



Westfälische Wilhelms – Universität Münster
Institut für Theoretische Physik
Seminar zur Theorie der Teilchen und Felder
Semesterthema: Kosmologie und Teilchenphysik

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

WS 06/07

Beobachtbare Grundlagen der Kosmologie

Patricia Thomasen

Inhaltsverzeichnis	2
<u>I. EINLEITUNG.....</u>	<u>2</u>
<u>II. VON PTOLEMÄUS BIS EINSTEIN: DIE ENTSTEHUNG DER MODERNEN KOSMOLOGIE.....</u>	<u>3</u>
<u>1. DIE WELTBILDER.....</u>	<u>3</u>
<u>2. DIE MODERNE KOSMOLOGIE.....</u>	<u>3</u>
<u>III. DAS STANDARD – URKNALL – MODELL.....</u>	<u>4</u>
<u>1. DIE ROTVERSCHIEBUNG.....</u>	<u>4</u>
<u>2. RELATIVE HÄUFIGKEIT LEICHTER ELEMENTE.....</u>	<u>6</u>
<u>3. DIE KOSMISCHE HINTERGRUNDSTRAHLUNG.....</u>	<u>6</u>
<u>IV. ANDERE BEOBACHTUNGEN DER KOSMOLOGIE.....</u>	<u>8</u>
<u>1. STRUKTURBILDUNG IM UNIVERSUM.....</u>	<u>8</u>
<u>2. ALTER DES UNIVERSUMS.....</u>	<u>9</u>
<u>3. DUNKLE MATERIE.....</u>	<u>10</u>
<u>V. ZUSAMMENFASSUNG.....</u>	<u>10</u>
<u>LITERATUR</u>	<u>11</u>
<u>ABBILDUNGSNACHWEIS.....</u>	<u>11</u>

I. Einleitung

Das Seminar zur Theorie der Teilchen und Felder beschäftigt sich in diesem Semester mit dem Thema „Kosmologie und Teilchenphysik“. Diese Ausarbeitung soll einen kurzen Überblick über die „Beobachtbaren Grundlagen der Kosmologie“ geben. Dabei handelt es sich hauptsächlich um experimentelle Beobachtungen, durch die ein erster Zugang zum Thema ermöglicht werden soll.

Zunächst wird ein kleiner geschichtlicher Abriss über die Entstehung der Kosmologie von den ersten Weltbildern bis hin zur Allgemeinen Relativitätstheorie (im folgenden ART genannt) erfolgen. Daran schließt sich die Behandlung des Standard – Urknall – Modells mit seinen drei grundlegenden Beobachtungen an. Schließlich werden noch andere Beobachtungen, die im Rahmen der Kosmologie gemacht wurden, kurz beschrieben.

II. Von Ptolemäus bis Einstein: Die Entstehung der modernen Kosmologie

Die Kosmologie ist die Wissenschaft über den Ursprung des Universums. Da der Mensch schon immer mehr von seiner Umwelt verstehen wollte, setzte er alles miteinander in Beziehung, um das Große Ganze erklärbar zu machen. Nachdem man sich in grauer Vorzeit darüber einig war, dass es sich bei der Erde nicht um eine Scheibe handelt, kam die Vorstellung von sog. Weltbildern auf.

1. Die Weltbilder

Zunächst entstand das ptolemäische oder auch geozentrische Weltbild. Darin steht die Erde im Mittelpunkt des Universums und alle anderen Planeten und auch die Sonne umrunden sie auf perfekten Kreisbahnen. Dieses Weltbild kam zuerst im antiken Griechenland auf und wurde noch teilweise bis zum Ende des Mittelalters in Europa und auch in Asien (speziell China) als gängige Lehrmeinung anerkannt.

Erst nachdem Kopernikus, Newton und andere namhafte Astronomen jener Zeit weitergehende Beobachtungen und Berechnungen an den Himmelskörpern durchführten, wurde klar, dass das geozentrische Weltbild falsch war. Es wurde vom heliozentrischen Weltbild abgelöst, bei dem die Sonne im Zentrum des Kosmos steht und die Planeten sie auf elliptischen Bahnen umkreisen.

Beide Weltbilder stellten den für ihre Zeit modernsten Gedanken zum Universum dar. Dennoch handelte es sich bei beiden nur um Versuche, aus den damals bekannten Daten ein logisches und vor allem anschauliches Bild des Kosmos zu erstellen. Erst schrittweise kam die Erkenntnis, dass auch das heliozentrische Weltbild nicht korrekt war. Trotzdem setzte sich erst im 20. Jahrhundert durch, dass die Sonne ein Stern unter vielen ist. Als Einstein zu Beginn des letzten Jahrhunderts seine ART veröffentlichte, ebnete er damit den Weg für die moderne Kosmologie.

