

TU Dortmund

Studentenseminar: Kosmologie und Teilchenphysik

Handout zum Vortrag über

Rekombination und kosmischer Mikrowellenhintergrund

erstellt von:
Datum

Melanie Engelkemeier (melanie.engelkemeier@tu-dortmund.de)
07.12.2015

1 Einleitung

Der kosmische Mikrowellenhintergrund ist eine weitestgehend isotrope Strahlung mit Anisotropien im μK -Bereich, welche während der Rekombination entstanden ist. Die Vermessung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds hat eine wichtige Bedeutung für die Kosmologie, da sie zum Verständnis der Entwicklung sowie der Geometrie und der Zusammensetzung des Universum beiträgt.

2 Der Urknall

Die Planck-Zeit ist die älteste Epoche, die nach heutiger Erkenntnis nach dem Urknall vorherrschte. In dieser Epoche sind Raum und Zeit nicht vollständig definierbare Größen, da die Heisenbergsche Unschärferelation in einem als Vakuum definierten Zustand niedrigster Energie nur virtuelle, nicht vorhersagbare Teilchen definiert. In den Dimensionen der Planck-Zeit ($t_{\text{pl}}=5.3 \cdot 10^{-44}$ s) und der Planck-Länge ($l_{\text{pl}}=1.6 \cdot 10^{-33}$ cm) ist eine Unterscheidung von Raum und Zeit unmöglich. Zu dieser Zeit gab es nur eine Kraft, die Urkraft und eine Teilchensorte. Diese Epoche ist nicht vollständig beschrieben, daher ist sie in der Theorie des Urknalls nicht allgemein anerkannt.

Die GUT (Grand Unified Theory) Epoche folgt der Planck-Epoche durch spontane Symmetriebrechung der Urkraft. Zu diesem Zeitpunkt folgt die Aufspaltung in die Gravitationskraft und die GUT-Kraft. Die Theorie über vereinheitlichte Kräfte ist nicht bewiesen, weshalb über die Phasen vor der Inflation noch keine fundamentalen Erkenntnisse vorhanden sind.

Nach der Inflation (10^{-35} bis 10^{-32} s) dominierten Quarks und Antiquarks die Quark-Epoche und die Leptonen sowie ihre Antiteilchen die Lepton-Epoche. Der Materieüberschuss der Quarks war die Ursache dafür, dass sich Protonen und Neutronen bilden konnten. Elektronen, die nicht mit ihren Antiteilchen annihilieren sind, führen weiterhin Streuprozesse mit Photonen und Protonen aus.

Die Photonen-Epoche beschreibt die Zeit in der sich erste Atomkerne bilden. Mit sinkender Temperatur ist die Energie von Neutronen und Protonen zu gering um die gegenseitige Anziehung zu überwinden.

In der Zeit der Rekombination verbinden sich Elektronen und die zuvor entstandenen Atomkerne zu ersten Atomen. Das Universum wird zu diesem Zeitpunkt durchsichtig für die Photonen und somit entkoppeln Strahlung und Materie. Nach dieser Phase der Rekombination können sich Strukturen wie Galaxien bilden, da das Universum nun materiedominiert ist.

3 Die Physik der Rekombination

Vor der Rekombination besteht das Universum aus einem heißen, dichten Medium aus ionisierten Teilchen. Die Strahlung und die Materie sind bis zu einer Temperatur von ungefähr 3000 K im thermischen Gleichgewicht. Reaktionen von Strahlung und Materie wie die Paarbildung



und die Compton-Streuung



erhalten das Gleichgewicht, denn die Reaktionen laufen mit gleicher Wahrscheinlichkeit in beide Richtungen ab. Es folgt, dass die Strahlung zu dieser Zeit einem Planck'schen Schwarzkörperspektrum

$$I(\nu)d\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu \quad (3)$$

entspricht, wobei $I(\nu)$ die frequenzabhängige Intensität und T die Temperatur ist. Im Falle einer adiabatischen Abkühlung während der Expansion gilt für die Photonstrahlung

$$T_\gamma \cdot A = \text{const.} \Rightarrow \frac{T_\gamma(t)}{T_\gamma(t_0)} = \frac{A(t_0)}{A(t)}, \quad (4)$$

wobei A der Skalenfaktor und T_γ die Temperatur der Photonen ist. Aus der Längenskalierung des Skalenfaktors mit der Wellenlänge der Strahlung

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{A(t_0)}{A(t)} = 1 + z \quad (5)$$

mit z als Rotverschiebung folgt, dass die Temperatur linear mit der Rotverschiebung abfällt.

