

Moderne Physik: Elementarteilchenphysik, Astroteilchenphysik, Kosmologie

Ulrich Husemann
Humboldt-Universität zu Berlin
Sommersemester 2008

Termine

- Klausur
 - Prüfungsordnung sieht zweistündige Klausur vor
 - Termin: Donnerstag, 24.07.08
 - 9-11 Uhr s.t.
 - Raum: 2'101 Text
 - Masterstudierende: 3 Wochen vor Beginn der Prüfungswoche anmelden → am besten diese Woche!

Präsenzübung

- Welche der folgenden Zerfälle sind nicht erlaubt und warum? Welche Wechselwirkung vermittelt die erlaubten Zerfälle?

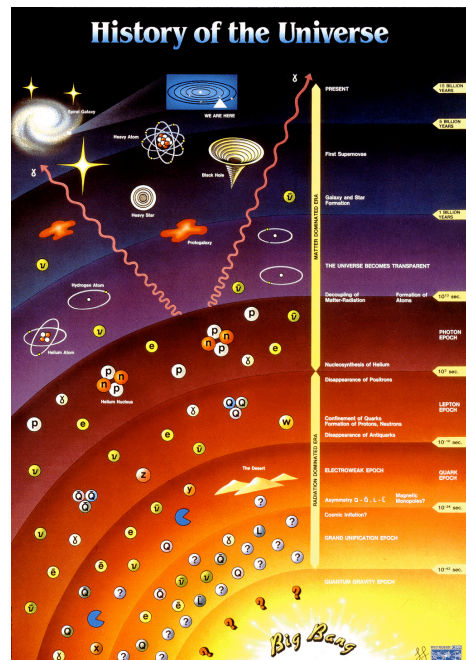
$$\begin{array}{ll} \mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e & p \rightarrow \pi^+ \pi^0 \\ K^+ \rightarrow e^+ \nu_e & \pi^- \rightarrow K^0 e^- \bar{\nu}_e \\ n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e & K^- \rightarrow \pi^0 e^- \bar{\nu}_e \\ \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma & t \rightarrow W^+ b \\ \gamma \rightarrow e^+ e^- & t \rightarrow Z c \\ e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma & \Delta^{++} \rightarrow p \pi^+ \end{array}$$

Kapitel 8.3

Entwicklung des frühen Universums

Geschichte des Universums

- Fortschreitende Zeit: Energie/ Temperatur nehmen ab
($E = k_B T \rightarrow T[\text{K}] \approx 11605 \cdot E[\text{eV}]$):
- Wichtige Epochen:
 - $t < 10^{-43}$ s: Urknall
 - $t < 10^{-34}$ s: Kosmische Inflation
 - $t < 1$ s: Baryogenese
 - $t \approx 3$ min: Nukleosynthese
 - $t \approx 380.000$ Jahre: Entkopplung Materie-Strahlung
 - $t \approx 10^9$ Jahre: Erste Sterne und Galaxien



[CERN]

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 9

5

Urknall und Planck-Epoche

- Zustand unendlicher (Massen-/Energie-)Dichte:
 - Skalenfaktor $a = 0$
 - Universum nicht notwendigerweise punktförmig, falls Universum bei Urknall ∞ ausgedehnt: $\lim_{a \rightarrow 0} (\infty \cdot a) = \infty$
- Keine Theorie für $t < t_{\text{pl}} = 5 \cdot 10^{-44}$ s („Planck-Epoche“)
 - (Übung) Planck-Masse m_{pl} : Comptonwellenlänge eines Teilchens mit $m_{\text{pl}} =$ Schwarzschildradius (Ereignishorizont eines schwarzen Loches) $\rightarrow m_{\text{pl}} c^2 = 1.22 \cdot 10^{19}$ GeV
 - Lichtausbreitung in t_{pl} : Planck-Länge $l_{\text{pl}} = 1.6 \cdot 10^{-35}$ m
 - Kürzeste bekannte natürliche Zeit-/Längenskala: Gravitations- und Quanteneffekte gleich stark