2. Die moderne Kosmologie

Als Einstein 1915 seine ART veröffentlicht, legte er damit den Grundstein für die moderne Kosmologie. Er legte in seiner Theorie die Lichtgeschwindigkeit c als größtmögliche Geschwindigkeit fest. Dadurch verlor Newtons Mechanik bei großen Geschwindigkeiten und starken Gravitationsfeldern seine Gültigkeit, denn nichts ist schneller als das Licht. Zur ART gehört die Ablenkung des Lichts durch die Krümmung der Raum – Zeit. Als Beispiel hierfür werden häufig Gravitationslinsen angeführt.

Eine Gravitationslinse ist ein massereiches astronomisches Objekt, das mit seiner Gravitation das Licht hinter ihm liegender Objekte ablenken kann. Interstellare Objekte mit einer sehr großen Masse lenken elektromagnetische Wellen in eine andere Richtung. Dementsprechend wird das Abbild des Hintergrundobjektes verlagert, verzerrt oder vervielfacht sichtbar (vgl. Abbildung 1).

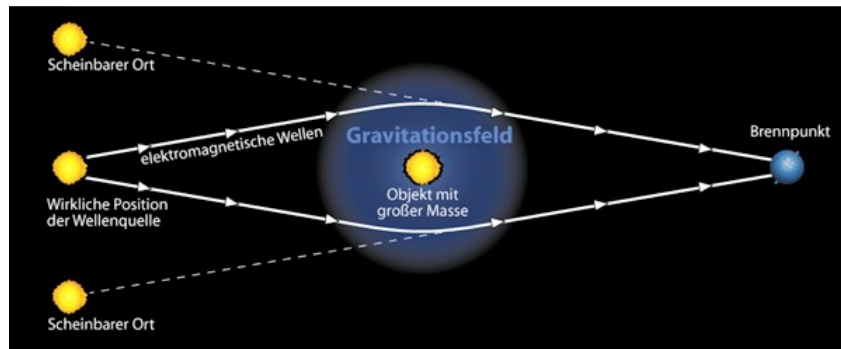


Abbildung 1: Wirkung einer Gravitationslinse

Das zweite Fundament der ART ist das Äquivalenzprinzip. Es sagt aus, dass ein homogenes Schwerfeld mit einem gleichmäßig beschleunigten Bezugssystem übereinstimmt. 1917 stellte Einstein sein kosmologische Prinzip vor, mit dem eine „einfache“ mathematische Behandlung des Weltalls möglich wurde. Dieses Prinzip beruht auf der Annahme, dass das Universum auf seiner größtmöglichen Längenskala homogen und isotrop sei. Mit anderen Worten: egal, von welchem Standpunkt aus man das Universum betrachtet, es stellt sich immer gleich dar. Ohne diese Voraussetzungen waren die Einsteinschen Gleichungen nicht lösbar. Allerdings war diese Annahme falsch, da Einstein davon ausging, dass es sich bei dem Universum um ein statisches Gebilde handle. Als er seinen Fehler erkannte, nannte er die kosmologische Konstante Λ , die er im Zusammenhang mit dem kosmologischen Prinzip eingeführt hatte, den „größten Fehler meines Lebens“.

Zu Beginn der 20er Jahren des letzten Jahrhunderts gelang es dann dem russischen Mathematiker Friedmann, Einsteins Gleichungen zu lösen. Mittels dieser Friedmann-Gleichungen waren nur dynamische Lösungen möglich, woraus man schloss, dass sich das Universum entweder ausdehnen oder kontrahieren muss. Eine Ausdehnung erschien aufgrund verschiedener Beobachtungen eher wahrscheinlich. So entstand die Urknall – Theorie. Wenn sich das Universum weiter ausdehnt, so muss es in der Vorzeit ein kleineres Volumen gehabt haben. Auf diesem kleinen Volumen wirkten Materie und Strahlung eng zusammen, was auf hohe Temperaturen hindeutet. So kam man auf den Gedanken, dass eine Art Feuerkugel zu Beginn des Universums vorgelegen haben muss.

III. Das Standard – Urknall – Modell

Der Urknall ist aber nicht als eine Explosion im bereits bestehenden Raum zu verstehen, sondern eher als die gemeinsame Entstehung von Raum, Zeit und Materie aus einer Anfangssingularität heraus. Als Beweis für diese These werden folgende drei experimentellen Beobachtungen angeführt: die Rotverschiebung und damit einhergehend die Expansion des Universums, die relative Häufigkeit leichter Elemente und die kosmische Hintergrundstrahlung.

