

Seminar zur Theorie der Teilchen und Felder
Institut für theoretische Physik

Ausarbeitung zum Vortrag vom 30. Oktober 2013

Beobachtbare Grundlagen der Kosmologie

Thomas Biekötter

23. November 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Von der Antike bis zur Modernen Kosmologie	1
1.1	Kosmologie bis zum 20. Jahrhundert	1
1.2	Moderne Kosmologie	2
2	Das Standardmodell der Kosmologie	3
2.1	Expansion des Universums	3
2.2	Primordiale Nukleosynthese	4
2.3	Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung	5
2.4	Evolution des Universums nach dem Urknall	6
3	Offene Fragen	7
3.1	Baryogenese	7
3.2	Dunkle Materie	7
3.3	Dunkle Energie	8
4	Zusammenfassung	9
	Literatur	10

1 Von der Antike bis zur Modernen Kosmologie

Die Versuche, das Universum bzw. den Kosmos in seinem ganzen zu verstehen, lassen sich bis zur Antike zurückverfolgen. Insbesondere verstehen wir heute unter dem Begriff Kosmologie die Wissenschaft vom Ursprung und von der Entwicklung des Universums. Während die moderne Kosmologie eine Naturwissenschaft ist, die mit mathematischer Präzision betrieben wird und mit Hilfe unterschiedlichster experimenteller Beobachtungen überprüft werden kann, war die Menschheit in der Geschichte lange auf eine eher philosophische Herangehensweise angewiesen. Die Möglichkeit, den Kosmos zu beobachten, beschränkte sich lange auf das Beobachten von Himmelskörpern.

In diesem Kapitel werden zunächst die historisch einflussreichen Weltbilder diskutiert und wie sie aufgrund neuer Beobachtungen modifiziert werden mussten, häufig nicht ohne den Widerstand nazistischer Kräfte, die den Gedanken der Sonderrolle des Lebens auf der Erde darin manifestiert sahen, die Erde müsse sich im Zentrum des Universums befinden. Danach folgt die Entwicklung der modernen Kosmologie, dessen Ursprung in der Entdeckung der allgemeinen Relativitätstheorie durch Albert Einstein im Jahre 1915 gesehen wird.

1.1 Kosmologie bis zum 20. Jahrhundert

Eines der ersten bis heute überlieferten Weltbilder ist das Ptolemäische Weltbild aus dem zweiten Jahrhundert nach Christus. In ihm befindet sich die Erde im Zentrum des Universums. Die Sonne und die anderen Planeten des Sonnensystems bewegen sich um die Erde. Das Weltbild war bis in das 16. Jahrhundert hinein wohl das einflussreichste in ganz Europa, zumal es durch die katholische Kirche unterstützt wurde, weil sich die Erde im Zentrum befand. Das Modell hatte allerdings die entscheidende Schwäche, dass es die Planetenbewegung der anderen Planeten nur erklären konnte, wenn man spontane Richtungsänderung zulässt.

Das missfiel vielen Gelehrten, wo doch eine Beschreibung der Dynamik, in der sich die Sonne im Zentrum befindet und sich die Erde wie alle anderen Planeten um die Sonne bewegt, dieses Problem nicht hat. Nikolaus Kopernikus (1473-1543) und später Galileo Galilei (1564-1642) spielten entscheidende Rollen, da sie das heliozentrische Weltbild durch Beobachtungen untermauern konnten, wobei insbesondere Galilei unter dem massiven Widerstand der Kirche litt. Endgültig akzeptiert war das heliozentrische Weltbild erst, als es Johannes Kepler (1642-1727) gelang, rein empirisch die Planetenbewegung mit Hilfe seiner berühmten Keplergesetze korrekt vorherzusagen zu können. Keplers Arbeit lieferte einfache Formeln, gewonnen aus einer langwierigen Datenauslese, vollständig auf Beobachtungen beruhend. Was fehlte, war die Antwort auf die Frage, warum die Bewegung der Himmelskörper den Keplerschen Gesetzen genügt.

Das gelang Isaac Newton (1642-1727), der den Ursprung der Dynamik in einer kontrahierenden Kraft fand, die auf alle Materie im Universum wirkt:

$$\vec{F} = G \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \cdot \vec{e}_r \quad G : \text{Gravitationskonstante} \quad (1)$$

In seiner Arbeit *Philosophia Naturalis Principia Mathematica* aus dem Jahr 1687 beschreibt er die Anziehungskraft zweier Körper als Zentralkraft proportional zu den Massen m_1 und m_2 der Körper und entgegengesetzt proportional zum Abstand der Körper r zum Quadrat. Zusammen mit dem Bewegungsgesetz $F = m \cdot a$ gelang es Newton, die Bahnen der Planeten zu berechnen und insbesondere den Keplerschen Gesetzen ein theoretisches Gerüst zu geben. Dadurch, dass Newton ein überall im Universum geltendes Gesetz postulierte, finden sich in seinen Arbeiten auch schon Grundgedanken zum Kosmologischen Prinzip. Seine moderne Formulierung geht aber auf Albert Einstein zurück:

Das Universum ist homogen und isotrop.

