



WESTFÄLISCHE WILHELMUS-UNIVERSITÄT MÜNSTER

Institut für Theoretische Physik

Seminar zur Theorie der Teilchen und Felder

Dozenten: Prof. Dr. G. Münster, Prof. Dr. O. Philipsen, Dr. J. Heitger

SS 2005

## **Beobachtbare Grundlagen der Kosmologie**

vorgestellt von Andreas Hardt

## **Gliederung:**

<b>1 Einführung</b> .....	1
<b>2 Historische Entwicklung der Kosmologie</b> .....	1
2.1 Die ersten Weltbilder .....	1
2.2 Beginn der modernen Kosmologie .....	2
<b>3 Die drei beobachtbaren Grundpfeiler des Standard-Urknall Modells</b> .....	3
3.1 Expansion des Universums (Rotverschiebung) .....	3
3.2 Kosmische Hintergrundstrahlung .....	6
3.2.1 Die Entdeckung der Hintergrundstrahlung .....	6
3.2.2 Die Erklärung der Hintergrundstrahlung nach dem Standardmodell .....	7
3.3 Häufigkeit leichter Elemente .....	8
<b>4 Weitere beobachtbare Grundlagen</b> .....	9
4.1 Alter des Universums .....	9
4.2 Großeräumige Strukturen im Universum .....	10
4.3 Dunkle Materie .....	11
<b>5 Literatur</b> .....	11

# 1 Einführung

Die vorliegende Ausarbeitung zum Thema “Beobachtbare Grundlagen der Kosmologie” soll als Einstieg in das Seminar dienen und zunächst einen groben Überblick über die sichtbaren bzw. messbaren Phänomene in der Kosmologie geben. Die Ausarbeitung hat somit im Wesentlichen experimentellen Charakter und behandelt weniger die recht umfangreichen mathematischen Theorien die dahinter stehen.

Im ersten Kapitel wird ein kurzer Überblick über die Geschichte der Kosmologie gegeben. Der darauf folgende Abschnitt behandelt die drei wesentlichen Beobachtungen, die das Standard-Urknall Modell bestätigen. Im letzten Kapitel werden weitere beobachtbare Grundlagen, wie die Struktur des Universums oder die dunkle Materie, kurz vorgestellt.

## 2 Historische Entwicklung der Kosmologie

Die Kosmologie, d.h. die Wissenschaft über den Ursprung des Universums, einschließlich seiner Entstehung, Entwicklung sowie seiner umfangreichen Struktur, hat die Menschheit seit jeher interessiert. Schon immer versuchte der Mensch die Rätsel des Universums zu lösen, gewisse Regelmäßigkeiten zu erkennen und Ordnung ins scheinbar chaotische Sternenmeer zu bringen. So entstanden im Laufe der Zeit verschiedene Weltbilder.

### 2.1 Die ersten Weltbilder

Die ersten Weltbilder hatten mythischen Charakter, in denen die Himmelsobjekte mit Verstand ausgerüstete göttliche Wesen waren. Erst später wurden rationale Weltbilder entworfen, die auf gesetzesmäßigen Zusammenhängen basierten und in denen die Himmelskörper physikalischer Natur waren.

So wurde, nachdem man im klassischen Altertum die Kugelgestalt der Erde entdeckt hatte, das **geozentrische Weltbild** eingeführt. *Ptolemäus* war der wichtigste Verfechter dieses Weltbilds, so dass auch vom Ptolemäischen Weltbild gesprochen wird. Dabei steht die kugelförmige Erde im Zentrum des Universums. Alle weiteren Himmelskörper umkreisen die Erde in verschiedenen von innen nach außen konzentrisch angeordneten Sphären.

Durch die Arbeiten von *Nikolaus Kopernikus*, *Tycho Brahe* und *Johannes Kepler* wurde das geozentrische Weltbild im 16. Jahrhundert durch das **heliozentrische Weltbild** ersetzt. In diesem bewegt sich die Erde gemeinsam mit den anderen Planeten um die Sonne, die ihrerseits im Mittelpunkt des Weltalls steht.

Zunächst nahm *Nikolaus Kopernikus* an, dass diese Planetenbahnen kreisförmig sind. Nachdem *Tycho Brahe* jedoch die Präzision der Planetenbeobachtung erheblich steigern konnte, erkannte nach dessen Tod sein Schüler *Johannes Kepler* bei der Auswertung der Beobachtungsdaten, dass die Planetenbahnen elliptisch sind. Bereits im Jahre 1609 formulierte Kepler die ersten beiden seiner drei keplerschen Gesetze, welche *Isaac Newton* später als Grundlage zur Herleitung der Gravitationstheorie dienten.

Darin verknüpfte Newton erstmals die Kosmologie mit der Mechanik und er versuchte die Kraft, die “die Planeten an die Sonne heften”, zu ergründen. Im Jahre 1666 zeigte er in seiner berühmten “Mondrechnung”, auf die er angeblich durch einen herabfallenden Apfel gebracht wurde, dass im Sonnensystem wie auf der Erde die selben Gesetze gelten. Zwanzig Jahre später stellte

Newton in seinem Hauptwerk “*Philosophiae naturalis principia mathematica*” seine Gravitationstheorie vor.

An dieser Theorie wurde mehrere Jahrhunderte festgehalten, bis im 20. Jahrhundert *Albert Einsteins* Relativitätstheorie das Wesen der Gravitation und somit die Weltvorstellung revolutionierte. Die Vollendung der **Allgemeinen Relativitätstheorie** im Jahr 1915 gilt als Beginn der modernen Kosmologie.

## 2.2 Beginn der modernen Kosmologie

Die Grundaussage der im Jahre 1905 von Albert Einstein veröffentlichten **speziellen Relativitätstheorie** ist die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als größtmögliche Geschwindigkeit in jedem Inertialsystem. Kein Körper, keine Wirkung und kein Signal kann somit schneller als das Licht sein. Durch diese Vorstellung verlor Newtons Mechanik bei hohen Geschwindigkeiten und starken Gravitationsfeldern an Gültigkeit.