1. Die Rotverschiebung

Mithilfe der Friedmann-Gleichungen konnte man zeigen, dass die Bewegung des Weltalls durch das ausgesandte Licht weit entfernter Galaxien nachweisbar war. Dieses Licht kann unter Zuhilfenahme eines Spektrometers in seine Spektralfarben zerlegt werden. Ein solches Spektrum wird durch Absorptionslinien unterbrochen, was Fraunhofer schon im 19. Jahrhundert entdeckt hatte. Diese Linien entstehen durch die Absorption des Lichts durch Gas, welches die Galaxien umgibt.

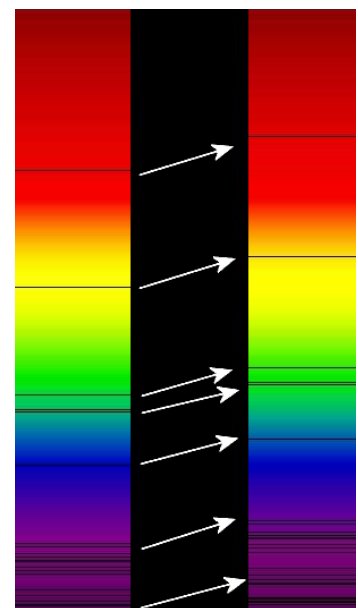


Abbildung 2: Veranschaulichung der Rotverschiebung

Wenn man nun einen Vergleich zwischen dem Spektrum einer entfernten Galaxie und einem Spektrum auf der Erde anstellt, so erkennt man, dass die Absorptionslinien der entfernten Galaxie in Richtung der längeren, roten Wellenlängen verschoben sind (Abbildung 2).

Das Maß der Rotverschiebung ist sehr unterschiedlich. Es reicht von kaum messbaren Werten bis hin zum fünffachen oder mehr der ausgesandten Wellenlänge. Es gibt noch eine andere Verschiebung der Absorptionslinien, die Blauverschiebung. Dabei handelt es sich um den gegenteiligen Effekt, d.h. die Absorptionslinien verschieben sich zu den kürzeren blauen Wellenlängen.

Entdeckt wurde die Rotverschiebung 1868 von Huggins, der Untersuchungen an Spektren verschiedener Sterne durchführte. Er interpretierte dieses Phänomen als einen optischen Doppler – Effekt. Dieser Effekt sagt aus, dass wenn sich eine Lichtquelle auf uns zubewegt, die Wellenlänge des Lichts kürzer erscheint und wenn sich die Wellenquelle von uns fortbewegt, die Wellenlänge länger erscheint, in Analogie zum akustischen Doppler – Effekt:

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

Huggins formulierte daher: „Entfernen sich Lichtquelle und Empfänger relativ voneinander mit der Geschwindigkeit v , so verschiebt sich die empfangene Wellenlänge λ_E im Vergleich zur ausgesandten Wellenlänge λ_S ins Rote.“

Die Doppler – Verschiebung wurde daher als Maß für die Fluchtgeschwindigkeit von Galaxien gedeutet. Je stärker die Rotverschiebung bei einer Galaxie ist, desto schneller entfernt sie sich von uns. 1929 veröffentlichte Hubble in seinem ersten Aufsatz, dass er einen linearen Zusammenhang zwischen der Entfernung einer Galaxie und deren Fluchtgeschwindigkeit entdeckt habe. Diese Beziehung trägt daher den Namen Hubble – Gesetz:

$$v = H_0 \cdot r$$

Es besagt, je stärker eine Galaxie rotverschoben ist, desto weiter ist sie von uns entfernt und desto schneller bewegt sie sich von uns fort. H_0 ist die Hubble – Konstante. Für diese Konstante konnte man sich bis zum heutigen Tag auf keinen exakten Wert einigen. Seit 1996 wird ein Wert von 72 km/s pro eine Million Lichtjahren angenommen. Weiterhin handelt es sich beim Hubble – Gesetz um eine Näherung, die ihre Gültigkeit verliert, sobald man über sehr weit entfernte Galaxien spricht.

Die Rotverschiebung kann aber noch anders erklärt werden. Man geht dabei von der sog. kosmologischen Rotverschiebung aus. Das bedeutet, dass sich die Wellenlänge des Lichts gemeinsam mit dem Universum ausdehnt. Wie das zu verstehen ist, ist in Abbildung 3 ersichtlich: das Universum war zu Beginn kleiner, aber es waren schon Wellenquellen vorhanden. Diese sandten Strahlung in Form von Licht einer bestimmten Wellenlänge aus. Dehnt sich das Universum weiter aus, so musste sich auch die Wellenlänge ‚strecken‘; sie vergrößerte sich also.

