

Hauptseminar “Der Urknall und seine Teilchen”

Kosmische Hintergrundstrahlung

Anna Weigel

30. Mai 2011

Einführung

Was ist kosmische Hintergrundstrahlung?

Die kosmische Hintergrundstrahlung (= Cosmic Microwave Background, CMB) ist eine Strahlung im Mikrowellenbereich. Sie entstand etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall bei der Entkopplung von Strahlung und Materie. Das Spektrum der Strahlung entspricht nahezu dem eines idealen schwarzen Körpers. Die kosmische Hintergrundstrahlung erfüllt das ganze Universum, sodass wir an jedem beliebigen Punkt im Universum in einem Kubikzentimeter Raum immer etwa 400 Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung finden. Der CMB ist isotrop bis auf Anisotropien im Bereich von etwa $10^{-5}K$. Diese Anisotropien lassen Rückschlüsse auf die Form und die Zusammensetzung des Universums zu.

Abbildung 1 zeigt eine typische Darstellung der kosmischen Hintergrundstrahlung. Diese Abbildung wurde mit dem NASA Satelliten WMAP erstellt. Sie zeigt die Temperaturunterschiede der Strahlung. Rote Punkte entsprechen einer hohen Strahlungstemperatur, blaue dagegen einer niedrigen. Der maximale Temperaturunterschied in dieser Abbildung beträgt $\pm 200\mu K$. Die Durchschnittstemperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung beträgt heute etwa $2,7K$.

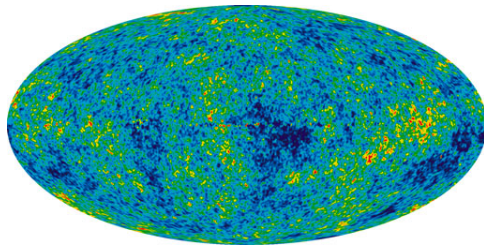


Abbildung 1: Typische Darstellung des CMB, aufgenommen von WMAP

Wie entstand die kosmische Hintergrundstrahlung?

Als das Universum noch sehr jung war, also vor etwa 13,7 Milliarden Jahren, war es erfüllt von einem heißen Plasma aus Photonen, Baryonen und Elektronen. Das Universum war “undurchsichtig” für die Photonen, da diese vor allem an den Elektronen gestreut wurden und so nur eine kurze freie Weglänge hatten. Man spricht von einem *strahlungsdominierten Universum*. Durch die Expansion des Universums sanken die Energiedichten von Strahlung und Materie. Die Energiedichte der Strahlung sank dabei schneller ($\sim S^{-4}$) als die Energiedichte der Materie ($\sim S^{-3}$), sodass es etwa 10 000 Jahre nach dem Urknall zu einem Übergang vom strahlungs- zum *materiedominierten Universum* kam. Etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall, war die Energie der Photonen soweit gesunken, dass Protonen und Elektronen zum ersten Mal neutrale Wasserstoffkerne bilden konnten. Dieser Prozess der *Rekombination* dauerte mehrere tausend Jahre und endete, als die Energie der Photonen nicht mehr ausreichte um Elektronen abzuspalten. Man spricht von einer vollständigen *Entkopplung* von Strahlung und Materie. Bis zu diesem Zeitpunkt sorgte die Wechselwirkung zwischen Photonen und Materie für ein thermodynamisches Gleichgewicht, was sich durch das heutige Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung nachweisen lässt. Durch das Fehlen geladener Protonen und Elektronen, konnten die Photonen nicht mehr mit Materie wechselwirken. Ihre freie Weglänge nahm zu und das Universum wurde für sie “durchsichtig”. Diese Photonen, die zum letzten Mal vor etwa 13 Milliarden Jahren gestreut wurden, bilden die kosmische Hintergrundstrahlung.

Geschichte & Entdeckung

Bereits 1946, 18 Jahre vor der eigentlichen Entdeckung, sagten *George Gamow* und *Ralph Alpher* die kosmische Hintergrundstrahlung voraus. Sie berechneten eine Strahlungstemperatur von $3 - 10K$. Ein Nachweis war jedoch nicht möglich, da es zu diesem Zeitpunkt keinen Empfänger gab, dessen Eigenrauschen gering genug gewesen wäre, um die schwachen Signale der kosmischen Hintergrundstrahlung detektieren zu können.