In den nächsten zehn Jahren arbeitete Einstein daran, eine neue Theorie der Gravitation auf der Grundlage der speziellen Relativitätstheorie herzuleiten. Im Jahre 1915 veröffentlichte er das Ergebnis dieser Überlegungen - die **Allgemeine Relativitätstheorie**. Hier ruft nicht eine Kraft die Gravitationswirkung hervor, sondern die Krümmung der Raum-Zeit<sup>1</sup>.

Zu einer der Beobachtungen der Allgemeinen Relativitätstheorie gehört die Lichtablenkung durch die gekrümmte Raum-Zeit. In Abbildung 1 wirkt ein Galaxiehaufen als Gravitationslinse. Das Licht von sehr weit hinter dem Haufen gelegenen Galaxien wird zu dem Galaxiehaufen hin abgelenkt, so dass die eigentlich verdeckten Galaxien als Bogenstücke zu sehen sind.

Eine weitere Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie ist das Äquivalenzprinzip, welches besagt, dass ein homogenes Gravitationsfeld zu einem gleichmäßig beschleunigten Bezugssystem völlig äquivalent ist.

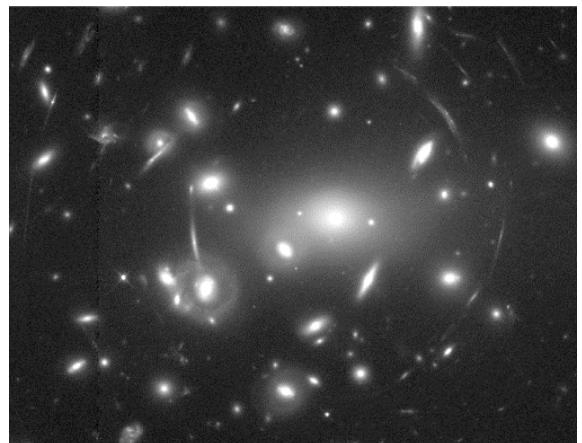


Abb. 1: Gravitationslinse (von: [www.genesisnet.info](http://www.genesisnet.info))

Einstein konnte die mathematisch sehr komplexen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie ohne vereinfachte Annahmen zunächst nicht auf das Universum anwenden und so führte er im Jahr 1917 das **kosmologische Prinzip** ein, welches die einfachste mathematische Behandlung zulässt: Das Universum ist auf der größten Längenskala **homogen** und **isotrop**. Das bedeutet, dass es keinen außergewöhnlichen Ort im Universum gibt, wenn die betrachtete räumliche Umgebung nur groß genug gewählt wird. Mit Hilfe des kosmologischen Prinzips konnte Einstein seine Gleichungen lösen. Da er aber fälschlicherweise annahm, dass das Universum statisch ist, führte er eine kosmologische Konstante ein, die er später wieder verwarf und als seine “größte Eselei” bezeichnete.

---

<sup>1</sup> An dieser Stelle wird auf eine Erklärung des Raum-Zeit Begriffes verzichtet, da in den nächsten Vorträgen noch genauer darauf eingegangen wird.

In den Jahren 1922-24 fand dann der russische Mathematiker *Alexander Friedmann* als Lösung der Einsteinschen Gleichungen seine **Friedmann-Gleichungen**. Diese Gleichungen lassen, anders als Einstein es vermutete, keine stabilen statischen Lösungen zu, so dass sich das Universum entweder ausdehnen oder kontrahieren muss. Beobachtungen zeigten, dass es sich wohl eher um eine Ausdehnung handeln muss (vgl. Kap. 3.1) und so war die Überlegung des Standard-Urknall Modells geboren: Mit zunehmender Größe muss die Dichte des Universums abnehmen. Umgekehrt kann man sagen, dass das Universum in der Vergangenheit kleiner und dichter gewesen sein muss. Aufgrund der hohen Dichte waren die Temperaturen sehr hoch, so dass man sich das Geschehen als einen gewaltigen Feuerball vorstellen kann. Dieser heiße Beginn wird als **Urknall** oder **Big Bang** bezeichnet.

In den folgenden Jahrzehnten wurden verschiedene theoretische Modellvorstellungen des Standard-Urknall Modells entwickelt. Diese wurden im Laufe der Zeit durch zahlreiche Beobachtungen und immer genauere Messmethoden (vgl. Kap. 3) weitestgehend bestätigt, so dass man sagen kann, dass das Standard-Urknall Modell zur Zeit das beste Modell zur Beschreibung des Universums ist. Es wird von der Mehrheit der Astronomen akzeptiert.

Zur Zeit wird jedoch noch eine andere Theorie weiterentwickelt, in der die Materie nicht mit einem großen Urknall, sondern mit einer Folge von mehreren kleineren erschaffen worden ist. Grundlage für diese Theorie ist die Beobachtung eines sich beschleunigt ausbreitenden Universums Ende der 1990er Jahre.

### 3 Die drei beobachtbaren Grundpfeiler des Standard-Urknall Modells

Das Standard-Urknall Modell beruht auf drei experimentellen Säulen: Die Expansion des Universums bzw. die Rotverschiebung, die kosmische Hintergrundstrahlung sowie die Häufigkeit leichter Elemente im Universum.

#### 3.1 Expansion des Universums (Rotverschiebung)

Die Dynamik des Universums, die von den Friedmann-Gleichungen postuliert wird, lässt sich anhand des Lichts ferner Galaxien nachweisen. Dazu benutzt man ein Spektrometer, welches das Licht in seine Spektralfarben zerlegt. Das kontinuierliche Farbspektrum wird darin durch Absorptionslinien unterbrochen.

Schon im Jahr 1813 hatte *Joseph von Fraunhofer* das kontinuierliche Farbspektrum des Sonnenlichts in seine Spektralfarben zerlegt und eine große Anzahl von Absorptionslinien, den Fraunhofer'schen Linien, festgestellt. Diese entstehen durch Absorption der kontinuierlichen Sonnenstrahlung aus der Fotosphäre durch die Sonnenatmosphäre (Chromosphäre).

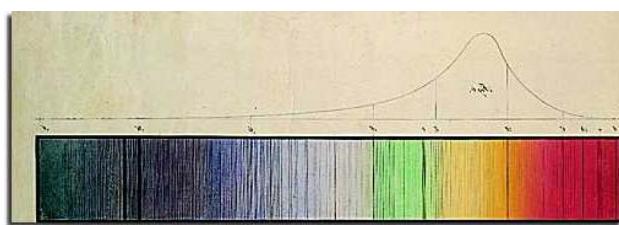


Abb. 2: Zeichnung des Sonnenspektrums von Fraunhofer  
(von: [www.deutsches-museum.de](http://www.deutsches-museum.de))

Fraunhofer leitete mit dieser Untersuchungsmethode eine Serie von Spektraluntersuchungen ein, die für die Astronomie wesentlich werden sollten.