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 9

6

Die erste Sekunde

- Abnahme der Energiedichte im Universum nach Urknall
 - GUT-Skala (grand unified theory), ca. 10^{16} GeV: QCD und elektroschwache WW gleich stark
 - Elektroschwache Skala (≈ 100 GeV):
 - Higgs-Mechanismus: Massen der Elementarteilchen
 - Massive W- und Z-Bosonen entstehen
 - Neutrinos „entkoppeln“ aus Gleichgewicht
$$p + e^- \leftrightarrow n + \nu_e$$
$$p + \bar{\nu}_e \leftrightarrow n + e$$

→ kosmischer Neutrinohintergrund (WMAP 2008: erste Evidenz)
 - QCD-Skala (≈ 200 MeV): Confinement von Quarks setzt ein
→ Bildung von Hadronen

Baryogenese

- Ungelöste Frage #1: Wenn der Urknall gleich viele Quarks und Antiquarks erzeugt, warum habe sie sich nicht alle vernichtet (mittels $q\bar{q} \rightarrow \text{Photonen}$)?
 - Urknall → Gleichgewicht: $n_B = n_{\text{Anti-B}}$
 - Heute beobachtet $\eta := \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \approx 10^{-9}$
 - Warum ist ein Baryon in einer Milliarde übriggeblieben?
- Drei Bedingungen für Baryogenese (A. Sakharov, 1967):
 - Prozess mit Baryonenzahlverletzung
 - Verletzung der Symmetrie zwischen Teilchen/Antiteilchen
 - Reaktionen außerhalb des thermischen Gleichgewichts

Primordiale Nukleosynthese

- Prozesse in ersten drei Minuten:
 - Deuteriumbildung und Dissoziation: $p + n \leftrightarrow D + \gamma$
 - Neutronzerfall: $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$
- $T \approx 8 \cdot 10^8$ K: Photonenergie zu gering zur Dissoziation
 - Verhältnis von Neutronen zu Protonen: ca. 1:7
 - Deuterium: sofortige Weiterreaktion zu Helium (viel größere Bindungsenergie)
 - Vorhersage des Massenanteils von Helium:

$$Y = \frac{4n_{\text{He}}}{4n_{\text{He}} + n_{\text{H}}} = \frac{2n_n}{n_p + n_n} = \frac{2\frac{n_n}{n_p}}{1 + \frac{n_n}{n_p}} \approx 0.25$$

$$\text{mit } n_{\text{H}} = n_p - n_n, n_{\text{He}} = \frac{n_n}{2} \quad \rightarrow \text{experimentell bestätigt}$$

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 9

9

Primordiale Nukleosynthese

- Messung des (absoluten) Vorkommens von Helium und Deuterium + kernphysikalische Rechnung

- Anteil von baryonischer Materie an Gesamtenergie eines flachen Universums ($\Omega_0 = \rho/\rho_{\text{krit}} = 1$)

$$\Omega_b = \frac{\rho_b}{\rho_{\text{krit}}} \approx 0.04$$

- Ungelöste Frage #2: Woraus besteht der Rest?
- Nach drei Minuten:
 - Übergang strahlungsdominiertes Universum (meiste Energie steckt in Photonen) \rightarrow materiedominiertes Universum
 - Verlangsamung der Reaktionsrate, Plasma mit neuem Gleichgewicht durch „Rekombination“ $\text{Kern} + e \leftrightarrow \text{Atom} + \gamma$

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 9

10

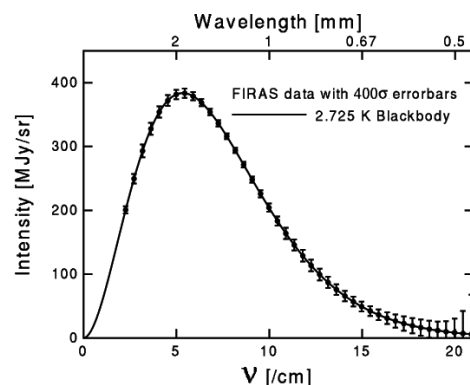
Entkopplung Strahlung-Materie

- Entkopplung der Photonen („Universum wird durchsichtig“)
- Abschätzung: Grundzustandsenergie Wasserstoff 13,6 eV (150.000 K)
- 10^9 mal mehr Photonen als Baryonen: 0,3 eV (3000 K) ausreichend → 380.000 Jahre nach Urknall
- Photonen breiten sich bis heute im Universum aus → kosmische Hintergrundstrahlung (cosmic microwave background, CMB) ≈ Fingerabdruck des frühen Universums
- Rotverschiebung: $T_{\text{beob}} = T_{\text{em}}/(1+z) = 2,7 \text{ K} \rightarrow z \approx 1000$
- CMB vorhergesagt von G. Gamov (1946), entdeckt von A. Penzias, R. Wilson (1965)