Das Kosmologische Prinzip ist ein Postulat, das die Grundlage aller modernen Theorien darstellt. Wichtig ist, zu erwähnen, dass weder die Isotropie aus der Homogenität des Universums noch

umgekehrt die Homogenität aus der Isotropie folgt. Allerdings führen die Isotropie zusammen mit dem Postulat, dass kein Punkt im Universum ausgezeichnet ist, zur Homogenität. Bis heute gibt es keine Beobachtung, die das kosmologische Prinzip verletzt. Selbst die Bildung von Materiestrukturen verwischt auf kosmologischen Skalen zu einer homogenen Materiedichte.

Trotz der Newtonschen Theorie blieben fundamentale Fragen, die einer Antwort bedurften. Leibniz (1646-1716) irritierte der Gedanke eines unendlich großen Universums mit unendlich vielen Sternen, die nach Newton zu einer unendlich großen Gravitationskraft auf die Körper im Kosmos führen müssten. Ist das Universum also nicht unendlich groß? Hat es einen Rand? Kant (1724-1804) vermutete nach der Entdeckung kosmologischer Nebel, dass aus ihnen durch Kontraktion Sterne entstehen könnten. Er zweifelte also, dass Sterne statische Objekte sind, sondern eine Entwicklung durchlaufen, nämlich einen Entstehungsprozess und einen Auslöschungsprozess. Wenn dem so ist und es das Universum schon unendlich lange gibt, warum sind dann nicht schon alle Sterne erloschen? Dieser Gedankenweg führt unwiederbringlich zu der Frage, ob es einen Ursprung des Universums und damit einen Ursprung der Zeit gibt.

1.2 Moderne Kosmologie

Wie in der Einführung erwähnt, beginnt mit der Entdeckung der allgemeinen Relativitätstheorie durch Einstein im Jahr 1915 die moderne Kosmologie. Die am Ende des vorigen Kapitels beschriebenen Fragen finden endlich eine Antwort. Für die Entwicklung der allgemeinen Relativitätstheorie fundamental war die von Riemann bereits im 19. Jahrhundert aufgestellte Differentialgeometrie. Insbesondere ein Missverständnis ließ sich direkt klären: Der Unterschied zwischen Unendlichkeit und Grenzenlosigkeit des Universums, der bisher nicht verstanden war. Der Grundgedanke ist, dass das Universum endlich groß, aber trotzdem grenzenlos sein kann. Die Voraussetzung hierfür ist eine Krümmung des Raumes. Vorstellen kann man sich das Prinzip mit Hilfe eines Balls. Ein Ball ist ein gekrümmtes Objekt und definitiv endlich groß. Trotzdem kann man sich auf der Oberfläche des Balls unendlich lange in eine Richtung bewegen, ohne auf eine Grenze zu stoßen.

Riemann selbst hat in seinen Arbeiten schon versuche unternommen, seine mathematischen Ergebnisse auf den Kosmos zu übertragen, doch es bedurfte Einstein, der auf seinen Arbeiten aufbauend eine Beschreibung des Kosmos gelang, die nicht nur bloße Theorie war, sondern handfeste, überprüfbare Vorhersagen lieferte. Für das Verständnis des Standardmodells der Kosmologie wichtige Aussagen der allgemeinen Relativitätstheorie sind im wesentlichen die folgenden drei Punkte:

- Der Raum und die Zeit sind voneinander abhängig und bilden eine gemeinsame Struktur, die Raumzeit genannt wird. Die Grundlage hierfür findet sich in den Erkenntnissen der Speziellen Relativitätstheorie.
- Die Geometrie der Raumzeit, die durch die Metrik $g_{\mu\nu}$ beschrieben wird, ist durch die Verteilung der Energie bzw. der Materie im Universum ausgedrückt durch den Energie-Impuls-Tensor $T_{\mu\nu}$ bestimmt. Dieses Resultat findet man in der Einsteinschen Feldgleichung

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (2)$$

Auf der rechten Seite der Gleichung findet sich der Energie-Impuls-Tensor. Dieser Term wird als Quellterm bezeichnet. Die beiden ersten Terme auf der rechten Seite stehen für die geometrischen Eigenschaften der Raumzeit. $R_{\mu\nu}$ wird Ricci-Tensor genannt. R ist eine Konstante, die ein Maß liefert für den relativen Abstand von Objekten im Universum. Der übrige Term beinhaltet die kosmologische Konstante Λ , die Einstein forderte, um als Lösung der Feldgleichung eine konstante Metrik zu erhalten. Mathematisch lässt sich dieser Term ähnlich einer Integrationskonstante interpretieren.

- Die Krümmung der Raumzeit nehmen wir als Gravitation war.

Was sich als großer Irrtum erwies, war der Glaube Einsteins an eine statische Raumzeit, weswegen er später die kosmologische Konstante als „größte Eselei“ bezeichnet haben wird. Für diesen Sinneswandel bedurfte es der Entdeckung Edwin Hubbles, dass sich das Universum in einer Expansion befindet. Er beobachtete die Rotverschiebung von Absorptionslinien im Spektrum elektromagnetischer Strahlung anderer Galaxien. Mit Hilfe der Formel

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}, \quad z = \frac{\lambda_B - \lambda_E}{\lambda_E} \quad (3)$$

konnte Hubble aus der Rotverschiebung z direkt auf die Geschwindigkeitskomponente schließen, mit der sich die Galaxien von uns weg bewegen. Sein Resultat war das Hubble-Gesetz, dass er im Jahr 1924 formulierte:

$$v(r) = H \cdot r \quad \text{mit } H: \text{ Hubble-Konstante} \quad (4)$$

Unabhängig davon, in welche Richtung man blickt und in welchem Punkt im Kosmos man sich befindet, entfernen sich die Galaxien mit einer Geschwindigkeit v , die in linearem Zusammenhang zur Distanz der Galaxie steht. Die einzig logische Interpretation ist, dass das gesamte Universum expandiert. Demnach handelt es sich bei der Rotverschiebung der Photonen auch nicht um den Dopplereffekt im eigentlichen Sinn. Vielmehr vergrößert sich die Wellenlänge der Photonen dadurch, dass sich der Raum in der Zeit, die die Photonen von der Galaxie bis zum Beobachtungspunkt benötigen, ausdehnt. Es sollte beachtet werden, dass es sich bei der Hubble-Konstante eigentlich nicht um eine Konstante handelt, da sie zeitabhängig ist.