Etwa fünfzig Jahre später (1868) untersuchte *Sir William Huggins* das Lichtspektrum einiger heller Sterne und erkannte, dass die dunklen Absorptionslinien dieser Sterne gegenüber ihrer normalen Lage im Spektrum der Sonne ein wenig ins Rote bzw. Blaue verschoben sind (vgl. Abb. 3).

Er deutete diese Verschiebung zutreffend als eine **Dopplerverschiebung**, bedingt durch die Bewegung des Sternes von der Erde fort oder auf sie zu.

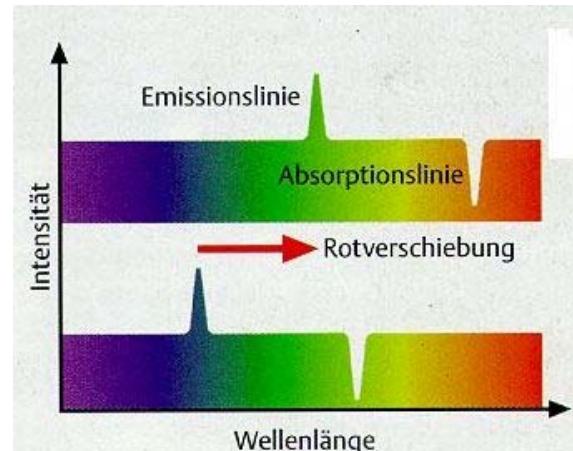


Abb. 3: Verdeutlichung der Rotverschiebung (von: [www.genisisnet.info](http://www.genisisnet.info))

Der Dopplereffekt war im Zusammenhang mit dem Schall bekannt und wurde 1842 nach seinem Entdecker, Johann Christian Doppler benannt: „*Bei jeder Art von Welle tritt eine Änderung der Frequenz ein, sobald sich Beobachter und Wellenerreger relativ zueinander bewegen.*“

Für die Kosmologie wurden die Resultate des Doppler-Effekts aber erst dann wirklich bedeutsam, als die Astronomen begannen, die Spektren von Objekten zu untersuchen, die sehr viel weiter entfernt sind als die (bspw. von Huggins untersuchten) sichtbaren Sterne. Deswegen wurden in den folgenden Jahrzehnten besonders die weit entfernte Milchstraße sowie der Andromedanebel M31 genauer untersucht.

Im Jahr 1912 stellte der amerikanische Astronom *Vesto M. Slipher* fest, dass die Spektrallinien der Andromedagalaxie im Vergleich zu den Linien nahe gelegener Galaxien zu größeren (roten) Wellenlängen hin verschoben sind. Genau wie Huggins deutete Slipher diese Rotverschiebung als (optischen) Doppler-Effekt einer sich entfernenden Lichtquelle, analog zu dem beispielsweise tieferen Sirenengeräusch, welches man hört, wenn es sich von uns entfernt.

Weitere Untersuchungen zeigten, dass auch viele andere Galaxien rotverschoben sind und so wurde schon damals die These geboren, dass sich das Universum in einer Art Explosion befindet, bei der sich jede Galaxie von jeder anderen Galaxie entfernt.

*“Entfernen sich Lichtquelle und Empfänger relativ voneinander mit der Geschwindigkeit  $v$ , so ist die empfangene Wellenlänge  $\lambda_E$  gegenüber der ausgesandten Wellenlänge  $\lambda_s$  rotverschoben.*

Optischer Doppler-Effekt

$$\frac{\lambda_E}{\lambda_s} = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

Mit Hilfe der spektroskopisch ermittelten Dopplerverschiebung war es somit möglich die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien zu ermitteln.

Im Jahr 1923 gelang es dem amerikanischen Astronomen *Edwin Hubble* durch die immer besser gewordenen Teleskope, den Andromedanebel M31 in einzelne Sterne aufzulösen. Verschiedene dieser Sterne waren so genannte pulsierende Sterne, die als Cepheiden bezeichnet werden. Hubble beobachtete die periodischen Helligkeitsschwankungen dieser Cepheiden, die ähnlich der Schwankungen waren, die man bereits aus einer Klasse von Sternen kannte, die sich in unserer Galaxie befinden. Über diesen bekannten Zusammenhang von beobachtbarer Schwankung zu absoluter Helligkeit konnte Hubble auf die Entfernung der Sterne schließen.

In den nächsten Jahren verglich Hubble die von ihm für verschiedene Galaxien geschätzten Entfernungsmethoden mit den von Slipher bestimmten Rotverschiebungen für die jeweiligen Galaxien. Dabei erkannte er, dass zwischen der Fluchtgeschwindigkeit und der Entfernung der Galaxien eine “ungefähr lineare Beziehung” besteht (vgl. Abb. 4). Diesen Zusammenhang veröffentlichte er im Jahr 1929 als das **Gesetz von der Rotverschiebung** (oder: **Hubble-Gesetz**).

*“Je stärker eine Galaxie rotverschoben ist, desto weiter ist sie von der Erde entfernt und desto schneller bewegt sie sich von der Erde fort.*

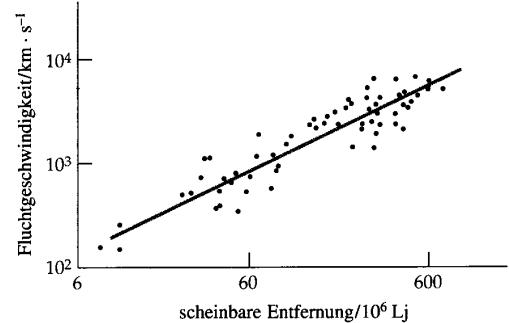


Abb. 4: Hubble-Beziehung (aus: Tipler, S.1470)

### Hubble-Gesetz

$$v = H_0 \cdot r$$

Dabei ist  $H_0$  die Hubble-Konstante, dessen Wert 1931 von Hubble zunächst mit dem Wert 170 Kilometer pro Sekunde je eine Million Lichtjahre angenommen wurde. In den 1970er Jahren wurde der Wert durch neue Entfernungsschätzungen zu den fernen Galaxien auf etwa 15 Kilometer pro Sekunde je eine Million Lichtjahre korrigiert. Obwohl in den folgenden Jahrzehnten viele verschiedene Distanzmessungen im Universum durchgeführt worden sind, ist es bis heute immer noch nicht möglich einen eindeutigen Wert für die Hubble-Konstante zu erhalten. 1996 nahm man einen Wert von 23 Kilometer pro Sekunde je eine Million Lichtjahre an.

