

Das frühe Universum

Expandierendes Universum

ca 10^{23} Galaxien ; zwischen 10^7 und 10^{12} Sonnenmassen / Galaxie

Doppler-Verschiebung ~~at~~ atomarer Spektrallinien (Richtung rot) :
alle Galaxien entfernen sich von der Milchstraße.
- in allen Richtungen
- je schneller, desto weiter entfernt.

$$v = H_0 \cdot d$$

Fluchtgeschwindigkeit Entfernung (aus Helligkeitsmessungen, jetzt Supernovae)

Hubble-Konstante $H_0 = 50 \dots 100 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$ ($1 \text{ Pc} = 3.3$
Lichtjahre)

→ isotrope Expansion des Universums (der Raum wird größer)

Kosmische Hintergrundstrahlung

Urknalltheorie: anfänglich heißes Plasma: extrem kurzwellige e.m. Strahlung $\Rightarrow$ Abkühlung durch Expansion $\Rightarrow$ langwelliger

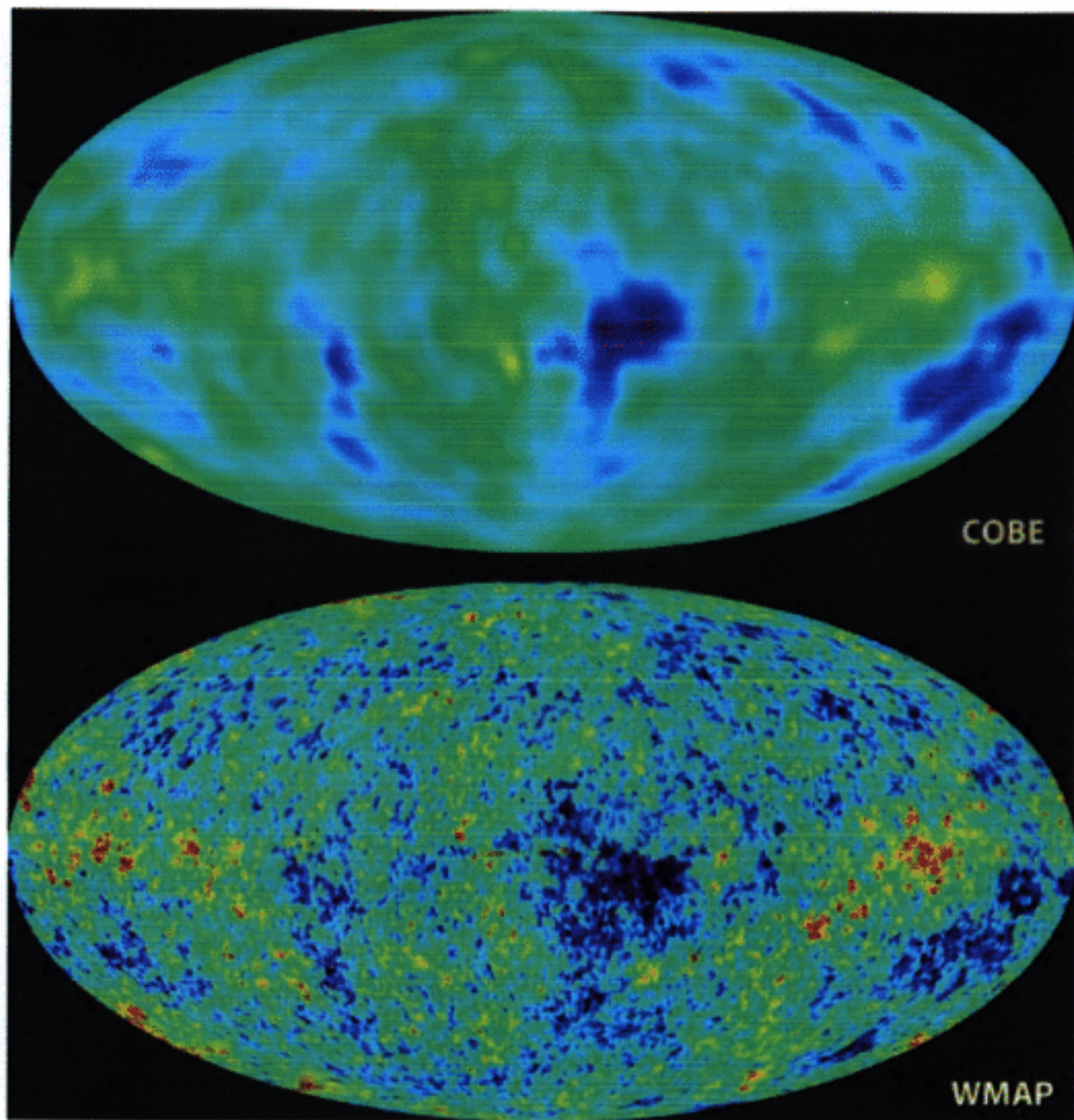
heute im Mikrowellenbereich, Entdeckung 1965
Penzias + Wilson (Nobelpreis)
 $\Rightarrow$ Spektrum eines schwarzen Körpers
der Temperatur 2.7 K