2 Das Standardmodell der Kosmologie

Nachdem im vorigen Kapitel die geschichtliche Entwicklung der Kosmologie zusammengefasst wurde, wird in diesem Kapitel das heute allgemein akzeptierte Standardmodell der Kosmologie - die Urknalltheorie - vorgestellt. Es ist das Ergebnis der bereits erläuterten Erkenntnisse:

- Das Universum ist homogen und isotrop.
- Die allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Gravitation als geometrische Eigenschaft der Raumzeit.
- Das Universum expandiert.

Bevor ein Gesamtüberblick über die Urknalltheorie gegeben wird, werden in den nächsten Unterkapiteln die fundamentalen Voraussagen des Modells dargestellt, die experimentell überprüft sind und für die Akzeptanz der Theorie sorgten. Die Beschreibung der sogenannten primordialen Nukleosynthese beispielsweise liefert eine korrekte Vorhersage der Elementhäufigkeit der leichten Elemente im Universum über 10 Größenordnungen hinweg! Es gibt vor allem drei Beweise des Standardmodells der Kosmologie, die man auch die Grundpfeiler der Urknalltheorie nennt.

2.1 Expansion des Universums

Hubbles Ergebnisse lieferten eindeutige Hinweise dafür, dass sich das Universum ausdehnt und sich durch diese Ausdehnung alle Objekte im Universum voneinander weg bewegen. Die Expansion muss der Gravitation entgegenwirken, weshalb sich die Expansion mit der Zeit verlangsamen

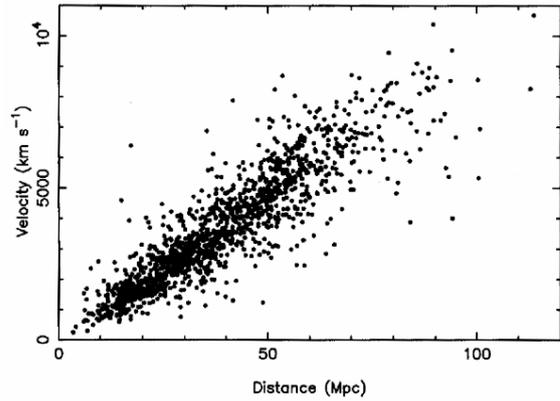


Abbildung 1: Geschwindigkeit von 1355 Galaxien aufgetragen gegen die Entfernung [6].

sollte. Es können nun drei Fälle auftreten, die im wesentlichen von der homogenen Materiedichte des Universums ρ abhängen. Zur Charakterisierung dieser Fälle eignet sich die kritische Materiedichte ρ_c .

Anschaulich zeigt Abbildung 2 die Entwicklung der Expansion. Ist die Materiedichte kleiner als die kritische Dichte

$$\Omega = \rho/\rho_c < 1, \quad (5)$$

so ist die gravitative Wechselwirkung nicht stark genug, die Expansion zu stoppen. Das Universum expandiert ewig weiter.

Für den Fall, dass die Materiedichte genau gleich der kritischen Dichte ist ($\Omega = 1$), sorgt die Gravitation dafür, dass die Expansion asymptotisch stagniert.

Ist hingegen die Materiedichte größer als die kritische Dichte ($\Omega > 1$), ist die Gravitation so stark, dass sie die Expansion nicht nur abbremsst, sondern anschließend umkehrt und der Raum wird sich in der Zukunft in einem Punkt konzentrieren.

Alle drei Modelle haben gemeinsam, dass es in der Vergangenheit einen Zeitpunkt gegeben hat, in der der Raum eine Singularität besitzt. Der Raum ist also zu einem Zeitpunkt in der Vergangenheit aufgespannt worden. Das ist eine direkte Folgerung aus den Feldgleichung der allgemeinen Relativitätstheorie. Außerdem werden aus dieser Theorie die drei kosmologischen Modelle mit einer globalen Krümmung der Raumzeit verknüpft. An dieser Stelle soll bereits darauf hingewiesen werden, dass neueste Beobachtungen zeigten, dass die Expansion entgegen aller drei Modelle beschleunigt ist (Nobelpreis 2011). Die Erklärung hierfür ist noch ein Rätsel, auf das im Kapitel über Dunkle Energie näher eingegangen wird. Die Vorhersage eines Ursprungs der Raumzeit ist allerdings im Einklang mit den Beobachtungen über das Alter des Universums, dass sich mit verschiedenen Methoden abschätzen lässt (zum Beispiel durch Auffinden der ältesten Sterne im Universum oder durch den Zerfall radioaktiver Isotope mit einer Halbwertszeit, die in der Größenordnung des nach der Theorie vermuteten Alters des Universums steht).

