkerne fangen Elektronen ein und neutralisieren,
Photonen entkoppeln von Materie



Planck-Satellit:
Bestimmung der Anisotropie der kosmischen
Mikrowellen-Hintergrundstrahlung

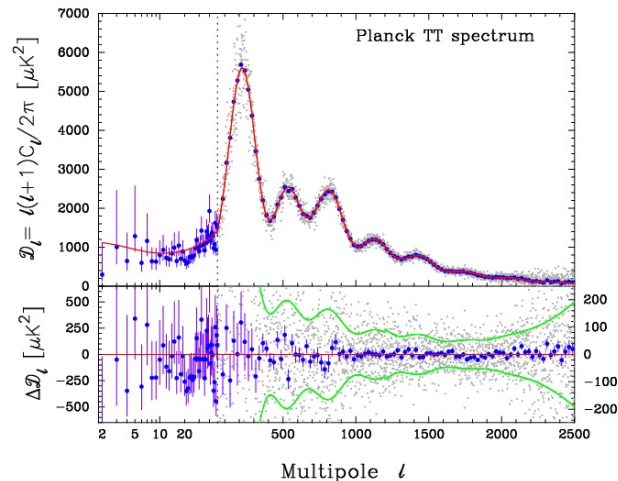
$$\frac{\Delta T}{T} \simeq 10^{-5}$$

⇒ Universum sehr homogen und isotrop!

Quelle: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Planck_offenbart_uns_ein_fast_perfektes_Universum, 21.7.2020

Multipol-Spektrum der Anisotropie
im Vergleich zum Λ CDM-Modell

Quelle: cds.cern.ch/record/1530686/plots,
21.7.2020



Temperaturverlauf: Universum ist von Schwarzkörperstrahlung erfüllt

$$\Rightarrow \sigma_{\text{str}} c^2 = \frac{\pi^2 k_B^4}{15 (\hbar c)^3} T^4 \stackrel{(28.22)}{=} \frac{3c^4}{8\pi G} \frac{K_S}{R^4} = \frac{\text{const.}}{R^4} \quad (30.1)$$

Stefan-Boltzmann-Konstante

$$\Rightarrow T(t) \sim \frac{1}{R(t)} \quad (30.2)$$

Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung (gemessen):

$$T_0 \equiv T(t_0) = (2.725 \pm 0.002) \text{K} \quad (30.3)$$

Entkopplung von Strahlung und Materie bei $T_e \simeq 3000 \text{K}$

$$\stackrel{(30.2)}{\Rightarrow} \frac{T_e}{T_0} \equiv \frac{T(t_e)}{T(t_0)} = \frac{R(t_0)}{R(t_e)} \equiv \frac{R_0}{R_e} \simeq 1.1 \cdot 10^3 \quad (30.4)$$

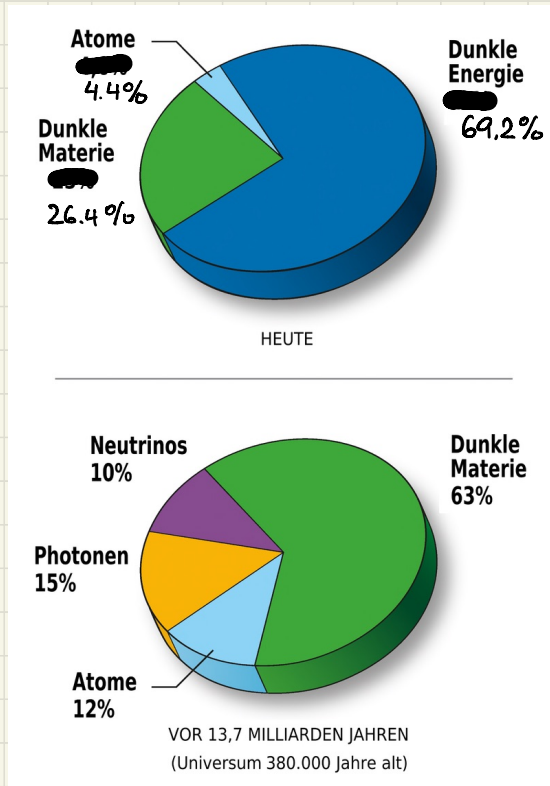
$\Rightarrow$ Zum Zeitpunkt t_e der Entkopplung war Universum ca. 1000 mal kleiner