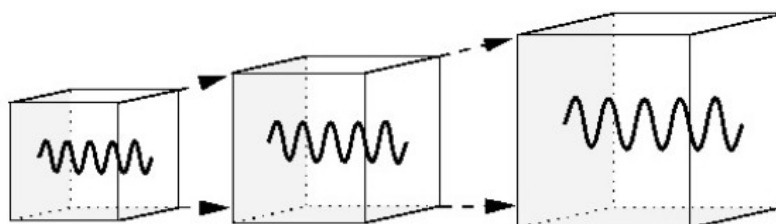


Abbildung 3: Die Wellenlängen des Lichts dehnen sich mit dem Universums aus.

Der Grund für die Alternativerklärung ist, dass Hubble bei seinen Berechnungen die Massen der Galaxien außer Acht ließ.

2. Relative Häufigkeit leichter Elemente

Eine weitere Stütze des Standardmodells ist die relative Häufigkeit leichter Elemente im Universum. Der Massenanteil von gewöhnlichem Helium ist viel höher als der Massenanteil von beispielsweise Wasserstoff. Heutzutage geht man davon aus, dass die chemischen Elemente durch Fusionsprozesse in den Sternen gebildet wurden. Allerdings ist sowohl der Massenanteil von Helium als auch der von Deuterium so hoch, dass diese beiden Elemente unmöglich erst in den letzten 10 Mrd. Jahren gebildet werden konnten. Helium kann nicht ausschließlich aus Kernfusion entstanden sein. Es bleibt nur, dass es schon kurz nach dem Urknall vorhanden gewesen sein muss. Nach dem Urknall waren die Temperaturen im Universum so hoch, dass Kernfusionen stattfinden konnten. Zu diesem Zeitpunkt gab es aber noch keine Sterne. Es fand die primordiale Nukleosynthese statt. Hierbei handelt es sich um eine theoretische Überlegung, nach der die leichten Elemente in den ersten drei Minuten nach dem Urknall entstanden sind.

Will man die Aussagen des Standardmodells überprüfen, so muss zunächst eine Unterscheidung zwischen dem Ursprungsgehalt an Helium und dem in den Sternen gebildeten Helium vorgenommen werden. Nach dem Urknall lag der Heliumgehalt bei etwa 24%. Rund 8 Mrd. Jahre später war der Anteil schon auf 28% angestiegen. Bei diesen Werten handelte es sich bis in die 60er Jahre hinein um Schätzungen. Erst 1965 kamen unabhängig voneinander die Gruppen um Hoyle und Peebles zu ähnlichen Werten. Im Laufe ihrer Berechnungen stellten sie fest, dass Helium sehr homogen im Universum verteilt war. Daraus schloss man, dass die schweren Elemente in den Sternen entstanden sind, Helium aber bereits im Frühstadium des Universums.

Ebenso wie Helium wurde auch die Häufigkeit von Deuterium näher betrachtet. Allerdings gab es dabei Schwierigkeiten, denn bis heute kann niemand genau sagen, wo und wie Deuterium im Universum entstanden ist. Seine räumliche Verteilung ist nicht mal ansatzweise homogen, so dass auch keine Aussage über einen genauen Deuteriumgehalt im All gemacht werden kann. Im Laufe der Beobachtungen fand man heraus, dass die Bildung von Deuterium sehr empfindlich von der Materiedichte des Universums abhängt. Neueste Untersuchungen legen den Verdacht nahe, dass Deuterium Wolken aus primordialer Materie entstammt. Das ist Materie, die sich seit dem Urknall nicht mehr verändert hat.