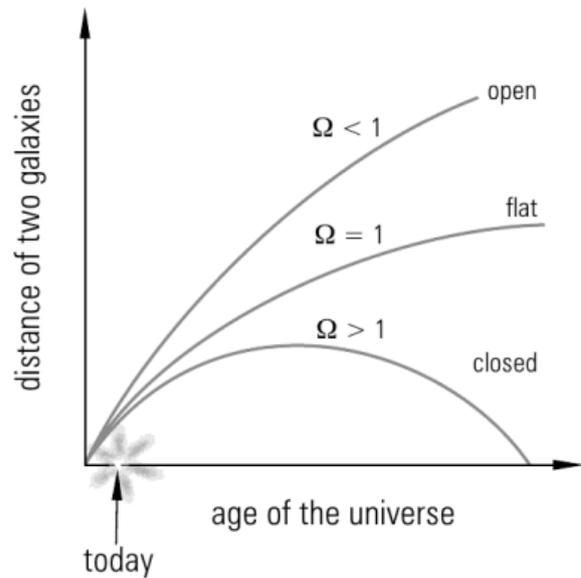


Abbildung 2: Die kosmologischen Modelle [4]

2.2 Primordiale Nukleosynthese

Ein weiterer fundamentaler Beleg für die Urknalltheorie ist die primordiale Nukleosynthese, also die Elemententstehung der leichten Elemente in einer relativ frühen Phase des Universums ungefähr 0,01 bis 100 Sekunden nach dem Urknall. Zu dieser Zeit hatte sich das Universum durch die Expansion so weit abgekühlt ($T \approx 10$ bis $0,1$ MeV), dass sich Protonen und Neutronen zu stabilen Atomkernen verbinden konnten. Durch Untersuchung der Kernreaktionen und ihrer Häufigkeit lässt sich die Elementhäufigkeit des Universums voraussagen. Die heutigen Berechnungen ergeben die folgenden Anteile von Helium, Deuterium und Lithium im Verhältnis zu Wasserstoff:

$${}^4\text{He} : \approx 24 \% \quad {}^2\text{D} : \approx 3 \cdot 10^{-3} \% \quad {}^7\text{Li} : \approx 10^{-7} \% \quad (6)$$

Alle schwereren Elemente sind im Universum durch Sternprozesse und nicht in der Phase der primordialen Nukleosynthese entstanden. Die Ergebnisse stimmen extrem gut mit den Beobachtungen überein. Genauere Daten liefern eine Übereinstimmung über 10 Größenordnungen. Insbesondere ist der Anteil an Helium viel größer, als hätte in Sternen produziert werden können. Genauso verhält es sich mit dem relativ großen Anteil an Deuterium. Deuterium wird zwar auch in Sternen gebildet, zerfällt aber praktisch komplett wieder. Die primordiale Nukleosynthese hat nur etwa drei Minuten gedauert. Danach lag die Temperatur unter der Schwelle, die nötig ist, um

Kernreaktionen zu ermöglichen. In diesen 3 Minuten hatte das Deuterium keine Zeit, vollständig zu zerfallen. Ein wichtiger Parameter der Theorie ist das Verhältnis von baryonischer Materie zu Photonen, das eine Größenordnung von 10^{-10} gehabt haben müsste.

2.3 Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung

Die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung ist ein Relikt aus einer Zeit ungefähr 380 000 Jahre nach dem Urknall. Sie wurde theoretisch vorhergesagt durch die Arbeiten von Gamow, Alpher und Herman aus den 1940 Jahren. Aus ihren Arbeiten über die Teilchenphysik im frühen Universum ging quasi als Nebenprodukt ein Photonenhintergrund hervor. Zu Beginn des Universums stehen Strahlung und Materie im thermischen Gleichgewicht. Ungefähr 380 000 Jahre nach dem Urknall beginnen Atome/Protonen und Elektronen zu rekombinieren. Die Wechselwirkung von Photonen mit Materie sinkt drastisch. Man spricht davon, dass das Universum durchsichtig wird. Den übrig gebliebenen Photonenhintergrund müsste man heutzutage detektieren können.

Das gelang 1964 durch Penzias und Wilson durch erdgebundene Antennen (Nobelpreis 1978). Mittlerweile ist die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung durch Satelliten und Raumsonden sehr detailliert untersucht worden. In Abbildung 5 sind Daten des Nasa-Satelliten COBE aufgetragen. Man erkennt, dass die Strahlung dem Planckschen Strahlungsgesetz folgt, also eine Schwarzkörperstrahlung ist. Das steht im Einklang mit der Theorie, dass Photonen und Materie zur Zeit der Entstehung der Strahlung im thermischen Gleichgewicht standen. Eine Folge daraus ist, dass man die Strahlung durch einen Wert für die Temperatur charakterisieren kann. Den Daten lässt sich entnehmen:

$T = (2,725 \pm 0,002) \text{ K}$. Die Temperatur ist relativ niedrig, weil sich die Photonen durch die Expansion des Universums rotverschoben haben ($z = 1089 \pm 0,1$).