Falls Entwicklung des Universums zwischen t_e und t_0 durch Materieanteil dominiert:

$$\stackrel{(28.27)}{\Rightarrow} R(t) \sim t^{2/3} \Rightarrow \frac{t_e}{t_0} = \left(\frac{R_e}{R_0} \right)^{3/2} \simeq 2.74 \cdot 10^{-5} \quad (30.5)$$

$$\stackrel{(29.20)}{\Rightarrow} t_e \simeq 13.811 \cdot 10^9 \cdot 2.74 \cdot 10^{-5} \text{a} = 3.78 \cdot 10^5 \text{a} \quad (30.6)$$

Energieanteile im Zeitverlauf:



$$\frac{\Omega_s}{x(t_e)^2} = \Omega_s \left(\frac{R_0}{R_e} \right)^2 \approx 10^6 \Omega_s \approx 10^2$$

$\approx 10^{-4}$

$$\frac{\Omega_m}{x(t_e)} = \Omega_m \frac{R_0}{R_e} \approx 10^3 \Omega_m \approx 0.308 \cdot 10^3$$

$$\Omega_\Lambda x(t_e)^2 = \Omega_\Lambda \left(\frac{R_e}{R_0} \right)^2 \approx 10^{-6} \Omega_\Lambda \approx 0.692 \cdot 10^{-6}$$

⇒ relative Anteile: Strahlung: 25%
Materie: 75%

Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Dunkle_Materie, 21.7.2020

Horizontproblem: Welthorizont zum Zeitpunkt t

$$\mathcal{D}(t) = \mathcal{D}_0 \frac{R(t)}{R_0} \stackrel{(29.22)}{=} R(t) \int_0^{t_0} \frac{c dt'}{R(t')} \quad (30.7)$$

kausal verknüpft Gebiet zum Zeitpunkt t

$\Leftrightarrow$ Entfernung, welche Licht von 0 bis t zurückgelegt hat

$$\Rightarrow \mathcal{D}_{\text{kaus}}(t) = R(t) \int_0^t \frac{c dt'}{R(t')} \quad (30.8)$$

$\Rightarrow$ für $t < t_0$: $\mathcal{D}_{\text{kaus}}(t) < \mathcal{D}(t)$

Abschätzung: $R(t) \sim t^{2/3} \Rightarrow \int \frac{dt'}{R(t')} \sim \int t'^{-2/3} dt' \sim t^{1/3}$

$$\Rightarrow \frac{\mathcal{D}_{\text{kaus}}(t)}{\mathcal{D}(t)} \simeq \left(\frac{t}{t_0}\right)^{1/3} \ll 1 \quad \text{für } t \ll t_0 \quad (30.9)$$

$$\text{bei } t = t_e: \frac{\mathcal{D}_{\text{kaus}}(t_e)}{\mathcal{D}(t_e)} \simeq \left(\frac{t_e}{t_0}\right)^{1/3} \stackrel{(30.5)}{=} \left(\frac{R_e}{R_0}\right)^{1/2} \simeq 3 \cdot 10^{-2} \quad (30.10)$$

$$\Rightarrow V_e \sim \mathcal{D}(t_e)^3 \simeq 3.7 \cdot 10^4 \mathcal{D}_{\text{kaus}}(t_e)^3 \sim 3.7 \cdot 10^4 V_{\text{kaus},e}$$

$\Rightarrow$ Universum bestand aus $3.7 \cdot 10^4$ kausal unabhängigen Volumina

$\Rightarrow$ warum dennoch so homogen und isotrop? $\Rightarrow$ Theorie des inflationären Universums