1964 suchten *Robert Dicke* und *James Peebles* an der Princeton University systematisch nach dem CMB. Parallel arbeiteten *Arno Penzias* und *Robert Wilson* an einem Laboratorium der Bell Telefongesellschaft. Sie hatten den Auftrag eine empfindliche Hornantenne mit einer 6m Öffnung für die Radioastronomie zu optimieren und stießen dabei auf ein ihnen unbekanntes Rauschen. Durch Mund-zu-Mund Propaganda erfuhren die beiden Forscherteams von einander und es wurde schnell klar, dass Penzias und Wilson die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckt hatten. Für diese Entdeckung erhielten sie 1978 den Nobelpreis.

Es folgten weitere erdgebundene Messungen, bei denen zum ersten Mal Anisotropien im CMB festgestellt wurden. Das Problem bei erdgebundenen Messungen stellen die in der Atmosphäre vorhandenen Wassermoleküle dar. Diese absorbieren Strahlung im Mikrowellenbereich sehr gut und machen so eine exakte Messung der kosmischen Hintergrundstrahlung schwierig. 1989 startete die NASA den COBE (= Cosmic Background Explorer) Satelliten zur Vermessung des CMB. Projektleiter waren *George Smoot* und *John Mather*, die 2006 den Nobelpreis für die Entdeckung des Schwarzkörperspektrums

und die Vermessung der Anisotropien erhielten. 2001 startete die NASA den WMAP und 2009 die ESA den PLANCK Satelliten zur genaueren Vermessung des CMB.

Mathematische Beschreibung

Mit dem COBE Satelliten konnte festgestellt werden, dass die Intensitätsverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung fast perfekt der Intensitätsverteilung eines schwarzen Körpers entspricht. Für einen schwarzen Körper gilt das *Plancksche Strahlungsgesetz*:

$$M_\nu(\nu, T) = \frac{2\pi \cdot h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

Dabei ist die Temperatur T von der Größe des Universums bzw. dem *Skalenfaktor* S abhängig: $T = T(S)$. Kennt man die aktuelle Temperatur der Strahlung T_{heute} und die Größe des Universums bzw. den Skalenfaktor zur Zeit der Entkopplung S_{Ent} , so lässt sich die Temperatur der Strahlung zur Zeit der Entkopplung berechnen:

$$\begin{aligned} T \cdot S &= const. \\ T_{heute} \cdot S_{heute} &= T_{Ent} \cdot S_{Ent} \end{aligned}$$

Mit $S_{heute} = 1$ folgt dann:

$$T_{Ent} = \frac{T_{heute}}{S_{Ent}} \approx \frac{3K}{10^{-3}} = 3000K$$

Die Strahlung hatte zur Zeit der Entkopplung also eine Temperatur von ca. 3000K.

Um die Temperatur der Strahlung zu bestimmen verwendet man bei einem schwarzen Strahler das *Wiensche Verschiebungsgesetz*:

$$\lambda_{max} T = 2,898 \cdot 10^{-3} mK$$

λ_{max} bezeichnet hier die Wellenlänge mit maximaler Intensität.

Um die Anisotropien der kosmischen Hintergrundstrahlung zu beschreiben führt man eine Entwicklung nach *Kugelflächenfunktionen* durch.

$$\frac{\Delta T(\Theta, \Phi)}{T} = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^{m=+l} a_{lm} Y_{lm}(\Theta, \Phi)$$

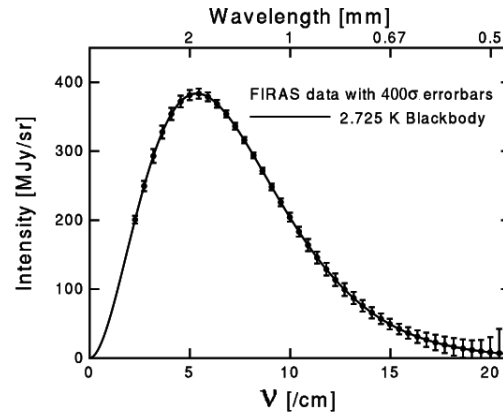


Abbildung 2: Intensitätsverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung, gemessen mit FIRAS an Bord des Satelliten COBE