Eine weitere Eigenschaft der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung ist die Isotropie, was in Übereinstimmung mit dem kosmologischen Prinzip steht. Eine erste Anisotropie lässt sich erst im mK-Bereich messen und hat ihre Ursache in der Relativbewegung der Erde gegenüber dem Ruhesystem der Strahlung. Sie wird Dipolanisotropie genannt. Vernachlässigt man die Dipolani-

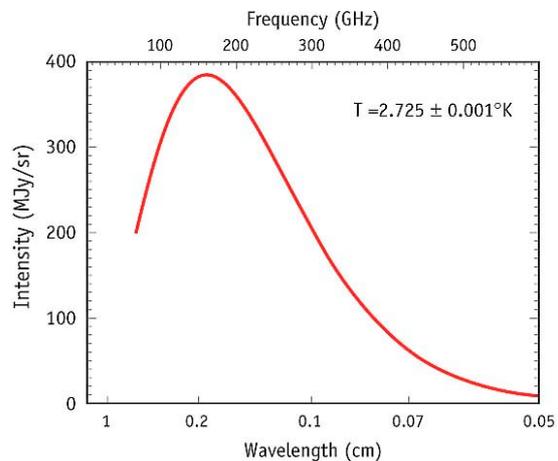


Abbildung 3: Intensität der Strahlung in Abhängigkeit von der Frequenz [8]

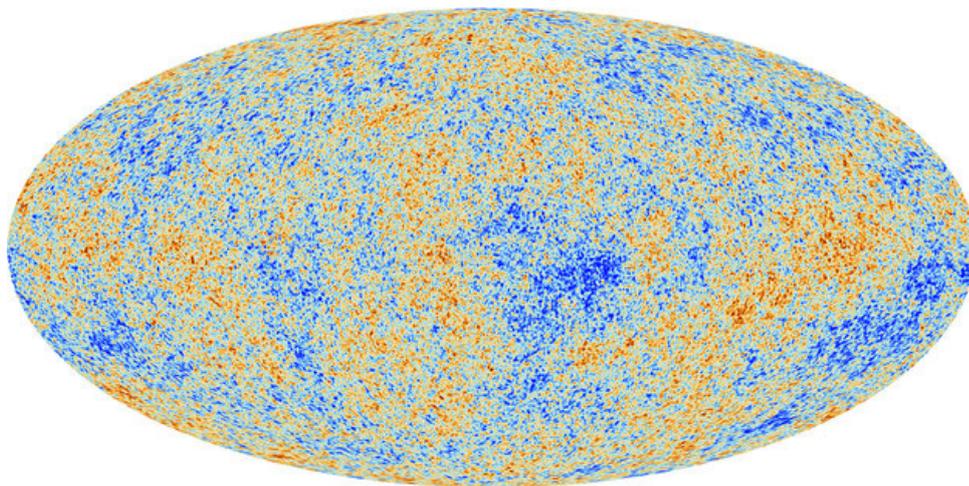


Abbildung 4: Anisotropien der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung [3]

sotropie findet man weitere Anisotropien erst im μK -Bereich. Sie sind zurückzuführen auf Dichteschwankungen im frühen Universum. Weil man aus ihnen Informationen über das Universum aus der Zeit von vor 13,7 Milliarden Jahren gewinnen kann, gab es drei Missionen, die Anisotropien mit möglichst guter Winkelauflösung zu vermessen: COBE-Satellit (1989-1993), Raumsonde WMAP (2001-2010) beide von der Nasa und die Raumsonde Planck (2009-2013) von der Esa. Die Ergebnisse von Planck sind in Abbildung 4 dargestellt. Aus diesen Daten lassen sich durch komplizierte Verfahren Rückschlüsse auf die Energie- bzw. Materieverteilung des Universum und andere kosmische Parameter wie etwa die Hubble-Konstante machen.

2.4 Evolution des Universums nach dem Urknall

Nachdem die Grundpfeiler des Standardmodells der Kosmologie dargestellt wurden, soll abschließend in diesem Unterkapitel ein zusammenfassender Überblick über die einzelnen Phasen des Universums gegeben werden, wie es die Theorie vorhersagt. Grundlegend ist die Expansion des Raums aus einem Punkt und die damit verbundenen Abkühlung des Universums. Zu erwähnen ist, dass sich die früheste Phase des Universums bis heute noch nicht erklären lässt, weil in der Standardtheorie der Teilchenphysik eine vereinheitlichte quantenmechanische Beschreibung der Gravitation fehlt. Theoretische Vorhersagen beginnen deswegen ab dem Zeitpunkt von 10^{-43} Sekunden nach dem Urknall. Bis zu diesem Zeitpunkt hat sich das Universum durch Expansion soweit abgekühlt, dass die gravitative Wechselwirkung von den anderen drei Wechselwirkungen, der schwachen, der starken und der elektromagnetischen, entkoppelt hat. In der nächsten Phase befinden sich die zuletzt genannten drei Grundkräfte vereinheitlicht in einer einzigen Wechselwirkung. Theoretisch wird dieser Sachverhalt durch die großen vereinheitlichten Theorien beschrieben. Experimentell lassen sich diese Theorien bisher aber noch nicht überprüfen, weil die Teilchenenergien viel höher sind, als bisher in Beschleunigern erzielt werden konnte. In der selben Zeit erfährt der Raum eine exponentiell beschleunigte Ausdehnung. Man spricht von der Inflationären Phase. Das sorgt dafür, dass das Universum rasch abkühlt. Es kommt deswegen zu einer Zeit von ungefähr 10^{-34} Sekunden nach dem Urknall zur Entkopplung der starken Wechselwirkung von der elektroschwachen Wechselwirkung. Schließlich entkoppeln als letztes die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung. Im Universum herrschen nun die vier heute beobachtbaren Grundkräfte. 10^{-10} Sekunden nach dem Urknall setzt das Quark-Confinement ein. Quarks können nicht mehr einzeln auftreten, sondern nur noch in farbneutralen Verbindungen. Das bedeutet die Entstehung von Protonen und Neutronen. Darauf folgt die primordiale Nukleosynthese bis zu ungefähr 100 Sekunden nach dem Urknall. 380 000 Jahre nach dem Urknall rekombinieren Elektronen mit den Protonen und den übrigen leichten Elementen. Das Universum wird durchsichtig und die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung entsteht. In den späteren Phasen bilden sich Materiestrukturen wie Sterne, Galaxien und Cluster.