Abbildung 5 zeigt einige Beispiele rotverschobener Spektren. Die Verschiebung wird durch den Pfeil am Beispiel der H- und K-Linien angedeutet. Zusätzlich sind die Fluchtgeschwindigkeiten und Entfernungen angegeben (Berechnung mit einem Wert von  $H_0 = 27,9 \text{ km/s je } 10^6 \text{ Lj.}$ ).

Neben der Interpretation der Rotverschiebung mit Hilfe des Doppler-Effekts, gibt es noch eine weitere Erklärung des Phänomens. Der Doppler-Effekt ist nämlich eigentlich nur dann gültig, wenn die Gravitation von Massen nicht berücksichtigt wird. Da das Universum aber eine gewaltige Ansammlung von Massen ist, wird die sog. **kosmologische Rotverschiebung** als weitere Erklärung für die rotverschobenen Spektren herangezogen. Die kosmologische Rotverschiebung besagt, dass sich das Licht, welches zu einem gewissen Zeitpunkt von einer Galaxie emittiert wurde, mit der Expansion des Universums gedehnt hat. Die Wellenlänge hat sich also durch die Ausdehnung des Universums mit vergrößert und ist somit ins Rote verschoben.

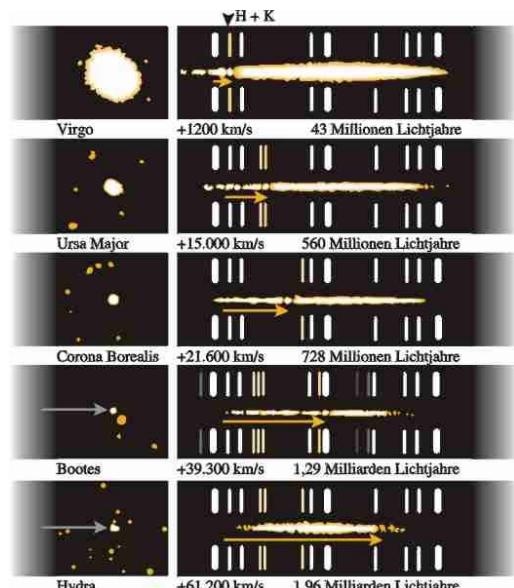


Abb. 5: Beispiele rotverschobener Spektren (von: [www.genisisnet.info](http://www.genisisnet.info))

Abschließend lässt sich sagen, dass die Rotverschiebung ein sehr überzeugendes Argument für die Ausdehnung unseres Universums ist. Die Beobachtung bestätigt somit das Standard-Urknall Modell. Die Deutung der Rotverschiebung als Doppler-Effekt ist allerdings nur für nicht zu weit entfernte Galaxien sinnvoll. Da das Hubble-Gesetz eine Näherung ist, die aus dem Doppler-Effekt folgt, ist dieses Gesetz auch nur in unserer kosmischen Umgebung sinnvoll. Für sehr weit entfernte Galaxien gilt die lineare Beziehung des Hubble-Gesetzes nicht mehr.

## 3.2 Kosmische Hintergrundstrahlung

### 3.2.1 Die Entdeckung der Hintergrundstrahlung

Nachdem Edwin Hubble mit seinem Gesetz zur Rotverschiebung zeigen konnte, dass sich das Universum tatsächlich ausdehnt, wurden in den folgenden Jahren verschiedene Theorien zu den Vorgängen während und kurz nach dem Urknall aufgestellt.

Der Amerikaner *George Gamow* und seine Mitarbeiter nahmen an, dass der urzeitliche Feuerball einen Strahlungshintergrund verursacht haben muss, der sich bei der Expansion des Universums langsam abgekühlt hat. 1948 schätzten Gamow und seine Mitarbeiter die derzeitige Temperatur dieser Strahlung auf 5 K. Sie konnten ihre Vermutung jedoch experimentell nicht belegen.

Die Entdeckung der Hintergrundstrahlung gelang erst etwa zwanzig Jahre später im Jahr 1964. In diesem Jahr wollten die beiden amerikanischen Radioastronomen *Arno A. Penzias* und *Robert W. Wilson* für die “Bell Telephone Company” die Intensität der Radiowellen messen, die aus unserer Galaxie stammen. Die Schwierigkeit bei einer solchen Messung bestand darin, das eigentliche Radiorauschen vom elektrischen Rauschen, hervorgerufen durch die thermischen Bewegungen in der Antenne und der Verstärkeranlage, zu unterscheiden. Wilson und Penzias gingen davon aus, dass der Antennenbau ein sehr schwaches elektrisches Rauschen erzeugen würde. Um diese Annahme zu überprüfen, begannen sie mit ihren Messungen bei der relativ kurzen Wellenlänge von 7,35 cm, bei der eigentlich kein Radiorauschen aus unserer Galaxie zu erwarten war. Sie wollten so im Prinzip zunächst einmal den Fehler quantifizieren um diesen später, bei Messungen auf größeren Wellenlängen, wieder abzuziehen.

Zu ihrer Überraschung stellten Penzias und Wilson bei der Messung bei der Wellenlänge 7,35 cm jedoch ein beachtliches Rauschen fest. Dieses war sowohl von der Richtung, als auch von der Tages-/Jahreszeit unabhängig. Die Tatsache, dass das beobachtete Hintergrundrauschen keinen Zusammenhang mit der Richtung aufwies, ließ die beiden Radioastronomen vermuten, dass diese Radiowellen nicht aus unserer Galaxie, sondern aus einem sehr großen Abschnitt des Universums stammen.