Der Monopolterm ($l = 0$) beschreibt die Durchschnittstemperatur und ist für die weitesten Betrachtungen von keinem Interesse. Der Dipolterm ($l = 1$) beschreibt die Dipolanisotropie, die durch unsere Bewegung relativ zur kosmischen Hintergrundstrahlung entsteht. Die höheren Terme beschreiben die intrinsischen Anisotropien. Diese entstehen durch Prozesse in der kosmischen Materie selbst und lassen Rückschlüsse auf das frühe Universum zu.

Anisotropien

Dipolanisotropie

Da wir uns relativ zum Mikrowellenhintergrund bewegen, entsteht durch den Dopplereffekt eine Temperaturdifferenz von $\approx 3,3\text{mK}$, die sogenannte Dipolanisotropie. Beachtet man unsere Bewegung um die Sonne und die Bewegung der Sonne um das Zentrum der Milchstraße, so ergibt sich eine Geschwindigkeit von $\approx 600 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ in Richtung des Superhaufens Hydra-Centaurus.

Intrinsische Anisotropien

Für intrinsische Anisotropien wichtig ist die Darstellung im Winkelleistungsspektrum. Um dieses zu erstellen betrachtet man den Himmel unter einem bestimmten Winkel und misst die Temperaturdifferenz zwischen diesen beiden Punkten. Nach Vermessung des gesamten Himmels, trägt man die mittlere Temperaturdifferenz über dem jeweiligen Winkel auf. Wiederholt man dies für verschiedene Winkel, so erhält man das Winkelleistungsspektrum.

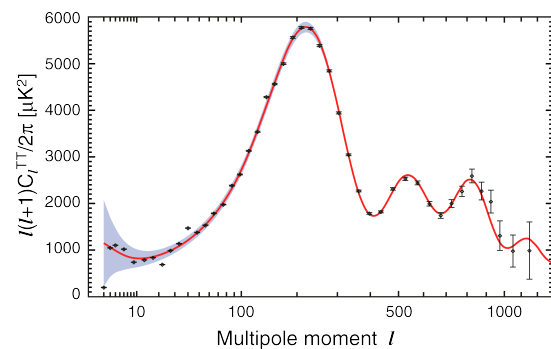


Abbildung 3: Intrinsische Anisotropien dargestellt im Winkelleistungsspektrum

Großwinklige intrinsische Anisotropien

Die einzigen Anisotropien, die man auf großen Winkelskalen ($> 1^\circ$) beobachten kann, werden durch den *Sachs-Wolfe-Effekt* erzeugt. Dunkle Materie entkoppelte vor der baryonischen Materie von der Strahlung. So konnten vor der Entkopplung bereits Gebiete mit hoher Dichte dunkler Materie entstehen. Diese Dichtefluktuationen im Plasma des frühen Universums zur Zeit der Rekombination verursachten Temperaturunterschiede im CMB, die noch heute gemessen werden können. Anschaulich kann man sich die Gebiete hoher Dichte als Potentialtöpfe vorstellen. "Fällt" ein Photon in einen solchen Potentialtopf, so gewinnt es an potentieller Energie und wird blauverschoben. Während es sich im Potentialtopf befindet, dehnt sich das Universum weiter aus (\rightarrow dunkel Energie) und die

Tiefe des Potentialtopfes nimmt ab. Das Photon muss daher beim Verlassen des Gravitationspotentials weniger Energie aufwenden, als es beim Hineinfallen gewonnen hat und hat so durch das Durchlaufen des Gravitationspotentials an Energie gewonnen, was im CMB sichtbar ist.