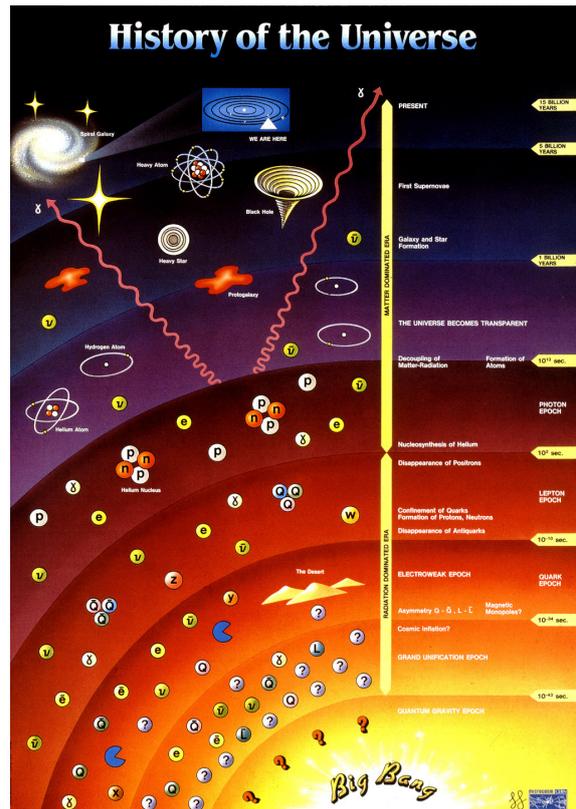


Abbildung 5: Schematischer Verlauf des Urknalls (Big Bang) [publiziert vom CERN]

3 Offene Fragen

Das Standardmodell der Kosmologie erklärt viele Beobachtungen und ist konsistent mit dem Standardmodell der Teilchenphysik. Es gibt allerdings auch experimentelle Beobachtungen, die bis heute theoretisch nicht erklärt werden können. Dazu zählen im wesentlichen die drei in den folgenden Unterkapiteln beschriebenen Phänomene. Oft sind die offenen Fragen noch mit anderen heute noch nicht vollständig erklärten Beobachtungen verbunden, so spielt etwa die Dunkle Materie eine wesentliche Rolle bei der Strukturbildung im Universum und die Dunkle Energie beruht auf der beschleunigten Expansion des Universums.

3.1 Baryogenese

Eine grundlegende Frage ist zum Beispiel, warum es im Universum viel mehr baryonische Materie als Antimaterie gibt. Bei den theoretischen Modellen wird wie üblich in der Physik von Symmetrien ausgegangen. Nach der Symmetrieannahme ist es nun aber so, dass es ebenso viel Materie wie Antimaterie geben müsste. Für eine zufällige statistische Unregelmäßigkeit in der Materie/Antimaterie-Verteilung ist der heutige Unterschied viel zu groß. Geht man bei den Anfangsbedingungen des Universums ebenfalls von Symmetrie aus, so bleibt nur die Möglichkeit, dass es in der Entwicklung des Universums einen Prozess gegeben haben muss, der dazu geführt hat, dass die baryonische Antimaterie fast vollständig verschwunden ist. Welcher Prozess das genau bewirkt hat, ist bis heute ungeklärt. Man erwägt, dass es zu Symmetrieverletzungen der Grundkräfte gekommen ist. Eine mögliche Erklärung sind die Sakharov-Bedingungen:

- C- und CP-Verletzung einer der Wechselwirkungen (schwache)
- Die Baryonenzahl ist keine Erhaltungsgröße
- Thermodynamisches Nichtgleichgewicht

Die CP-Verletzung der schwachen Wechselwirkung ist bereits experimentell nachgewiesen. Eine vollständige ursächliche Begründung der Baryogenese ist aber noch nicht gelungen.

Es sollte noch erwähnt werden, dass die Beobachtung, dass das Universum quasi ausschließlich aus Materie besteht, nicht nur auf die Alltagserfahrungen gestützt sind. Es gab Theorien, bei denen man vermutete, dass die Antimaterie gar nicht weniger im Universum vorhanden ist, sich aber in bisher nicht beobachteten Gebieten im Universum aufhält. Die Suche nach solchen Gebieten blieb erfolglos. Die Antimaterie müsste sich dann entweder in von der Materie abgeschotteten geschlossenen Systemen befinden, für deren Entstehen kein theoretisches Modell existiert, oder durch charakteristische bei der Annihilation von Materie und Antimaterie entstehender Strahlung registriert werden können.

3.2 Dunkle Materie

Beobachtungen zeigen, dass es im Universum mehr als die bisher bekannte Materie geben muss. Diese Materie hat zwei wesentliche Eigenschaften:

- **Dunkel:** Sie unterliegt nicht der elektromagnetischen Wechselwirkung, was bedeutet, dass sie keine elektromagnetische Strahlung aussendet.
- **Materie:** Sie besitzt eine Masse, was bedeutet, dass sie gravitativ wechselwirkt.