Sobald die Temperatur unter die Photoionisationsgrenze von Wasserstoff fällt, verlaufen Prozesse der Form



nicht mehr mit gleicher Wahrscheinlichkeit in beide Richtungen ab. Die Kerne und Elektronen verbinden sich zu ersten Atomen und liegen nicht mehr ionisiert vor. Die Wahrscheinlichkeit, dass Photonen mit Wasserstoff streuen wird mit sinkender Temperatur immer geringer, da die Energie der Photonen mit der Temperatur abnimmt. Die freie Weglänge der Photonen wird in der Zeit der Rekombination größer, weshalb Strahlung und Materie während der Rekombination entkoppeln. Diese Strahlung kann heute als kosmische Hintergrundstrahlung vermessen werden.

Die heutige Temperatur des Universums beträgt $T=(2.725 \pm 0.004)$ K und die adiabatische Abkühlung, sowie das thermische Gleichgewicht zur Zeit der Rekombination erhalten das Planck'sche Schwarzkörperspektrum.

4 Der kosmische Mikrowellenhintergrund

1946 haben Georg Gamov und Ralph Alpher den kosmischen Mikrowellenhintergrund (Cosmic Microwave Background, CMB) theoretisch vorhergesagt. Sie vertreten die Ansicht, dass die Nachwärme des Urknalls als Reststrahlung von wenigen Kelvin messbar sein muss. Die Aussagen wurden jedoch nicht ausreichend repliziert, so dass die Aussagen nicht weiter untersucht wurden.

Etwa 1964 suchen Robert Dicke und James Peebles unabhängig von den Aussagen von Gamov und Alpher systematisch nach der kosmischen Hintergrundstrahlung. Während der Konstruktion eines Detektors zur Suche nach dem CMB, entdecken Robert Wilson und James Peebles die kosmische Hintergrundstrahlung zufällig während ihrer Experimente.

Wilson und Penzias vermessen mit einer Hornantenne Radioquellen aus der Milchstraße. Ihre Messungen werden durch ein stetiges Untergrundrauschen gestört. Die Störquelle war nicht mit ihren Messinstrumenten verbunden, so dass dieses Rauschen vom Universum selbst stammen muss. 1978 haben sie für diese Entdeckung den Nobelpreis erhalten.

Der kosmische Mikrowellenhintergrund ist weitestgehend isotrop und daher das bisher am besten vermessene Planck'sche Schwarzkörperspektrum. In der Größenordnung von $\Delta T=10^{-5}$ K können jedoch Anisotropien gemessen werden. Im Folgenden werden diese Anisotropien näher untersucht.

Theoretisch können die Anisotropien durch die Reihenentwicklung der Kugelflächenfunktionen in der Temperatur berechnet werden, da der CMB anschaulich gesehen die Innenseite einer Kugel zeigt. Die Reihenentwicklung errechnet sich nach

$$T(\theta, \phi) = \sum a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi) \quad (7)$$

mit der Kugelflächenfunktion der Form

$$Y_{\ell m}(\theta, \phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{2\ell + 1}{2} \cdot \frac{(\ell - m)!}{(\ell + m)!}} P_{\ell m}(\cos(\theta)) e^{im\phi} \quad (8)$$

Für $\ell=0$ ergibt sich der Monopolterm, der die Isotropie des kosmischen Mikrowellenhintergrunds im mK-Bereich darstellt (siehe Abbildung 1a). Der Dipolterm ergibt sich für $\ell=2$ und beschreibt die Re-

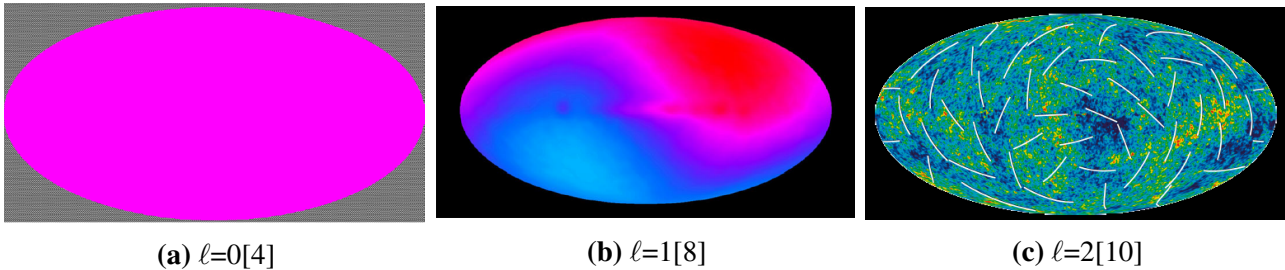


Abbildung 1: Multipolentwicklung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds.

lativbewegung der Erde zu der Expansion (Abbildung 1b). Photonen erscheinen aus verschiedenen Regionen blau- oder rotverschoben. Der Monopol- und der Dipolterm tragen nicht zur Anisotropie bei.