3. Die kosmische Hintergrundstrahlung

Die dritte Stütze des Standardmodells handelt von der kosmischen Hintergrundstrahlung. Um die Entstehung der Hintergrundstrahlung zu verstehen, muss man zum Anfang des Universums zurückgehen. Das Universum war einst auf sehr engem Raum zusammengedrängt. Daher gab es eine hohe Materiedichte und hohe Temperaturen. Es machte sich folglich die Vorstellung einer undurchsichtigen Feuerkugel breit, die am Anfang des Universums stehen sollte. Mit „undurchsichtig“ ist hier die Undurchlässigkeit von Strahlung gemeint. Das lag am Gleichgewicht zwischen Materie und Strahlung. Die Strahlung konnte sich nicht frei bewegen. Bei seiner Ausdehnung kühlte das Universum ab, was zur Folge hatte, dass immer mehr Teilchen aus dem Gleichgewicht von Strahlung und Materie auskoppelten. Das geschah so lange, bis nur noch Protonen, Neutronen und Elektronen mit der Strahlung im Gleichgewicht waren. Dabei wirkten die Elektronen als Streuzentren, so dass eine permanente Emission und Absorption von Strahlung stattfand. Dadurch nahm die Strahlung eine Planck – Frequenzverteilung an, die heute besser unter dem Namen Schwarzkörperstrahlung bekannt ist. In Abbildung 4 ist die Frequenzabhängigkeit des Mikrowellenhintergrundes wie er von COBE gemessen wurde zu sehen. Die ausgezogene Linie entspricht der theoretischen Kurve einer Planck – Verteilung bei einer Temperatur von

2,725 K. Die (von COBE gemachten) ca. 30 Messkurven mit ihren Fehlerbalken stimmen mit der Kurve so exakt überein, dass sie unter ihr verborgen bleiben.

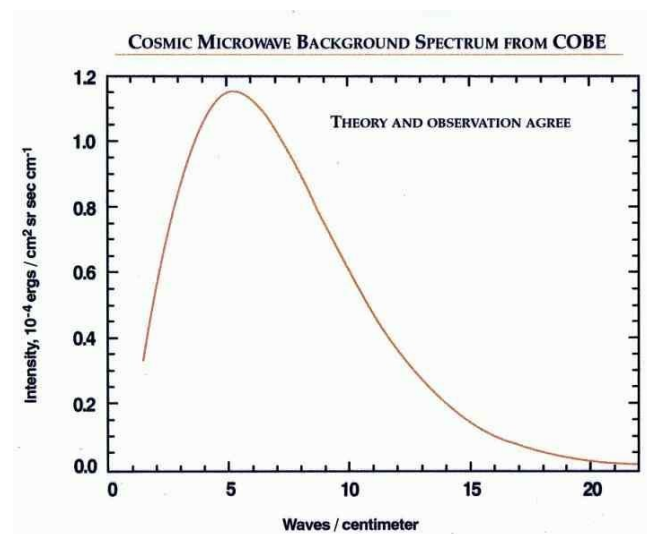


Abbildung 4: Gemessene Frequenzverteilung des Mikrowellenhintergrundes

Ein weiteres Absinken der Temperatur durch Ausdehnung des Universums führte dazu, dass auch Elektronen und Protonen auskoppeln konnten. Protonen und Elektronen fusionierten dann zu Wasserstoff. Weil gebundene Elektronen nicht mehr gut als Streuzentren wirken können, wurde das Universum allmählich durchsichtiger. Die Strahlung koppelte nämlich von der Materie ab und bewegte sich von da an relativ unabhängig von ihr. Das Universum dehnte sich natürlich weiter aus, wodurch auch die Temperatur immer weiter sank. Daher ist die Temperatur der Strahlung sehr viel niedriger als zum Zeitpunkt der Trennung von Strahlung und Materie. Die Hintergrundstrahlung ist also nichts anderes als das ‚Nachleuchten‘ des Urknalls.

Bereits im Jahr 1948 gab es theoretische Überlegungen zur Existenz der Hintergrundstrahlung. Man nahm an, sie sei durch eine urzeitliche Feuerball verursacht worden. Allerdings konnte man dies These weder durch Berechnungen noch durch Experimente beweisen. Erst 16 Jahre später wurde der Mikrowellenhintergrund per Zufall von den beiden Physikern Penzias und Wilson entdeckt. Die beiden arbeiteten 1964 in der Abteilung für Radiowellen – Physik bei den Bell Laboratories. Sie wollten die Intensität der Radiowellen messen, die von der Milchstrasse ausgesandt werden. Hierfür nutzten sie eine sehr empfindliche Antenne, die ursprünglich für die Kommunikation mit Satelliten gebaut worden war. Das schwierigste bei ihren Messungen war eine Unterscheidung zwischen dem Radorauschen der Milchstrasse und dem elektrischen Rauschen ihrer Messgeräte festzustellen. Die Messungen wurde mit einer Hornantenne durchgeführt, die schon bei Radiowellen mit einer Wellenlänge von ca. 7 cm Daten liefern konnte. So wollten sie ein Maß für das Untergrundrauschen erhalten, dass sie später als Korrektur abziehen konnten.