Penzias und Wilson drückten die auf der gemessenen Wellenlänge beobachtete Intensität des Rauschens durch eine “Äquivalent-Temperatur<sup>2</sup>” aus und erhielten einen Wert von 3,5 K. Sie nahmen an, dass der Mikrowellenhintergrund **homogen** und **isotrop** über das gesamte Universum verteilt ist.

Um diese Annahme zu bestätigen und um die Frequenzverteilung und Temperatur möglichst genau bestimmen zu können, wurde der Mikrowellenhintergrund in den folgenden Jahrzehnten immer wieder gemessen. Da die Erdatmosphäre für den entscheidenden Wellenlängenbereich der Strahlung nicht durchsichtig ist, wurden die Messungen zunächst mit Ballonen, später mit Raketen und Satelliten durchgeführt. Die NASA schickte 1989 den Satelliten **COBE** (Cosmic Background Explorer) und im Jahr 2001 den Satelliten **WMAP** (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) ins All. Die durchgeföhrten Messungen zeigten eine praktisch perfekte Schwarzkörperstrahlung des Mikrowellenhintergrundes mit einer Temperatur von 2,725 K. Der Satellit COBE zeigte im Jahr 1992 auch zum ersten Mal kleine Temperaturfluktuationen der Hintergrundstrahlung, die für die Strukturbildung des Universums (vgl. Kap. 4.2) vorhergesagt

---

<sup>2</sup> Jeder Körper, der eine Temperatur über dem absoluten Nullpunkt besitzt, gibt Photonen ab. Je heißer der Körper ist, desto intensiver ist die Photonenstrahlung. Die Frequenz der Photonen ist höher, die Wellenlänge dementsprechend kürzer. So kann man einer bestimmten Intensität eine äquivalente Temperatur zuweisen.

wurden. Der Satellit WMAP konnte die räumliche Auflösung der Fluktuationen des Mikrowellenhintergrundes weiter verbessern (siehe Abb. 6).

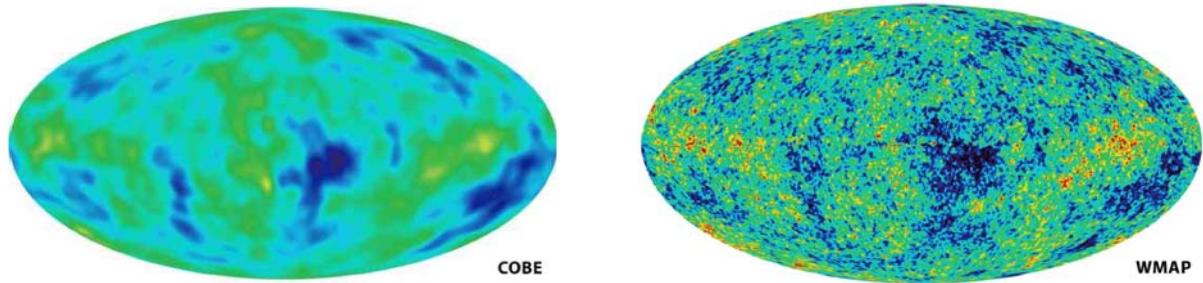


Abb. 6: Vergleich der COBE und WMAP Daten (von: <http://map.gsfc.nasa.gov>)

### 3.2.2 Die Erklärung der Hintergrundstrahlung nach dem Standardmodell

Nach dem Standardmodell besaß das Universum zu Beginn eine hohe Materiedichte gekoppelt mit einer sehr hohen Temperatur. Zu dieser Zeit waren die Atome in ihre Kerne und Elektronen aufgelöst und die ständige Streuung von Photonen an freien Elektronen hielt ein thermisches Gleichgewicht zwischen Strahlung und Materie aufrecht. Zu dieser Zeit war das Universum aufgrund der Streuung nicht durchsichtig. Als sich das Universum mit der Zeit ausdehnte, kühlte es sich auch entsprechend ab und die Vielseitigkeit der Wechselwirkungen zwischen den Elementarteilchen und der Strahlung nahm langsam ab. Immer mehr Teilchen entkoppelten sich aus dem Gleichgewicht mit der Strahlung, so dass letztlich nur noch Protonen, Neutronen und Elektronen im Gleichgewicht mit der Strahlung waren. Die freien Elektronen wirkten weiter als Streuzentren für die Strahlung, d.h. sie absorbierten die Strahlung und emittierten sie anschließend wieder, so dass diese die typische Frequenzverteilung eines schwarzen Körpers annahm (siehe Abb. 7). Das Universum kühlte sich weiter ab und erreichte schließlich eine Temperatur (etwa 3000 K), die so kühl war, dass sich die freien Elektronen mit den anwesenden freien Protonen zusammenschlossen und Wasserstoff-Atome bildeten. Das plötzliche Verschwinden der freien Elektronen zerriß den thermischen Zusammenhang zwischen Strahlung und Materie, woraufhin die Strahlung sich ungehindert ausbreitete. Nach diesem "Entkopplungs-Vorgang" dehnte sich das Universum weiter aus und die Strahlung kühlte weiter ab, so dass wir heute eine Temperatur von 2,725 K messen. Wie schon erwähnt bestätigte der Satellit COBE im Jahr 1992 den Schwarzkörper-Charakter der Hintergrundstrahlung (siehe Abb. 8).

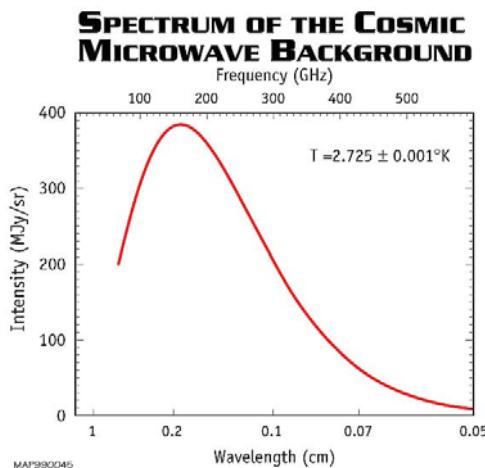


Abb. 7: Theoretische Frequenzverteilung eines schwarzen Körpers (von: [www.genisisnet.info](http://www.genisisnet.info))

