

Seminar zur Theorie der Teilchen und Felder

Beobachtbare Grundlagen der Kosmologie

(Vortrag 5. November 2014)

Raphael Heger

Inhalt

1	Geschichte	1
1.1	Antike, Mittelalter, Neuzeit	1
1.2	Moderne Kosmologie	2
2	Standardmodell der Kosmologie	2
2.1	Entwicklung des Universums	3
2.2	Evidenzen	3
2.2.1	Expansion	3
2.2.2	Primordiale Nukleosynthese	4
2.2.3	Kosmischer Mikrowellenhintergrund	5
3	Ungeklärte Phänomene	6
3.1	Baryogenese	6
3.2	Dunkle Materie	6
3.3	Dunkle Energie	7
3.4	Inflation	7
4	Zusammenfassung	8
5	Quellenverzeichnis	8

1 Geschichte

Die Beobachtung und der Versuch von Voraussagen kosmologischer Ereignisse reicht bis vor die Frühgeschichte zurück. Vor allem für die Landwirtschaft war dieses Wissen, um Voraussagen machen zu können, von Wichtigkeit. Zwei bekannte Beispiele, die die Regelmäßigkeit gewisser Phänomene dokumentieren, sind in der Abbildung zu sehen.



Abb. 1: Stonehenge (links) und die Himmelsscheibe von Nebra (rechts) [1]

In der Antike begann man diese Phänomene nicht nur zu beschreiben, sondern zu versuchen, sie zu erklären. So entstanden im Laufe der Zeit verschiedene Modelle, die das Weltbild der Menschen darstellten. Das aktuelle Modell ist das Urknall-Modell, das in guter Übereinstimmung mit vielen heutigen Beobachtungen steht aber auch noch einige Fragen offen lässt.

1.1 Antike, Mittelalter, Neuzeit

Eines der ersten Modelle beschrieb *Aristoteles* etwa 350 v. Chr. In seiner Vorstellung werden die Himmelskörper von durchsichtigen, konzentrischen Kristallkugeln, in deren gemeinsamem Mittelpunkt die Erde ist und die sich mit konstanter Winkelgeschwindigkeit drehen, getragen. Um die tatsächlichen Bewegungen der Himmelskörper relativ zur Erde beschreiben zu können, gibt es weitere, kleinere Kristallkugeln, deren Mittelpunkte auf den primären Kugeln fixiert sind, die sich ebenfalls drehen und auf denen wiederum die Himmelskörper fixiert sind. Daher wird dieses Modell Epizyklentheorie genannt. Etwa 150 n. Chr. fasste *Ptolemäus*, nach dem das entsprechende Weltbild heute benannt ist, die Ergebnisse seiner Vorgänger zusammen und etablierte dieses Modell. Die Beschreibung der Bewegungen der Himmelskörper war sogar genauer als die Keplers zu Beginn.

Eine deutliche Modifikation fand erst zum Ausgang des Mittelalters statt. *Tycho Brahe* (1546 - 1601) war am dänischen Hof und verwendete die ihm zu genüge zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel für seine astronomischen Beobachtungen. Er baute unter anderem eine Sternwarte und konnte die Position von Sternen auf zwei Bogensekunden genau bestimmen, was für die Zeit enorm war. Das von ihm entworfene Weltbild traf hingegen nicht auf viel Akzeptanz. Es war noch immer geozentrisch, doch kreisen nur Sonne und Mond um die Erde, während die übrigen Himmelskörper um die Sonne kreisen. Er machte also einen Kompromiss aus dem geozentrischen Weltbild und dem schon länger bekannten heliozentrischen Modell nach *Nikolaus Kopernikus* (1473 - 1543), das dieser im Jahre seines Todes veröffentlichte. Ausgearbeitet hatte er es schon deutlich früher, doch scheute er sich vor der Publikation bzw. deren möglichen Konsequenzen. Er sagte immer wieder, dass es lediglich eine einfachere Beschreibung ermöglichen würde, die Sonne ins Zentrum zu setzen, um das alles kreist. Dieses Verhalten ersparte ihm Ärger mit der katholischen Kirche. Auch bei der Veröffentlichung seines Werkes "De revolutionibus orbium coelestium" wurde, ohne sein Wissen allerdings, ein Vorwort hinzugefügt, in dem betont wird, dass es sich um eine rein mathematische Fiktion handele.