Allerdings erhielten sie schon bei ihrer ersten Messung ein sehr großes Rauschen, dass sie sich nicht erklären konnten. Mehrfaches Nachmessen ergab, dass dieses Rauschen sowohl richtungs- als auch zeitunabhängig war. Die einzige Erklärung, die beiden dazu einfiel war, dass es sich um Strahlung aus dem All handeln muss. Damit hatten sie die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckt. Diese Entdeckung brachte Penzias und Wilson 1978 den Physik – Nobelpreis ein.

Die Annahme von Penzias und Wilson wurde in den folgenden Jahrzehnten ständig überprüft, indem immer neue Messungen durchgeführt wurden. 1989 schickte die NASA den COBE (Cosmic Background Explorer) ins All. 2001 folgte der WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), der die Messungen von COBE bestätigte und dazu eine räumlich besser aufgelöste Verteilung der Temperaturfluktuationen zeigte (vgl. Abbildung 5). Beide Satelliten

bewiesen durch ihre Messungen, dass es sich beim Mikrowellenhintergrund um eine nahezu perfekte Schwarzkörperstrahlung handelt.

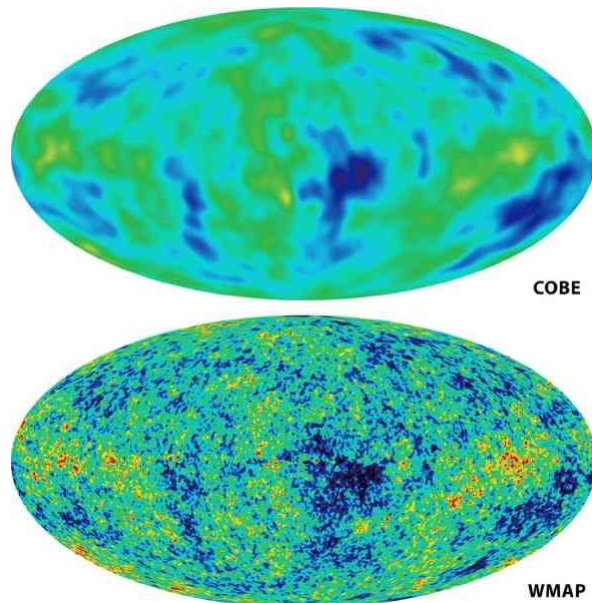


Abbildung 5: Vergleich der COBE und WMAP Daten

IV. Andere Beobachtungen der Kosmologie

Es gibt neben den bisher beschriebenen Grundlagen des Standardmodells noch weitere Beobachtungen im Rahmen der Kosmologie, von denen die drei wichtigsten hier noch kurz erläutert werden.

1. Strukturbildung im Universum

Zu Beginn war das Universum weder homogen noch isotrop. Daher gab es dort lokale Dichteunterschiede, auch Dichtefluktuationen genannt. Diese Dichtefluktuationen stützten die Vorstellung von einer hierarchischen Entwicklung der Strukturen im Universum. Falls der anfängliche Dichtekontrast groß genug war, konnte die Region, in der er sich befand, von der allgemeinen Expansion abkoppeln und eventuell kollabieren, wodurch ein gebundenes Objekt entstehen kann. Kleine Strukturen schließen sich zu immer größeren Gebilden zusammen. Dabei ist erkennbar, dass Galaxien nicht willkürlich im All verteilt sind, sondern ein komplexes Netzwerk aus Linien und Flächen im Raum bilden. Oft findet man sie auch in Gruppen oder Haufen. Die größten enthalten bis zu 1000 Galaxien. Solche Galaxien können sich mitunter zu Superhaufen zusammenschließen.

Dies macht auch Sinn, wenn man sich eine Karte der Strukturverteilung im Universum ansieht. In Abbildung 6 ist ein Auszug aus dem 2dF Galaxy Redshift Survey zu sehen. Jeder kleine schwarze Punkt ist eine einzelne Galaxie. Es wurden hierfür etwa 60.000 Galaxien analysiert.

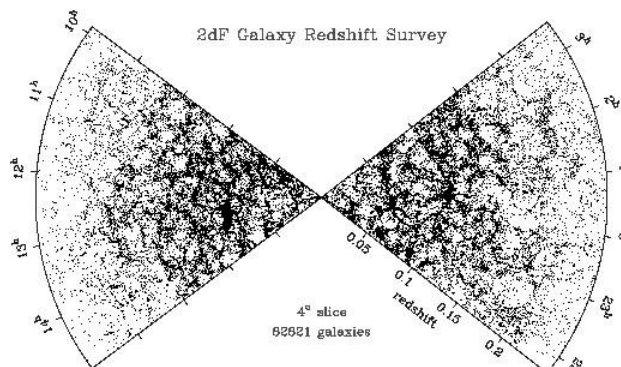


Abbildung 6: Auszug aus dem 2dF Galaxien Rotverschiebungskatalog

2. Alter des Universums

Um das Alter des Universums zu ermitteln kann man sich verschiedener Methoden bedienen: Hubble – Zeit, Betrachtung von Kugelsternhaufen und der radioaktive Zerfall schwerer Elemente.