Kleinwinklige intrinsische Anisotropien

Die wichtigsten Anisotropien der kosmischen Hintergrundstrahlung sind die *akustischen Schwingungen*. Vor der Entkopplung möchten sich die Baryonen an den Stellen mit hoher dunkler Materiedichte verdichten. Diesem Verdichten der Baryonen wirkt jedoch der Strahlungsdruck der Photonen entgegen. Er versucht die Baryonen wieder auseinander zu drücken. So kommt es zu einer Schwingung im heißen Plasma, man spricht von akustischen Schwingungen. Anschaulich entspricht der Photonendruck einer Feder, die der Gravitation von zwei Massen entgegenwirkt. Bei der Entkopplung entfällt der Strahlungsdruck und der aktuelle Schwingungszustand der Photonen wird "eingefroren". Gebiete hoher Strahlungsdichte sieht man noch heute als Gebiete mit hoher Strahlungstemperatur. Gebiete mit geringerer Dichte sind heute noch mit einer geringeren Temperatur im CMB beobachtbar.

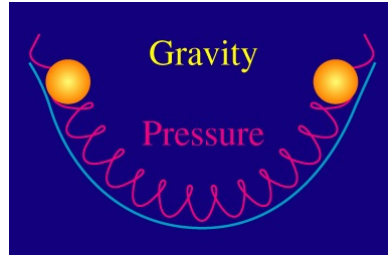


Abbildung 4: Anschauliche Darstellung der akustischen Schwingungen

Die größte Strecke, die die Welle der akustische Schwingung bis zur Entkopplung zurücklegen kann, sozusagen die Grundschwingung, lässt sich aus der Schallgeschwindigkeit im Plasma und der Zeit bis zur Entkopplung berechnen:

$$\lambda_{Grund} = c_{Plasma} t_{Ent} = \frac{c_0}{\sqrt{3}} t_{Ent}$$

Analog zu einer Schallwelle in einer Röhre, gibt es zur Grundschwingung auch die zugehörigen Oberschwingungen. Die Grundschwingung und die erste und zweite Oberschwingung lassen sich als Peaks gut im Leistungsspektrum erkennen. Kennt man die Wellenlänge der Grundschwingung, so lässt sich berechnen, unter welchem Winkel wir diese heute beobachten können. Für die Rechnung nimmt man, dass das Universum flach und damit die Winkelsumme im Dreieck 180° ist.

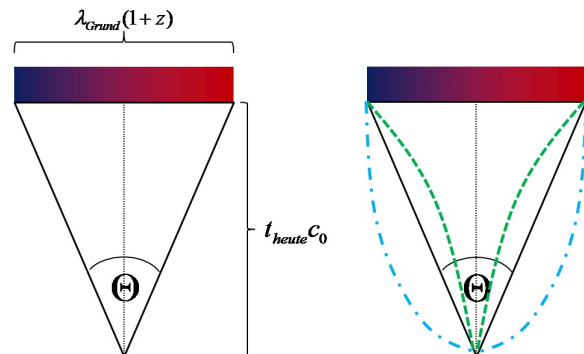


Abbildung 5: Bestimmung des Winkels θ

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\lambda_{Grund}(1+z)}{c_0 t_{heute}} = \frac{t_{Ent}(1100+1)}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot t_{heute}} \rightarrow \theta \approx 1^\circ$$

Vergleicht man diesen berechneten Wert mit dem experimentell bestimmten Wert von $\approx 1^\circ$, so lässt sich daraus schließen, dass das Universum tatsächlich flach ist. Bei einem geschlossenen Universum, würde der Winkel größer erscheinen. Bei einem offenen dagegen kleiner.

Aus der Tatsache, dass das Universum flach ist lässt sich z.B. die Zusammensetzung unseres Universums berechnen. Für den Gesamtdichteparameter gilt:

$$\Omega_{tot} = \Omega_{rad} + \Omega_{\Lambda} + \Omega_M$$

Ω_{rad} beschreibt dabei die Dichte der Strahlung und kann vernachlässigt werden. Mit Ω_M wird die Dichte der baryonischen und die Dichte der dunklen Materie beschrieben. Ω_{Λ} dagegen entspricht der Dichte der dunklen Energie in unserem Universum. Da das Universum flach ist, gilt $\Omega_{tot} = 1$ und die Gleichung lässt sich umformen zu:

$$\Omega_{\Lambda} = 1 - \Omega_M$$

Aus Supernovadaten lässt sich die Expansionsbeschleunigung des Universums berechnen und man erhält den Zusammenhang:

$$\Omega_{\Lambda} \sim a + b \cdot \Omega_M$$

Verknüpft man diese beiden Ergebnisse und trägt beide Geraden in einem $\Omega_{\Lambda}(\Omega_M)$ Diagramm auf, lässt sich die Dichte der dunklen Energie ($\approx 70\%$) und die Dichte der Materie ($\approx 30\%$) sehr genau bestimmen.