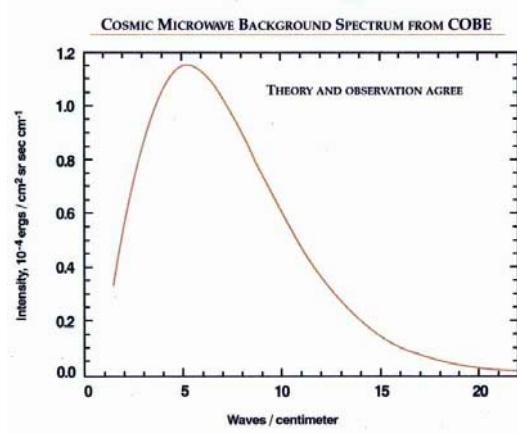


Abb. 8: Gemessene Frequenzverteilung (durch COBE & WMAP) des Mikrowellenhintergrundes (von: <http://map.gsfc.nasa.gov>)

### 3.3 Häufigkeit leichter Elemente

Eine weitere astrophysikalische Beobachtung, die neben der Rotverschiebung und der kosmischen Hintergrundstrahlung den dritten Grundpfeiler des Standardmodells bildet, ist die Häufigkeit leichter Elemente im Universum. So ist der Massenanteil von gewöhnlichem Helium ( ${}^4\text{He}$ ) im Universum viel höher als der Massenanteil aller anderen Elemente (außer Wasserstoff). Ähnliche Überschüsse, wenn auch in geringerem Ausmaß, gibt es auch von anderen leichten Elementen wie D (Deuterium),  ${}^3\text{He}$  (Helium-drei) und  ${}^7\text{Li}$  (Lithium).

Man geht heute davon aus, dass die chemischen Elemente in Sternen durch Fusionsprozesse gewonnen werden. Nun ist der relative Heliumgehalt des Universums jedoch zu hoch, um innerhalb von 10 Milliarden Jahren in Sternen fusioniert worden zu sein. Helium kann demnach zum größten Teil nicht durch Fusion in den Sternen entstanden sein, sondern muss überwiegend in der Urknallphase entstanden sein. Die Phase der Bildung dieser leichten Elemente während des Urknalls wird als **primordiale Nukleosynthese** bezeichnet. Die Temperaturen waren in dieser Phase (etwa 100 bis 1000 Sekunden nach dem Urknall) so hoch, dass Neutronen und Protonen zu Helium und Deuterium fusionieren konnten. Somit wurden die relativen Häufigkeiten der Elemente in den ersten 3 Minuten, d.h. vor der Bildung der ersten Sterne festgelegt.

Abbildung 9 zeigt das sich ändernde Verhältnis von Neutronen zu Protonen während der Kernsynthese. Dabei ist der Anteil der Neutronen an der Gesamtzahl der Kernteilchen als eine Funktion der Temperatur und der Zeit dargestellt. Anhand der Kurve lässt sich der gewichtsmäßige Anteil des kosmologisch erzeugten Heliums abschätzen: Er ist für jeden Temperaturwert und für den Zeitpunkt der Kernsynthese genau doppelt so hoch wie der Neutronenanteil zu diesem Zeitpunkt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der gewichtsmäßige Anteil des Heliums genau dem Anteil sämtlicher Kernteilchen die im Helium gebunden sind entspricht. Da diese Kernteilchen zur Hälfte aus Neutronen bestehen und praktisch alle Neutronen im Helium gebunden sind, ist der gewichtsmäßige Anteil des Heliums einfach doppelt so hoch wie der Anteil der Neutronen an den Kernteilchen.

Die erste Berechnung der kosmischen Heliumerzeugung wurde im Jahr 1965, kurz nach der Entdeckung des Mikrowellenhintergrundes, von *P.J.E. Peebles* in Princeton durchgeführt. Peebles kam zu dem Ergebnis, dass das Material, aus dem die Sterne ursprünglich entstanden sein müssen, zu 22 - 28 % aus Helium und fast der ganze Rest aus Wasserstoff bestand. Unabhängig dazu gelangten *Fred Hoyle* und seine Mitarbeiter durch weitere Berechnungen zu einem ähnlichen Ergebnis. Für das Standardmodell war dieses Ergebniss ein großer Erfolg, da es schon lange Zeit Schätzungen gab, nach denen die Sonne und andere Sterne zu Beginn ihrer Existenz überwiegend aus Wasserstoff und zu etwa 20 - 30 % aus Helium bestanden. Diese Schätzungen beruhten unter anderem auf der direkten Beobachtung der Heliumlinien in den Spektren heißer Sterne.

In den 1960er Jahren gaben weitere Beobachtungen zudem Aufschluss über die räumliche Verteilung von Helium im Universum. Es stellte sich heraus, dass die räumliche Verteilung des Heliums nicht annähernd so schwankt wie die Verteilung von schwereren Elementen. Diese Beobachtung bestätigte die Theorie, dass die schweren Elemente in den Sternen, das Helium dagegen im frühen Universum erzeugt wurde. Auch die kosmische Häufigkeit des Deuteriums wurde in den folgenden Jahren genauer untersucht. 1973 führte beispielsweise der Erdsatellit "Copernicus" Ultraviolett-Beobachtungen an dem heißen Stern  $\beta$ -Centauri durch. Weitere Untersuchungen der ultravioletten Absorptionslinien in den Spektren anderer Sterne folgten.

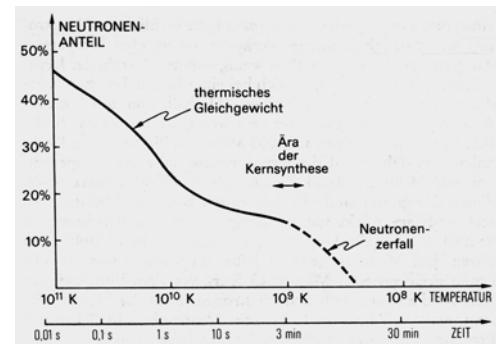


Abb. 9: Verhältnis von Neutronen zu Protonen (aus: Weinberg, S. 122)

## 4 Weitere beobachtbare Grundlagen

Neben den oben beschriebenen drei Hauptbeobachtungsrichtungen zur Überprüfung des Standardmodells, gibt es noch eine Vielzahl von weiteren Beobachtungen in der Kosmologie, von denen die drei wichtigsten im Folgenden kurz vorgestellt werden.