Bei der Hubble – Zeit handelt es sich lediglich um den Kehrwert der Hubble – Konstanten. Denn wenn die Geschwindigkeit einer sich entfernenden Galaxie seit dem Urknall konstant geblieben ist, dann ist die Zeit, welche für das Zurücklegen dieser Strecke nötig war, exakt die heutige Entfernung, geteilt durch ihre Relativgeschwindigkeit:

$$v = H_0 \cdot r \rightarrow H_0 = \frac{v}{r} \rightarrow \frac{1}{H_0} = \frac{300.000 \cdot 10^6 \text{ J}}{23 \text{ km/s}} = 13 \cdot 10^9 \text{ Jahre}.$$

Das errechnete Alter wäre demnach 13 Mrd. Jahre. Allerdings kann das nur bei konstanter Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien stimmen. Da sich die Galaxien aber noch gegenseitig abbremsen, müsste man eine Art Taylorentwicklung für die Hubble – Konstante durchführen:

$$H_0 = z + \frac{z^2}{2}(1 - q_0) + \dots$$

z gibt den Wert für die Rotverschiebung an und q_0 ist der Abbremsparameter der Expansion.

Auch anhand von Kugelsternhaufen kann das Alter des Universums bestimmt werden. Kugelsternhaufen sind kugelförmige Gebilde, die das galaktische Zentrum satellitengleich umkreisen. Sie sind mit die ältesten bekannten Objekte im Universum. Bei ihrer Entstehung bilden sich Sterne unterschiedlichster Massen und Lebensdauern gleichzeitig. Um eine Altersbestimmung vorzunehmen, trägt man alle Sterne eines Kugelsternhaufens in ein Hertzsprung – Russel – Diagramm (Abbildung 7) ein. Es ergibt sich dann eine Hauptreihe mit einer abknickenden Nebenreihe.

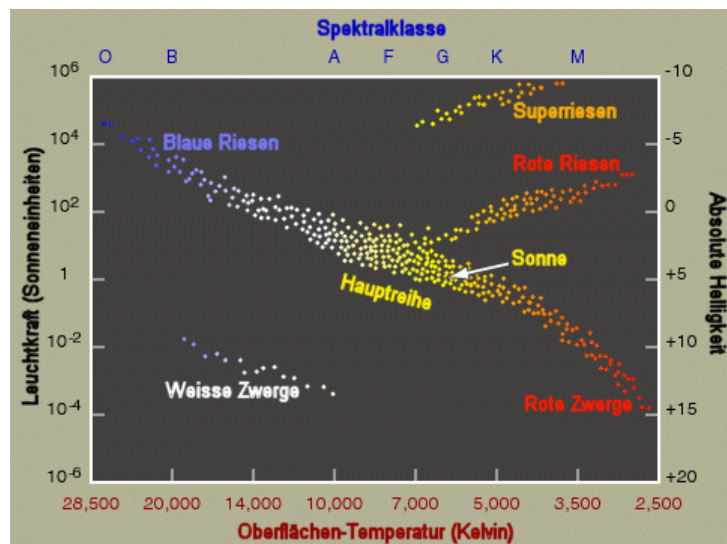


Abbildung 7: Hertzsprung – Russel – Diagramm

Aus der Position des Knicks und aus der Helligkeit der Sterne in diesem Bereich kann man dann das Alter des Universums bestimmen. Mehrfache Analysen solcher Art ergaben ein Alter des Universums, das zwischen 13 und 18 Mrd. Jahren liegt.

Als drittes Verfahren der Altersbestimmung nimmt man den radioaktiven Zerfall schwerer Elemente. Hierbei werden vor allem Thorium und Uran als Äonenuhren genutzt. Aus den Halbwertszeiten ihrer Isotope (Größenordnung 10⁹ Jahre) und auch denen anderer schwerer

Elemente wie Rubidium oder Rhenium ermittelte man ein Alter des Universums zwischen 14 und 19 Mrd. Jahren.