Der Quadrupolterm mit $\ell=3$ führt zu einer Polarisation der Strahlung (Abbildung 1c). Die Auflösung von COBE reicht bis zu einem Multipolmoment von $\ell=20$.

Das Leistungsspektrum des CMB kann durch zwei theoretische Modelle vorhergesagt werden. Zufällige Dichtefluktuationen entstehen in einem Gleichgewicht aus gravitativem Kollaps und adiabatischer Expansion. Druckwellen können sich mit Schallgeschwindigkeit vor der Rekombination ausbreiten. Die Druckanisotropien werden bei der Rekombination ausgefroren und es entstehen zufällig verteilte Temperaturzonen.

Topologische Defekte der Raumzeit entstehen bei der spontanen Symmetriebrechung bei kosmologischen Phasenübergängen. In diesem Szenario beschreiben punktförmige Defekte Monopole und lineare Defekte beschreiben kosmische Strings. Das Leistungsspektrum (Abbildung 2) entspricht der Vorhersage von zufälligen Dichtefluktuationen.

Aus der Lösung der Einstein'schen Feldgleichungen folgt das Leistungsspektrum des CMB, wobei die Anfangsbedingungen dem Anteil an Massen und Energien im Universum entsprechen. Daher ist es möglich aus dem Spektrum die Geometrie sowie die kosmologischen Konstanten des Universums zu bestimmen.

Die Anisotropien werden durch drei wesentliche Effekte beschrieben. Der Sachs-Wolfe-Effekt beschreibt die Anisotropien auf großen Winkelskalen ($\ell \leq 100$). Fluktuationen in der Rotverschiebung der Photonen werden durch Gravitationspotentiale, also Flächen höherer Dichte/Temperatur, erklärt. Ein Photon gewinnt Energie wenn es in einen Potentialtopf stürzt und wird dadurch blauverschoben. Beim Verlassen des Potentialtopfes muss Energie aufgewendet werden und das Photon wird rotverschoben.

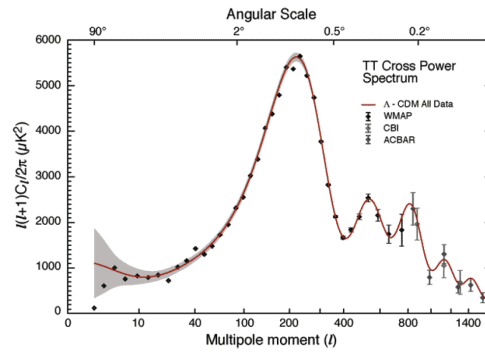


Abbildung 2: Das Leistungsspektrum des kosmischen Mikrowellenhintergrunds, die Daten wurden von WMAP, CBI und ACBAR aufgenommen[6].

Die akustischen Oszillationen erzeugen Peaks im Leistungsspektrum und beschreiben Effekte in der Anisotropie für $100 \leq \ell \leq 1000$. Der erste Peak ist bei einem Multipolmoment von $\ell \approx 200$ zu erkennen.

Die Peaks entstehen durch die Oszillation von Strahlung und Materie, ausgelöst durch Dichte- und Temperaturfluktuationen. Gerade Peaks beschreiben hierbei Geschwindigkeitspeaks und ungerade Peaks beschreiben die Verdichtung. Die Peaks entstehen, wenn die Zeit bis zur Rekombination größer ist als die Zeit, welche die Welle durch das Plasma benötigt. Aus dem Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Zeit bis zur Rekombination $\lambda = c_{\text{schall}} \cdot t_{\text{rec}}$ ergeben sich Oberschwingungen, die als Peaks im Spektrum zu erkennen sind.