### 4.1 Alter des Universums

Es gibt verschiedene Möglichkeiten das Alter des Universums zu bestimmen. Eine Möglichkeit ist die Berechnung der “**charakteristischen Expansionszeit**” oder “**Hubble-Zeit**”. Sie ist nichts anderes als der Kehrwert der Hubble-Konstanten. Denn wenn die Geschwindigkeit der seit dem Urknall auseinanderfliegenden Galaxien konstant war, dann entspricht die Zeit die nötig war, damit ein Paar von Galaxien den gegenwärtigen Abstand voneinander erreichte, genau der derzeitigen Entfernung, geteilt durch ihre relative Geschwindigkeit.

$$v = H_0 \cdot r \quad \rightarrow \quad H_0 = \frac{v}{r} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{H_0} = \frac{300.000 \cdot 10^6 J}{23 km/s} = 1,3 \cdot 10^{10} \text{ Jahre}$$

Bei einer Hubble-Konstanten von 23 km/s je  $10^6$  Lichtjahre käme man somit auf ein Alter des Universums von 13 Milliarden Jahren. Dieser Wert trifft aber nur bei konstanter Geschwindigkeit der Galaxien zu. Berücksichtigt man die Abbremsung der Galaxien durch ihre gegenseitige Anziehung muss man folgende Formel zur Berechnung der Hubble-Zeit anwenden.

$$H_0 = z + \frac{1}{2}(1 - q_0) \cdot z^2 + \dots \quad (z = \text{Rotverschiebung}; q_0 = \text{Abbrems-Parameter der Expansion})$$

Eine weitere Methode zur Bestimmung des Alters des Universums ist die Untersuchung von sog. **Kugelsternhaufen**. Diese umgeben unsere Milchstraße nahezu sphärisch und zählen zu den ältesten Objekten im Universum. Bei ihrer Entstehung sind Sterne der unterschiedlichsten Massen und damit auch Lebensdauer gleichzeitig entstanden. Sterne mit hoher Masse entwickeln sich jedoch schneller von der Hauptreihe weg als Sterne mit geringerer Masse. Trägt man die Sterne eines Kugelsternhaufens in ein Hertzsprung-Russel-Diagramm ein, so erkennt man ein Abknicken der Hauptreihe. Die Position des Abknickpunktes lässt auf das Alter des Sternhaufens zurücksließen. Zahlreiche Untersuchungen dieser Art lassen auf ein Alter von 13 bis 19 Milliarden schließen.

Eine weitere wichtige Bestimmungsmethode des Alters des Universums ist die Untersuchung über den **radioaktiven Zerfall**. Man benutzt dazu radioaktive Isotope mit Halbwertszeiten von mehreren Milliarden Jahren (Thorium, Uran, Rubidium, Rhenium...). Mit dieser Methode wurde erstmals ein Alter im Bereich um 20 Milliarden Jahren bestimmt. Auch das durch die Untersuchung sehr metallarmer Sterne sowie das aus dem Auskühlen weißer Zwerge ermittelte Alter liegt im Bereich von 15 - 20 Milliarden Jahren.

Alle Messmethoden deuten somit auf ein Alter des Universums hin, das zwischen 15 und 20 Milliarden Jahren liegt.

## 4.2 Großräumige Strukturen im Universum

Schon in den 1930er Jahren untersuchte man die Verteilung der Galaxien am Himmel. *Shapley* und *Ames* führten Rotverschiebungsmessungen bei allen Galaxien durch und erstellten einen ersten Katalog der Galaxieverteilung. Sie erkannten, dass die Verteilung der Galaxien nicht homogen ist, sondern sich die Galaxien meist in Haufen gruppieren. In den folgenden Jahrzehnten wurde die Galaxieverteilung weiter untersucht, so dass es heute mehrere große Kataloge von Galaxien und Galaxiehaufen gibt (z.B. der Abell-Katalog, Zwicky-Katalog...). Abbildung 10 zeigt die Verteilung der Galaxien am Himmel.

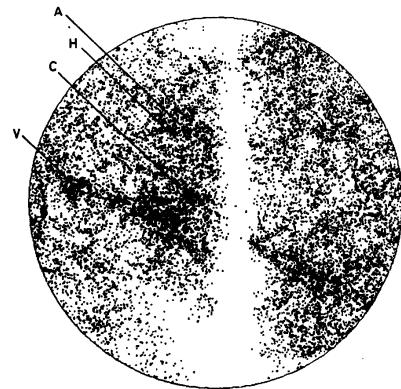


Abb. 10: Verteilung der Galaxien (aus: Kolb & Turner, S. 24)

Die Galaxien selber treten in einer Vielzahl von Formen, Massen und Größen auf. Eine einfache Einteilung ist das Hubble-Klassifikationsschema, das zwischen 4 Haupttypen unterscheidet (Elliptische-, Linsen-, Spiral- und Irreguläre Galaxien). Bei den Galaxiehaufen unterscheidet man zwei Arten - reguläre und irreguläre. Erstere sind meist symmetrisch aufgebaut und besitzen eine deutliche Konzentration der Galaxien im Zentrum. Irreguläre Haufen sind eher asymmetrisch und lassen sich meist noch in mehrere kleine Unterhaufen aufteilen.

Ein neueres Projekt, einen im Gegensatz zu den älteren Katalogen wirklich dreidimensionalen Katalog zu erstellen, geht zur Zeit vom Harvard-Smithsonian-Institut für Astrophysik (CfA) aus. Um dieses realistische dreidimensionale Bild der Verteilung der Galaxien zu bekommen, ist es nötig, drei Koordinaten zu messen. Die sog. Rektaszension  $\alpha$  sowie die Deklination  $\beta$  (Längen- bzw. Breitengrade, eingeteilt in 24 Stunden) geben die Position der Galaxie am Himmel an, während die Rotverschiebung die Tiefe angibt. Das Projekt der CfA misst auf diese Weise die Rotverschiebung und Positionen von mehr als 14.000 Galaxien. Eines der bereits fertiggestellten Gebiete liegt im Deklinationsbereich von  $8,5^\circ$  bis  $44,5^\circ$  und ist in Abbildung 11 dargestellt.