Im Leistungsspektrum nimmt die Amplitude der Peaks zu höheren Peaks hin ab. Dies lässt sich durch *Baryon Loading* und die *Silk Dämpfung* erklären.

Was bisher vernachlässigt wurde, ist die Masse der Baryonen und damit ihre Anziehung untereinander. Vernachlässigt man die Masse der Baryonen, so kommt es durch die Gravitation der dunklen Materie und dem Photonendruck zu einer symmetrischen Schwingung um die Nulllage. Erhöht man jedoch die Baryonenzahl im Plasma soweit, dass eine Vernachlässigung ihrer Masse nicht mehr zulässig ist, so wird die Schwingung asymmetrisch. Anschaulich kann man sich vorstellen, dass die Masse der Kugeln erhöht und somit die Schwingung gedämpft wird. Bei der Grundschwingung kommt es nur zu einem Zusammenziehen unter der Gravitation der dunklen Materie. Bevor der Photonendruck das Plasma wieder auseinander drücken kann, kommt es zur Entkopplung. Die erste Oberschwingung dagegen hat eine höhere Schwingungsfrequenz. Bei ihr kommt es

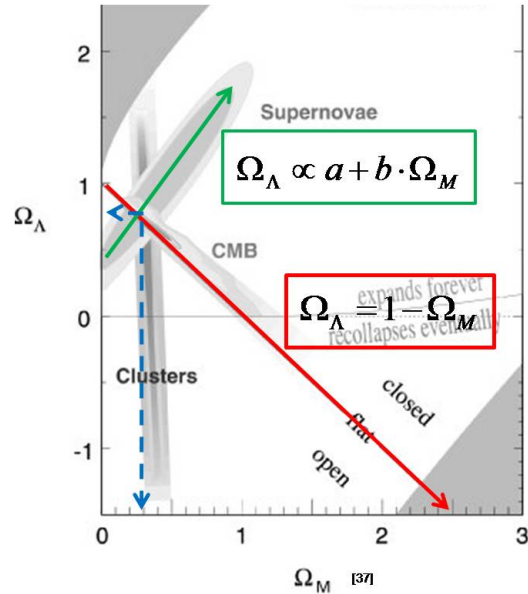


Abbildung 6: Exakte Bestimmung der Dichteverteilung

zur Entkopplung, als der Photonendruck gerade versucht, die Baryonen aus den Gravitationspotentialen der dunklen Materie zu drücken. Dem wirkt jedoch nicht nur die Gravitation der dunklen Materie, sondern auch die Gravitation der Baryonen entgegen. Es kommt zur Dämpfung oder destruktiven Überlagerung und die Temperaturunterschiede sind geringer. Im Leistungsspektrum wird der Betrag des Temperaturunterschieds aufgetragen, sodass ungerade Peaks größer erscheinen als gerade Peaks.

Zusätzlich zum Baryon Loading muss auch die Silk Dämpfung beachtet werden. Da die Entkopplung nicht instantan stattfand, konnten die Photonen während der Zeit der Rekombination noch eine Zufallsbewegung ausführen und so heiße und kalte Gebiete ausgleichen. Dieser Effekt wird vor allem auf kleinen Winkelskalen bemerkbar, da die akustischen Schwingungen in diesem Bereich eine kleine Wellenlänge hatten und die Photonen so nur eine kurze Strecke zurücklegen mussten, um heiße und kalte Bereiche auszugleichen. So beobachtet man auf kleineren Winkelskalen eine exponentielle Dämpfung der Peaks.