Es gibt mehrere Indizien für die Existenz der Dunklen Materie. An dieser Stelle sollen kurz die prägnantesten dargestellt werden.

1. Gravitationslinseneffekt: Die allgemeine Relativitätstheorie beschreibt einen gekrümmten Raum. Eine große Masse kann den sie umgebenden Raum so stark krümmen, dass er für Photonen wie eine Linse wirkt. Anhand der Stärke der Linse lassen sich Rückschlüsse auf die sie verursachende Masse machen. Die experimentelle Beobachtung des Gravitationslinseneffekts galt als experimentelle Bestätigung der allgemeinen Relativitätstheorie und gibt heutzutage Hinweise auf die Dunkle Materie. Es zeigt sich nämlich, dass im Universum Gravitationslinsen existieren, die viel stärker sind, als man vermuten würde, wenn man nur luminöse Materie als Ursache der Linse in Betracht zieht (siehe Abbildung 6).

2. Rotationsgeschwindigkeit in Spiralgalaxien: In Spiralgalaxien bewegen sich Sternensysteme um das Zentrum der Galaxie. Die luminöse Materie einer solchen Galaxie befindet sich hauptsächlich im Zentrum. Für Sterne im äußeren Bereich bedeutet das

$$v \sim \frac{1}{\sqrt{r}}, \quad (7)$$

wobei v die Orbitalgeschwindigkeit der Sterne und r der Radius ihrer Umlaufbahn um das Zentrum der Galaxie ist (vereinfacht wird in guter Näherung eine kreisförmige Bewegung angenommen). Die Beziehung folgt, wenn man die Zentrifugalkraft und Gravitationskraft, die auf die Sterne wirkt, gleichsetzt. Experimentelle Messungen zeigen allerdings, dass v im äußeren Bereich ungefähr konstant ist. Das lässt sich nur mit einer nicht-luminösen Materieverteilung erklären, die nicht wesentlich auf das Zentrum konzentriert ist.

3. Strukturbildung im Universum: Modelle zur Strukturbildung im Kosmos erfordern Dunkle Materie zur Simulation der heutigen Beobachtungen. Insbesondere zeigen Rechnungen mit Hilfe des Virial-Theorems, dass die gravitative Anziehung der sichtbaren Masse der Galaxien nicht ausreicht, um den Zusammenhalt großer Galaxienhaufen (Cluster, die aus tausenden von Galaxien bestehen) zu gewährleisten.

5. Anisotropien der Mikrowellenhintergrundstrahlung: Wie bereits im Kapitel über die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung erwähnt, lassen sich mit Hilfe der Anisotropien Aussagen über die Energie/Materie-Verteilung des Universums machen. Das Ergebnis der Auswertung der Daten ist, dass das Universum zu ungefähr 30% aus Materie besteht ($\Omega_M \approx 0,3$). Die sichtbare Materie liefert aber nur einen Anteil von ungefähr 5% ($\Omega \leq 0,16$). Das bedeutet, dass 25% der Materie im Universum aus noch nicht bekannter „Dunkler Materie“ bestehen muss.

In der Vergangenheit wurden viele Kandidaten für Dunkle Materie untersucht. Die aktuellste Forschung konzentriert sich auf die Detektion eines unbekanntes Teilchens, das bisher noch nicht entdeckt wurde, weil es ausschließlich gravitativ und schwach wechselwirkt, das sogenannte WIMP (für Weak Interacting Massive Particle).

3.3 Dunkle Energie

Im Kapitel über die Expansion des Universums wurden die drei kosmologischen Modelle geschildert. Sie beruhen auf der Lösung der Einsteinschen Feldgleichung durch die Robertson-Walker-Metrik unter der Annahme eines expandierenden Universums. Alle drei Modelle hatten

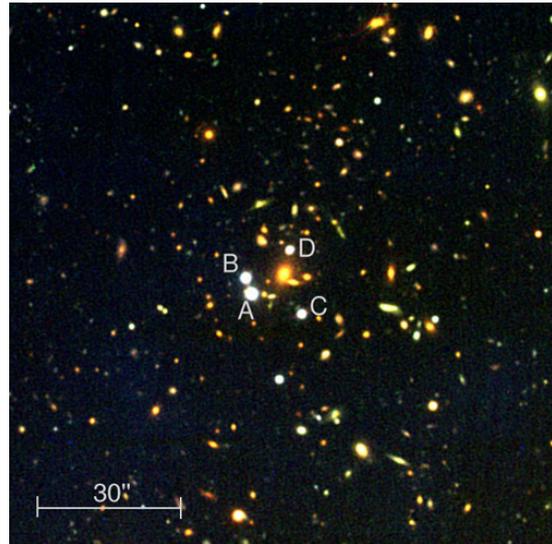


Abbildung 6: Ein 10 Milliarden Lichtjahre entfernter Quasar wird durch 6,2 Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxienhaufen vierfach in den Punkten A, B, C und D abgebildet. Die Stärke der Masse deutet auf eine viel höhere Masse, als die, die sichtbar ist, hin. [7]