COBE und WMAP

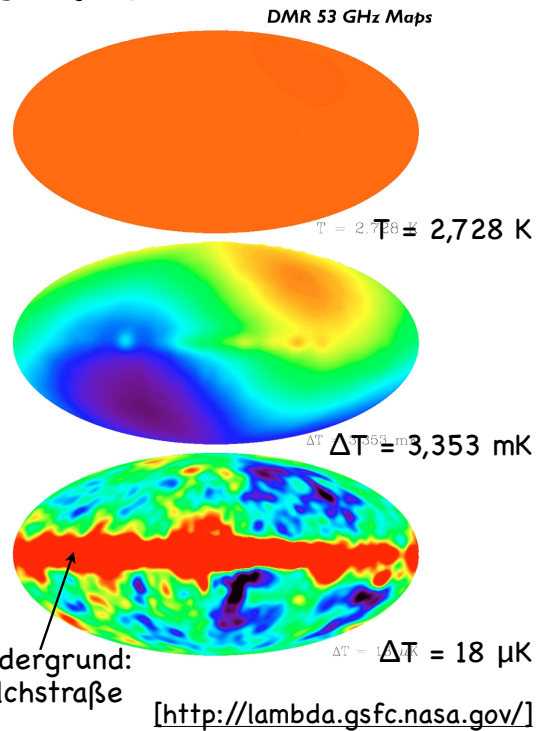
- NASA-Satelliten zur genauen Vermessung des CMB
 - Cosmic Background Explorer (COBE): Start 1989
 - Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP): Start 2001
- Ziel: Himmelskarte im Mikrowellenbereich ($\lambda = 0,3-3,0 \text{ cm}$)
 - Temperaturverteilung des CMB (WMAP: Winkelauflösungen $< 1^\circ$)
 - Polarisation des CMB

COBE: CMB ist perfekter schwarzer Körper mit $T = 2,725 \text{ K}$



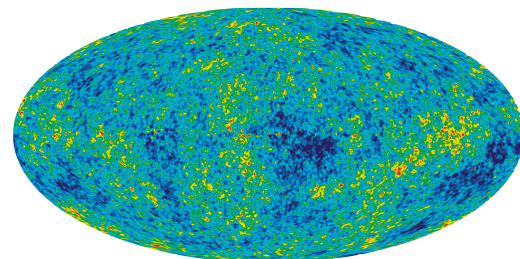
COBE-Resultate

- CMB ist isotrop bis auf Temperaturschwankungen $O(10^{-3})$ → Dipol = Bewegung unserer Galaxie relativ zum CMB
- Temperaturschwankungen $O(10^{-6})$:
 - Abbild von Fluktuationen (Schallwellen) im frühen Universum
 - Rückschluss auf Struktur des frühen Universums

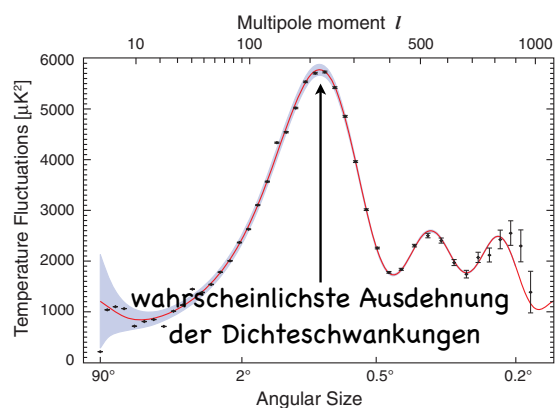


WMAP-Resultate

- Temperaturschwankungen = Dichteschwankungen: Photonen aus Gegenden mit mehr Materie stärker rotverschoben (kälter)
- Interpretation mit kosmologischen Modellen → Extraktion kosmologischer Parameter, z. B. Energie im Universum:
 - 4% baryonische Materie
 - 21% dunkle Materie
 - 75% dunkle Energie