Abbildung 12 zeigt einen Auszug aus der sog. 2dF Galaxien Rotverschiebungskarte. Es handelt sich dabei um eine detaillierte Untersuchung von über 60.000 Galaxiestandorten. Unsere Milchstraße befindet sich in der Abbildung zwischen den beiden Keilen.

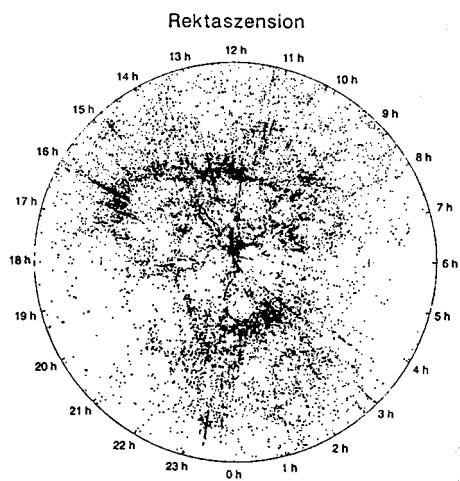


Abb. 11: Galaxieverteilung im nahen Universum (aus: Klapdor-K., S. 184)

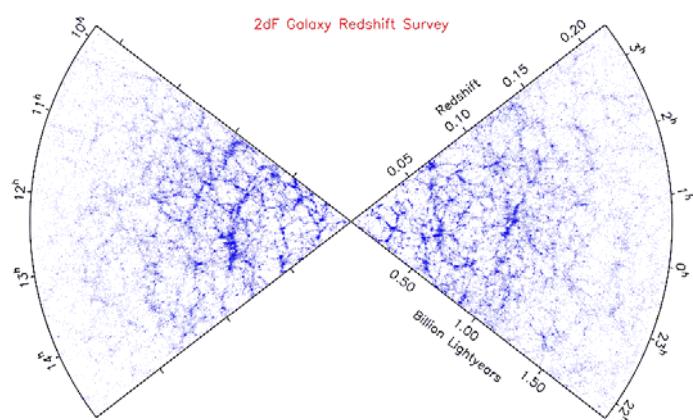


Abb. 12: Auszug aus der 2dF Galaxien Rotverschiebungskarte (von: [www.genisisnet.info](http://www.genisisnet.info))

### 4.3 Dunkle Materie

Wie in Kapitel 3.2.1 schon kurz angedeutet wurde, muss die Materie im Universum schon zur Zeit der Entkopplung von Strahlung und Materie gewisse Unregelmäßigkeiten besessen haben, damit sich Strukturen wie Galaxien und Galaxiehaufen bilden konnten. Diese Unregelmäßigkeiten, die sich heute noch in der Temperaturverteilung des Mikrowellenhintergrundes niederschlagen müssten, konnte man mit Hilfe der Satelliten COBE und WMAP nachweisen. Allerdings betragen die relativen Temperaturschwankungen nur etwa 1/100.000 K und sind somit viel geringer als ursprünglich erwartet. Allein die Temperaturunterschiede können also nicht für die Strukturbildung im Universum verantwortlich sein. Man versucht sich dieses Problem nun mit dem Vorhandensein von dunkler Materie zu erklären. Es setzt sich heute die Erkenntnis durch, dass es wesentlich mehr gravitativ wechselwirkende als leuchtend Materie zu geben scheint.

Bereits in den 1930er Jahren wurden erste Beobachtungen gemacht, dass die Masse von Galaxiehaufen zu gering ist, um diese durch Gravitation zusammenzuhalten. Der Astronom Fritz Zwicky nahm an, dass der Coma-Galaxiehaufen ein stabiles Gravitationssystem ist. Aus dieser Annahme berechnete er eine Masse des Coma-Haufens, die etwa zehn mal größer war als die bisherigen Schätzungen. Dies war ein erster Hinweis auf die Existenz von Materie, die nicht sichtbar ist. Im Laufe der Zeit wurden noch weitere Hinweise auf diese mysteriöse Art von Materie gefunden wie beispielsweise das seltsame Rotationsverhalten von **Spiralgalaxien**.

Spiralgalaxien sind Gebilde von Milliarden Sternen, die in der Form einer rotierenden Scheibe mit einer zentralen Verdichtung angeordnet sind. Nimmt man eine Kreisbahn der Sterne um das verdichtete Zentrum an, so lassen sich die Rotationsgeschwindigkeiten der einzelnen Sterne aus der Gleichheit von Gravitation und Zentrifugalkraft berechnen. Nach den Newtonschen Gravitationsgesetzen würde man erwarten, dass die Rotationsgeschwindigkeiten nach außen hin abnehmen. Misst man aber nun die Rotationskurven von Spiralgalaxien mit Hilfe der Doppler-verschiebung, so stellt man fest, dass die Umlaufgeschwindigkeit nicht abnimmt, sondern etwa gleich groß bleibt ( $v = \text{konstant}$ ). Dies bedeutet, dass weit vom Zentrum entfernte Objekte sich schneller bewegen als es die vorhandene Gravitationskraft zulässt. Diese Tatsache führte zu der Hypothese, dass dunkle Materie die Galaxie kugelförmig umgibt. Diese die Galaxie umgebende Kugel wird **Halo** genannt und es wurden bei jüngsten Untersuchungen an der Spiralgalaxie NGC 5907 starke Hinweise auf die Existenz eines dunklen Halos<sup>3</sup> gefunden.

## 5 Literatur

- KOLB, E.W. & M.S. TURNER: *The Early Universe*, Addison Wesley, 1991  
KLAPDOR-KLEINGROTHAUS, H.V. & K. ZUBER: *Teilchenastrophysik*, Teubner, 1997  
METZLER, J.B.: *Physik*.  
WEINBERG, S.: *Die ersten drei Minuten. Der Ursprung des Universums*, Pieper Verlag, 1997  
TIPLER, P.A: *Physik*, Spektrum Verlag, 1994

[www.genisisnet.info](http://www.genisisnet.info)

[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

<http://home.t-online.de/home/astrovi/Geschichte2.PDF>

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

---

<sup>3</sup> Auf weitere Gründe für die Annahme dunkler Halos sowie auf weitere Beweise für die Existenz dunkler Materie soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden (siehe dazu: Klapdor-Kleingrothaus Kap. 9)