Ein Vergleich aller drei Methoden liefert einen Wert für das Alter des Universums, der zwischen 13 und 16 Mrd. Jahren liegt. Neueste Berechnungen legen das Alter auf 13,72 Mrd. Jahre fest.

3. Dunkle Materie

Schließlich kommt nun noch ein kleiner Abschnitt über eines der größten Mysterien der Kosmologie; die dunkle Materie. Ihr Name ist Programm, denn alles an ihr ist dunkel. Man weiß nichts über ihre Entstehung, Zusammensetzung oder Eigenschaften. Das einzige, was man mit Sicherheit über sie sagen kann ist, dass es sich um Materie handelt. Sie muss also eine gewisse Masse besitzen.

In Kapitel IV.1 wurde schon erwähnt, dass lokale Dichteunterschiede mit verantwortlich dafür sind, dass sich Strukturen im Universum bilden konnten. Allerdings sind die daraus resultierenden Temperaturunterschiede (Größenordnung 10^{-5} K) so gering, dass sie nicht für die Ausbildung von Strukturen ausgereicht haben können. Daher gibt es nur die Erklärung, dass dunkle Materie vorhanden gewesen sein muss. Dies bestätigte auch Zwicky 1933, der bei der Berechnung des Coma – Haufens annahm, dass es sich um ein gravitativ sehr stabiles Objekt handeln müsse. Heute ist man der Überzeugung, dass es sehr viel mehr gravitierende als leuchtende Materie geben muss.

Ein weiterer Hinweis auf dunkle Materie ist das Rotationsverhalten von Galaxien, im speziellen bei Spiralgalaxien. Spiralgalaxien haben einen sehr einfachen Aufbau. Gegliederte Spiralarme umkreisen ein sehr viel dichteres Zentrum (Kern). Nach Newtons Gravitationsgesetzen nimmt die Geschwindigkeit der Rotation von innen nach außen ab. Allerdings haben Messungen mittels Rotverschiebungsverfahren gezeigt, dass sich die Geschwindigkeit von Spiralgalaxien nicht ändert, sondern konstant bleibt. Daraus folgt, je weiter ein Objekt vom Kern einer Galaxie entfernt ist, desto schneller bewegt es sich. So kam man auf die These, dass dunkle Materie unsere Galaxie sphärisch umgibt. Diese uns umgebende Kugel wird Halo genannt. Bestätigt werden konnte die Theorie noch nicht, da es bisher niemandem gelungen ist, dunkle Materie ‚sichtbar‘ zu machen.

V. Zusammenfassung

Es sollte in erster Linie deutlich geworden sein, dass es sich beim Standard – Urknall – Modell um ein theoretisches Konzept handelt. Das Universum könnte so wie hier beschrieben entstanden sein, muss es aber nicht zwangsläufig. Durch seine hohe Anzahl freier Parameter, kann es sich immer wieder an die neuesten Beobachtungen und Ergebnisse anpassen. Obwohl es eine Theorie ist, liefert es doch ein sehr anschauliches Bild über die Geometrie, Zusammensetzung und Geschichte des Universums. Theoretische Überlegungen und experimentelle Beobachtungen stimmen mit einer Genauigkeit von 10% überein. Auf der Größenskala des Universums betrachtet ist das ein großer Erfolg. Zudem wird das Standardmodell auch vom Großteil der Kosmologen als beste Erklärung zur Entstehung des Universums angesehen.

Lässt man die Möglichkeit beiseite, dass ein höheres Wesen (Gott oder ähnliches) alles so schön arrangiert hat, so ist die Urknalltheorie die einzige bis heute vorgestellte Theorie zur Entstehung des Universums, die **alle** bisher gemachten Beobachtungen im Universum auf einmal in einem logischen Zusammenhang erklären kann.

Literatur

Kolb/Turner: The Early Universe, Addison Wesley, 1991

Klapdor-Kleingrothaus/Zuber: Astroteilchenphysik, Teubner 1997

Gerthsen: Physik, Springer, 2002

Tipler: Physik, Spektrum Verlag, 2004

www.astronews.com

www.wikipedia.org

www.nasa.gov

pauli.uni-muenster.de

www.astro.uni-bonn.de

www.mpa-garching.mpg.de

www.genesisnet.info

Kühnel/Bartelmann: Die Grundlagen der Kosmologie, Sterne und Weltraum, 2002

Abbildungsnachweis

Abbildung 1 und 2: www.wikipedia.org

Abbildung 3 und 4: www.astro.uni-bonn.de

Abbildung 5: www.genesisnet.info

Abbildung 6: www.mpa-garching.mpg.de

Abbildung 7: www.drfreund.de