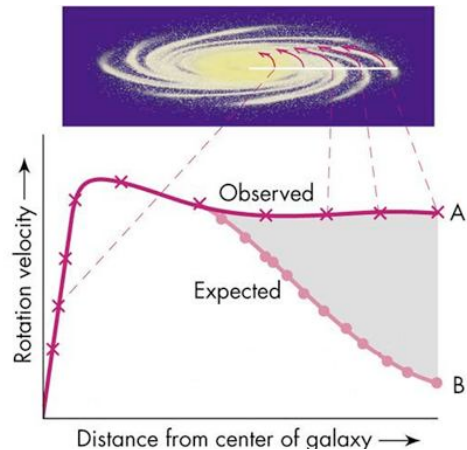


[<http://map.gsfc.nasa.gov/>]



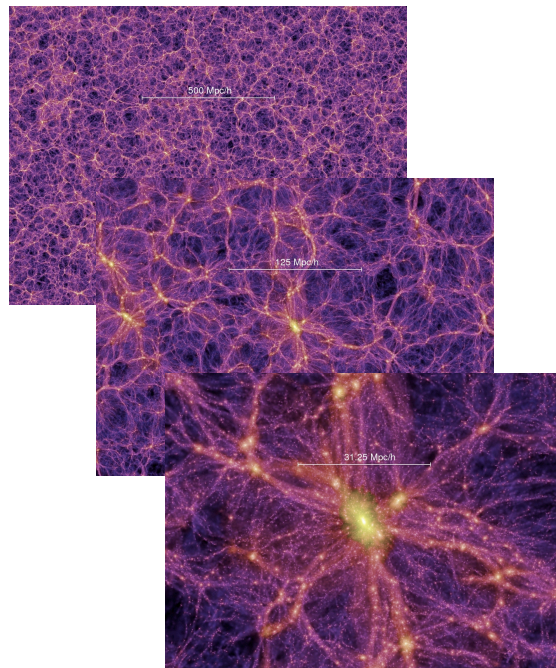
Dunkle Materie

- WMAP: 21% der Energie im Universum durch dunkle Materie (DM)
- Weitere Hinweise, z.B. Rotationsgeschwindigkeit von Galaxien → Galaxien besitzen Halo aus DM
- Kandidaten für DM:
 - Neutrinos: fast masselos, nur schwache WW → relativistisch, „heiße DM“
 - WIMPs (weakly interacting massive particles): schwere stabile Teilchen ($\approx 100 \text{ GeV}/c^2$) in Theorien jenseits des Standardmodells (z.B. Supersymmetrie) → „kalte DM“



DM und Strukturbildung

- Bildung von Clustern von Galaxien → dominiert durch DM-Gravitation
- Vergleich von Beobachtungen (z. B. Sloan Digital Sky Survey) mit Simulationsrechnungen (10^{10} Teilchen seit $t = 10^7 \text{ y}$)
 - Heiße DM → Gravitation kann Materie schlecht zusammenhalten → kleine Strukturen als beobachtet
 - Kalte DM → Strukturgröße entspricht Beobachtungen



[<http://www.mpa-garching.mpg.de/millennium/>]

Dunkle Energie

- 75% der Energie im Universum: „Gravitationsdruck“ → Expansion des Universums gegen Gravitationskräfte
- Praktische Lösung: kosmologische Konstante = konstante geringe Energiedichte (10^{-17} J/cm^3) → Ursache?
- Erklärungsversuch I: Vakuumenergie der Quantenmechanik bei Planck-Skala (10^{103} J/cm^3)
→ 120 Größenordnungen zu groß
- Erklärungsversuch II: neues Quantenfeld mit geringer Masse ($\approx 10^{-33} \text{ eV}$) → Spekulation: „Quintessenz“ (Name: klassisches 5. Element)