Rückschlüsse auf den Anteil der dunklen Energie Ω_Λ , sowie den Anteil dunkler und baryonischer Materie Ω_M im Universum können aus der Lage und Höhe der Peaks gewonnen werden. Der Strahlungsanteil kann vernachlässigt werden, denn er entspricht einer Größenordnung von 10^{-4} . Die Geometrie des Universums folgt aus $\Omega_{\text{total}} \approx \Omega_\Lambda + \Omega_M$.

Der Öffnungswinkel unter dem der erste Peak beobachtet wird unterscheidet sich für ein flaches, ein offenes und ein geschlossenes Universum. Ein flaches Universum entspricht einem Öffnungswinkel von $\alpha \approx 1^\circ$, woraus $\Omega_{\text{total}} \approx 1$ folgt. Im Falle eines offenen Universums wäre $\alpha > 1^\circ$ und für ein geschlossenes Universum wäre $\alpha < 1^\circ$.

Das Leistungsspektrum des CMB entspricht einer gedämpften Schwingung. Die Dämpfung lässt sich unter anderem durch massebehaftete Baryonen erklären, welche einen Druck auf das Plasma ausüben und so die Oberschwingungen dämpfen. Ein weiterer Effekt ist die konstruktive Überlagerung der Grundschwingung mit ungeraden Peaks und die destruktive Überlagerung der ersten Oberschwingung mit den geraden Peaks. Anisotropien auf niedrigen Winkelskalen werden zudem durch die Silk-Dämpfung beeinflusst. Sie verhindert vor der Rekombination die gravitative Verklumpung von Baryonen, wodurch die akustischen Peaks exponentiell gedämpft werden.

5 Experimente zur Vermessung des CMB

Der Vergleich der verschiedenen Experimente COBE, WMAP und Planck in Abbildung 3 zeigt bereits die Verbesserung der Auflösung der gemessenen Anisotropien im kosmischen Mikrowellenhintergrund.

Der COBE (COsmic Microwave Background) Satellit ist der erste Forschungssatellit zur Untersuchung des CMB. Im Forschungszeitraum zwischen 1989 und 1993 hat COBE die erste Karte des CMB (Abbildung 3b) geliefert. Die Hauptkomponenten des COBE Satelliten sind DIRBE (Diffuse Infrared Background Experiment), DMR (Differenzial Microwave Radiometer) und FIRAS (Far Infrared Absolute Spectrophotometer).

Der WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) Satellit hat von 2001 bis 2010 den kosmischen

Mikrowellenhintergrund vermessen. Abbildung 3b zeigt die Anisotropien des CMB, die von WMAP erstellt wurde. Im Vergleich zu COBE hat WMAP mit einer 20fach verbesserten Auflösung messen können. WMAP besteht aus Pseudo-Correlations-Radiometern, die auf verschiedenen Frequenzen messen. Ein Signal wird registriert sofern dieses nicht auf allen Frequenzen gemessen wurde. Die gemessenen Daten von WMAP liefern bereits viele Erkenntnisse über die Masseverteilung sowie die Geometrie des Universums.

Der Planck-Satellit (2009 bis 2013) liefert bisher die Daten mit der größten Auflösung für den kosmischen Mikrowellenhintergrund. Er verbessert die Messung der kosmologischen Konstanten nochmals, da Temperaturfluktuationen im Bereich von 10^{-6} K gemessen werden können. Die Hauptkomponenten des Satelliten sind ein Array aus Radio-Empfängern und ein Array aus Mikrowellen-Detektoren.

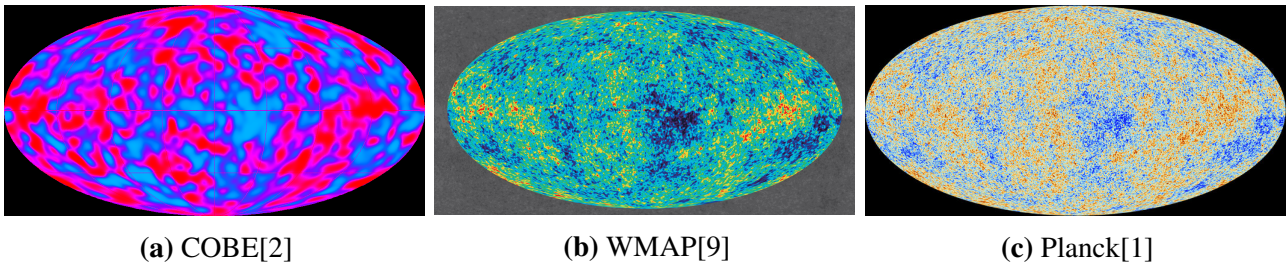


Abbildung 3: Karte des kosmischen Mikrowellenhintergrunds der verschiedenen Satelliten.