eines gemeinsam, nämlich dass die Expansion abgebremst wird, was an der kontraktiv wirkenden Gravitation liegt. Erstaunlicherweise ist dies im heutigen Universum nicht der Fall. Neueste Messungen der Rotverschiebung weit entfernter Supernovae deuten auf eine beschleunigte Expansion hin (siehe Abbildung 7). Für eine gegebene Rotverschiebung liegen die Daten für die effektive Magnitude m_B , welche ein Maß für die gemessene Leuchtkraft der Supernovae ist und in direktem Zusammenhang zur Distanz der Supernovae zum Beobachter steht, über dem erwarteten Wert. Das heißt, sie sind dunkler und demzufolge weiter entfernt, als vermutet. Die einzig mögliche Erklärung ist die einer beschleunigten Expansion des Universums. Für diese Entdeckung gab es im Jahr 2011 den Nobelpreis für Perlmutter, Schmidt und Riess. Die allgemeine Relativitätstheorie verknüpft die beschleunigte Expansion mit einem negativen Druck. Die Untersuchung der Anisotropie der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung deuten auf ein nahezu flaches Universum hin. Das erfordert

$$\rho \approx \rho_c \quad \Rightarrow \quad \Omega \approx 1. \quad (8)$$

Im Kapitel über die Dunkle Materie wurde erklärt, dass die Materiedichte nur etwa 30% zur gesamten Energiedichte ausmacht ($\Omega_M \approx 0,3$). Deswegen geht man von einer unbekanntener Energieform aus, die die restlichen 70% liefert. Diese Energie nennt man Dunkle Energie, weil sie bisher nicht beobachtbar ist. Der Dunklen Energie weist man einen negativen Druck zu, so dass sie die beschleunigte Expansion erklärt.

Quantitativ lässt sich die beschleunigte Expansion auch beschreiben, indem man in den Einsteinschen Feldgleichungen die kosmologische Konstante Λ nicht gleich null setzt, wie es bei den kosmologischen Modellen gemacht wurde. Einsteins Eselei war also eventuell gar keine.

4 Zusammenfassung

Die Urknalltheorie ist die heutzutage akzeptierte Theorie zur Erklärung der Entwicklung des Universums. Sie macht richtige Voraussagen über die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung, über die primordialen Nukleosynthese und über die Ausdehnung des Universums. Die experimentellen Beobachtungen stimmen mit der Theorie überein. Außerdem ist sie kompatibel zur allgemeinen Relativitätstheorie, dem kosmologischen Prinzip und dem Standardmodell der Teilchenphysik. Deshalb spricht man auch von dem Standardmodell der Kosmologie.

Allerdings gibt es auch einige Aspekte, die bis heute noch einer Erklärung im Rahmen des Modells bedürfen. Was ist der Ursprung der Dunklen Materie? Was ist die Dunkle Energie? Und warum gibt es im Kosmos viel mehr Materie als Antimaterie? Außerdem fehlt eine quantenmechanische Beschreibung der Gravitation, so dass keine Modelle über das Universum in einer Zeit vor 10^{-43} Sekunden nach dem Urknall gemacht werden können.

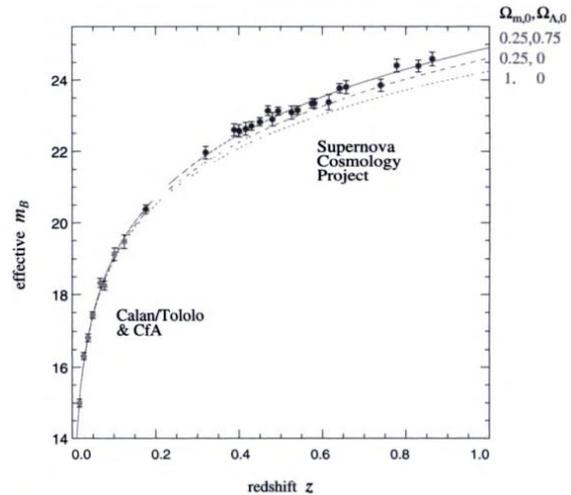


Abbildung 7: Messung der Rotverschiebung von Supernovae. Je weiter die Supernova entfernt ist (große Werte der effektiven Magnitude m_B), desto größer ist die Abweichung von den Erwartungen für eine entschleunigte Expansion (gestrichelte Linien). [4]

Literatur

- [1] Bergström, L. and Goobar, A.: 2004, *Cosmology and Particle Astrophysics*, Springer.
- [2] Edward W Kolb, M. S. T.: 1990, *The Early Universe*, Addison-Wesley Publishing Company.
- [3] ESA: 2013, Planck CMB.
URL: http://spaceimages.esa.int/Images/2013/03/Planck_CMB
- [4] Grupen, C.: 2005, *Astroparticle Physics*, Springer.
- [5] Klapdor-Kleingrothaus, H. V. and Zuber, K.: 1997, *Tielchenastrophysik*, Teubner Stuttgart.
- [6] Liddle, A.: 2003, *An Introduction to Modern Cosmology*, Wiley.
- [7] Max-Planck-Gesellschaft: 2003, Die größte kosmische Gravitationslinse.
URL: http://www.mpg.de/480676/pressemitteilung20031218?filter_order=LT&research_topic=PA-A_PA-AP
- [8] NASA: 2011, Tests of Big Bang: The CMB.
URL: http://map.gsfc.nasa.gov/universe/bb_tests_cmb.html
- [9] Perkins, D.: 2003, *Particle Astrophysics*, Oxford University Press New York.
- [10] Roose, M.: 2003, *Introduction to Cosmology*, John Wiley and Sons.