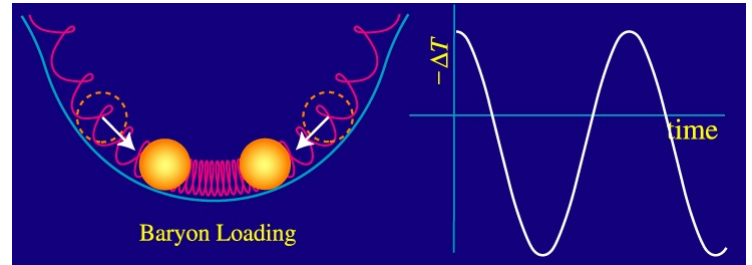


Abbildung 7: Anschauliche Darstellung des Baryon Loading

Messung

Neben erdgebundenen Messungen (z.B. der Cosmic Background Imager (CBI) in Chile) und Ballonexperimenten (z.B. BOOMERanG am Südpol) liefern vor allem Satelliten genaue Daten zur Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung.

1989 startete die NASA den Cosmic Background Explorer (COBE). Dieser konnte zeigen, dass das Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung einem fast perfekten Schwarzkörperspektrum entspricht und die Strahlungstemperatur sehr genau bestimmen ($(2,725 \pm 0,002)K$). An Bord waren das FIRAS Experiment zur genauen Kartierung des CMB und das DMR Experiment zur Vermessung der Anisotropien. Zusätzlich maß COBE mit dem DIRBE Experiment die kosmische Strahlung im Infrarotbereich.

2001 schickte die NASA den Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Satelliten ins All. Dieser konnte mit einer Auflösung von $0,22^\circ$ die Anisotropien der kosmischen Hintergrundstrahlung genauer vermessen als sein Vorgänger COBE. WMAP maß vom Lagrange Punkt L_2 aus. An einem Lagrange Punkt heben sich im mitbewegten Bezugssystem die Gravitations- und Zentripetalkräfte auf einen Körper auf. WMAP führt daher eine zur Erde synchrone Bewegung aus. So hatte WMAP die Erde und die Sonne immer im Rücken und die Messung wurde z.B. nicht durch die Mikrowellenemission der Erde gestört. In einem Zweikörperproblem (hier Sonne und Erde) existieren 5 Lagrange Punkte. Doch nur L_4 und L_5 sind stabil, $L_1 - L_3$ sind labil. Daher musste WMAP immer wieder Kurskorrekturen durchführen, um nicht zu nah an die Erde zu fliegen. Seit 2009 misst der Satellit PLANCK von L_2 aus.

PLANCK wurde 2009 von der ESA gestartet. Seine Auflösung beträgt $0,08^\circ$. Neben dem Mikrowellenbereich misst PLANCK auch Strahlung im Radiowellenbereich.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung

- 1: <http://wmap.gsfc.nasa.gov/media/101080/index.html>
- 2: <https://www.wiki.ed.ac.uk/download/attachments/38634225/image001.gif>
- 3: <http://blogs.discovermagazine.com/cosmicvariance/2006/10/25/reconstructing-inflation/>
- 4: <http://background.uchicago.edu/~whu/intermediate/gravity.html>
- 5: selbst erstellt
- 6: <http://www.jrank.org/space/pages/2301/dark-energy.html>

Quellen

- <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>
- <http://www.esa.int/SPECIALS/Planck/index.html>
- <http://background.uchicago.edu/>
- Uni Karlsruhe, Hauptseminar „Schlüsselexperimente der Elementarteilchenphysik“, 2008, Vortrag von Stefan Braun: „WMAP“
- KIT, Hauptseminar „Der Urknall und seine Teilchen“, 2011, Vortrag von Alexander Bett: „Die Temperaturentwicklung des Universums“
- „Teilchenastrophysik“, H.V. Klapdor-Kleingrothaus und K. Zuber, Teubner Studienbücher, 1997
- „Der Nachhall des Urknalls“, Torsten A. Enßlin, Physik Journal 5 (2006) Nr. 12
- „Der Nachhall des Urknalls“, Gerhard Börner, Physik Journal 4 (2005) Nr. 2
- „Das elegante Universum“, Brian Greene, Goldmann Verlag, 2005
- „Cosmology, The Origin and Evolution of Cosmic Structure“, Peter Coles und Francesco Lucchin, John Wiley & Sons, Ltd. 2002
- Skript „Einführung in die Kosmologie“, Prof. Dr. W. de Boer, Juni 2004