6 Ergebnisse der Messungen und Berechnungen

Der erste akustische Peak hängt von der totalen Dichte des Universums ab, daher lässt sich hieraus die Krümmung des Universums und der Öffnungswinkel berechnen. Die Höhe des Peaks beschreibt die Baryondichte sowie das Baryon-Photon-Verhältnis, denn die Form des Peaks hängt von der Gravitationswirkung und dem Strahlungsdruck ab. Die Messungen zeigen, dass das Universum sich ausdehnt und dabei sehr flach ist, da $\Omega_{\text{total}} \approx 1$ ist.

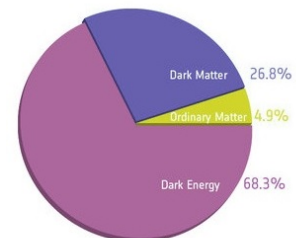
Die Höhenverhältnisse der ersten beiden Peaks liefern Rückschlüsse auf die Masse- und Energieverteilung des Universums. In der unten stehenden Tabelle sind die berechneten Parameter durch die Daten des WMAP Satelliten aufgetragen. Genaue Berechnungen sind nur unter Berücksichtigung von Supernovae 1a Messungen zur Energie- und Masseverteilung möglich.

Abbildung 4b zeigt das Anteilsverhältnis von dunkler Energie zu dunkler und baryonischer Materie.

Parameter	WMAP 3-year	All combined ^a
H_0 (Hubble parameter)	73.5 ± 3.2 km/s/Mpc	$70.8^{+1.5}_{-1.6}$ km/s/Mpc
h (reduced Hubble parameter)	0.735 ± 0.032	$0.708^{+0.015}_{-0.016}$
n_s (scalar spectral index) ^b	0.951 ± 0.016	$0.938^{+0.015}_{-0.014}$
$\Omega_b h^2$ (baryon density)	$0.0223^{+0.00075}_{-0.00073}$	$0.02193^{+0.00067}_{-0.00068}$
Ω_Λ (dark energy density)	0.763 ± 0.034	0.738 ± 0.016
Ω_m (matter density)	0.237 ± 0.034	0.262 ± 0.016
σ_8 (matt. fluc. On $8h^{-1}$ Mpc)	0.742 ± 0.051	$0.751^{+0.032}_{-0.031}$
t_0 (age of the universe)	$13.73^{+0.16}_{-0.15}$ Gyr	13.84 ± 0.14 Gyr
τ (reionization optical depth)	$0.088^{+0.029}_{-0.030}$	$0.070^{+0.027}_{-0.028}$

^aResults with combined data from the experiments WMAP, 2df, SDSS, BOOMERanG, ACBAR, CB I, VSA, SN astier, SN gold, WL, and BAO.

^bAt $k=0.002/\text{Mpc}$.



After Planck

(a) Werte der kosmologischen Konstanten[9]

(b) Ω_Λ und Ω_M im Verhältnis[3].

Literatur

- [1] P. A. R. Ade et al. Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results. *Astron. Astrophys.*, 571:A1, 2014.
- [2] NASA's Goddard Space Flight Center. Cobe satellite marks 20th anniversary. http://www.nasa.gov/topics/universe/features/cobe_20th.html.
- [3] Matthew Francis. First planck results: the universe is still weird and interesting. <http://arstechnica.com/science/2013/03/first-planck-results-the-universe-is-still-weird-and-interesting/>.
- [4] Smoot Group. The cosmic microwave background radiation. <http://aether.lbl.gov/cmb.html>.
- [5] Wayne Hu. Lecture Notes on CMB Theory: From Nucleosynthesis to Recombination. 2008.
- [6] Kolanosk. Beobachtbare grundlagen der kosmologie. <https://www-zeuthen.desy.de/kolanosk/astro0506/skripte/kosmos03.pdf>.
- [7] Ariel Goobar Lars Bergstroem. *Cosmology and Particle Astrophysics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2 edition, 2004.
- [8] NASA/GSFC. Dmr images. http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/dmr_image.cfm.
- [9] George F. Smoot. Nobel lecture: Cosmic microwave background radiation anisotropies: Their discovery and utilization*. <http://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.79.1349>, Nov 2007.
- [10] NASA / WMAP Science Team. Cmb images. <http://wmap.gsfc.nasa.gov/media/060917/index.html>.