Außerordentlich isotrop aus allen Richtungen

$$\delta T / T \approx 10^{-5}$$

COBE in '90 Jahren, WMAP in '00 Jahren:

Satellitenexperimente haben sehr kleine Fluktuationen der Hintergrundstrahlung-Temperatur aufgedeckt $\Rightarrow$ Quantenfluktuationen des frühen Universums



Friedmann - Modell des Universums:

allg. Relativitätstheorie ; Hubble - Gesetz $\Rightarrow$ Alter (Größe)

Dichte ρ $\begin{cases} > \rho_{crit.} \\ = \rho_{crit.} \\ < \rho_{crit.} \end{cases} \Rightarrow \begin{matrix} \text{geschlossenes Universum, kollabierendes Universum} \\ \text{flaches Universum, asymptotischer Radius} \\ \text{offenes Universum, ewige Expansion} \end{matrix}$

optische Methoden: $\rho < \rho_{crit.}$

Man vermutet jedoch, dass es neben der sichtbaren Materie (ca. 4%) noch sehr viel dunkle Materie (ca. 24%) und auch dunkle Energie gibt

Insgesamt $\rho \approx \rho_{crit.}$

Alter des Universums
(für unterkritische Dichte)

$$t_0 = \frac{1}{H_0} \approx 10 - 20 \text{ Milliarden Jahre}$$

Die ersten 3 Minuten

Anfang: thermodyn. Gleichgewicht zwischen allen Teilchen, Antiteilchen und Eichbosonen. Große Vereinheitlichung, kein Unterschied zwischen Quarks und Leptonen, alle WW gleich stark.

$t > 10^{-35} \text{ s}$ Abkühlung durch Expansion, Phasenübergang:
Abkoppelung der starken WW von der elektroschwachen, keine WW mehr zwischen Quarks und Leptonen.
Hier wurde das Verhältnis Quarks/Photonen $\approx 10^{-9}$ festgelegt, das auch heute noch gültig ist.

$t > 10^{-6} \text{ s}$ $kT \approx 100 \text{ MeV} \Rightarrow$ Quarks bilden Baryonen und Mesonen (vorher Quark-Gluon-Plasma). Protonen und Neutronen stehen durch schwache Prozesse im Gleichgewicht.

$t > 1 \text{ s}$ $kT \approx 1 \text{ MeV}$ (p, n -Massendifferenz): Neutrinos zu energiearm, um $p-n$ -Gleichgewicht aufrecht zu erhalten. ν entkoppeln und bewegen sich frei. N_p/N_n wächst auf ca 7 an.

$t \geq 3 \text{ min}$: $kT \approx 100 \text{ keV}$:

Energie der Photonen reicht nicht mehr aus, um die in Fusionsreaktionen entstehenden leichten Kerne wieder zu dissoziieren $\Rightarrow$ Urknall-Nukleosynthese von Deuterium, Helium, Lithium

$t \geq 30.000 \text{ Jahre}$:

Elektronen werden von Kernen eingefangen und bilden Atome, ~~Universum~~ kein Plasma mehr, Photonen können sich frei bewegen.

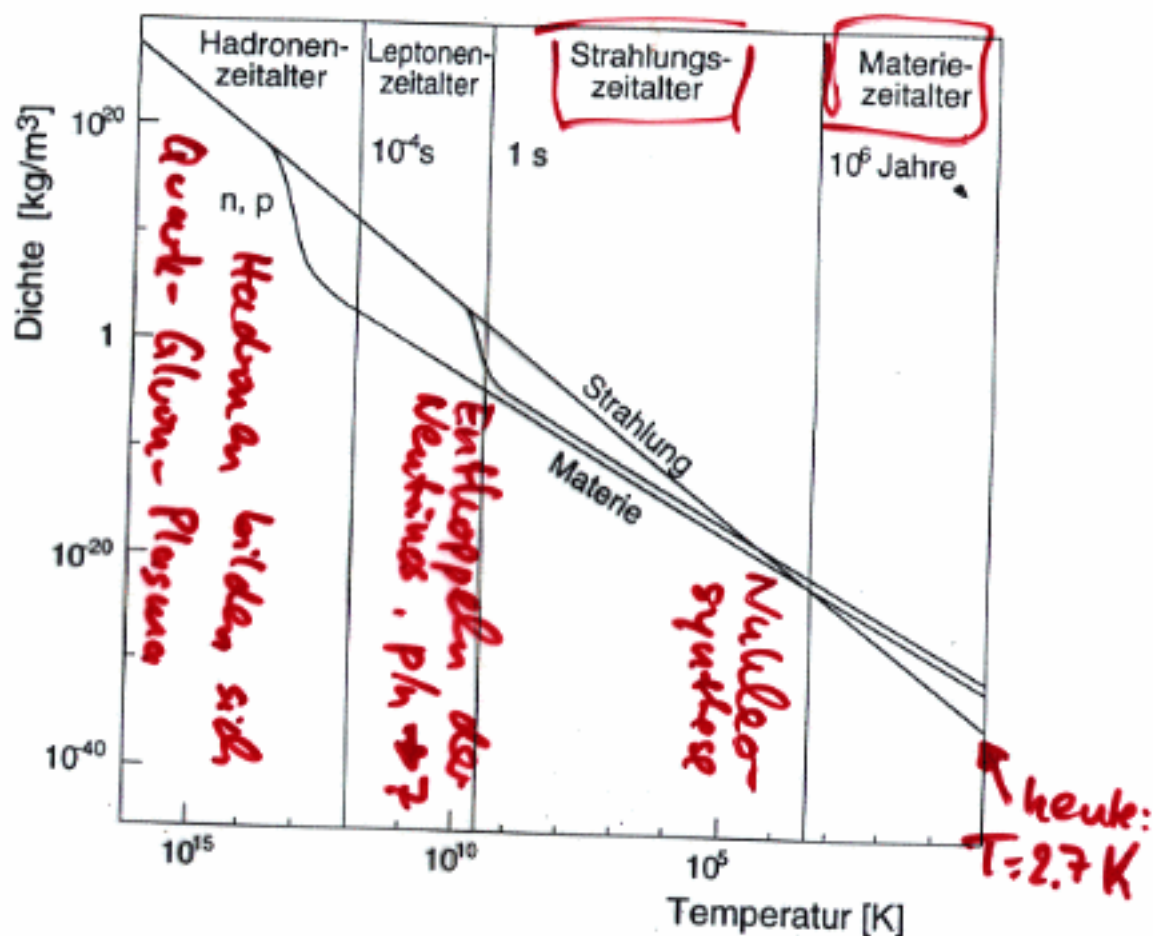


Abb. 19.9. Entwicklung der Energiedichte im Universum als Funktion der Temperatur ab dem elektroschwachen Phasenübergang ($T \approx 10^{15} \text{ K}$). In der frühen Entwicklungsphase des Universum war die Strahlung mit Materie und Antimaterie im thermischen Gleichgewicht. Nach und nach entkoppelt die Materie von der Strahlung und Materie- und Strahlungsenergiedichte entwickeln unterschiedliche Temperaturabhängigkeiten, so dass das Universum letztendlich materiedominiert wird.

Materie - Antimaterie - Asymmetrie

Vorfall: $N(q) = N(\bar{q})$, $N(\text{Baryonen}) = N(\text{Antibaryonen})$

heute: Materie, keine Evidenz für Strukturen aus Antimaterie.

Heute: $N_B / N_\gamma \approx 3 \cdot 10^{-10}$

Wenn alle Photonen aus $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$ Zerstrahlung, wäre

$q-\bar{q}$ -Asymmetrie von $\Delta q = \frac{q - \bar{q}}{q + \bar{q}} \approx 3 \cdot 10^{-10}$

ausreichend, um Materie-Antimaterie-Asymmetrie zu erklären

Benötigt: CP-Verletzung, Baryon-Zahl-Verletzung, thermodyn. Ungleichgewicht

Grand-Unified-Theories erlauben solche Bedingungen in den ersten 10^{-35} s des Universums.

X-Bosonen mit Masse $\sim 10^{-14}$ GeV erlauben Quark-Lepton-Übergänge. CP-Verletzung $X \rightarrow q l \neq \bar{X} \rightarrow \bar{q} \bar{l}$