Dieses heliozentrische Modell übernahm *Johannes Kepler* (1571 - 1630), den Brahe, als er vom dänischen Hof nach Prag ging, traf und dem er seine Dokumente überließ. Kepler führte dann Brahes Daten und Kopernikus' Modell zusammen und erarbeitete die drei Keplerschen Gestze, die 1609 (die ersten beiden)

bzw. 1619 (das dritte) veröffentlicht wurden. Die zwei Punkte, die im Gegensatz zur Frage, ob die Erde oder die Sonne im Zentrum sei, wesentlich zur Akzeptanz beitrugen, sind die elliptische Form der Planetenbahnen und, dass die Bahngeschwindigkeit nicht konstant ist. Dieses heliozentrische Modell, das als kopernikanisches Weltbild bezeichnet wird, wollte *Galileo Galilei* (1564 - 1642) als wahre Beschreibung unseres Sonnensystems behaupten, was ihm im Gegensatz zu Kopernikus ärger mit der katholischen Kirche bereitete und letztendlich zur seiner Verurteilung führte. Auf ihn gehen aber auch viele Entdeckungen im Bereich der Astronomie, wie z. B. die der Jupiter-Monde, der Venus-Phasen, der Mondgebirge und des Sternenreichtums der Milchstraße, zurück, die er dank seiner Teleskope machen konnte.

Eine Fortführung Galileis Arbeit in verschiedenen Bereichen geschah durch *Isaac Newton* (1642 - 1727), der bei dem Versuch, die Linsenteleskope zu verbessern, auf den spektralen Charakter des Lichtes stieß. Auch im Bereich der Mechanik arbeitete er weiter. Er verband diese Erkenntnisse mit der Kosmologie und beschrieb das Prinzip der allgemeinen Gravitation

$$\vec{F} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^3} \cdot \vec{r}$$

mit der Gravitationskonstanten G in seinem Werk "Philosophia Naturalis Principia Mathematica", das im Jahr 1687 erschien. Von da an gab es eine klare Trennung von Masse und Gewicht und Phänomene wie die Tide konnten beschrieben werden.

1.2 Moderne Kosmologie

Den nächsten fundamentalen Schritt stellt die Formulierung der Allgemeinen Relativitätstheorie (1915) durch *Albert Einstein* (1879 - 1955) dar. Auf dem Fundament der Differentialgeometrie, die Riemann im 19. Jahrhundert entwickelte, beschrieb Einstein die Gravitation durch Feldgleichungen:

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

Der Ricci-Tensor $R_{\mu\nu}$ ist eine Kontraktion des Krümmungstensors. Eine weitere Kontraktion führt zum Krümmungsskalar R . Λ ist die prominente kosmologische Konstante und $T_{\mu\nu}$ der Energie-Impuls-Tensor, der wie die Metrik $g_{\mu\nu}$ schon aus der Speziellen Relativitätstheorie bekannt ist. Denn auch in der Allgemeinen Relativitätstheorie bleibt die Struktur, dass Raum und Zeit sich zur Raumzeit vereinen. Nun kann diese Raumzeit gekrümmmt sein, was wir als Gravitation wahrnehmen. Mit dieser Vorstellung lassen sich die Feldgleichungen ganz analog zum Newtonschen Gravitationsgesetz lesen. Die Gravitationskraft steht auf der linken Seite der Gleichungen und wird in der ART durch die Krümmung der Raumzeit dargestellt. Auf der rechten Seite ist die Quelle dieser Kraft. Was bei Newton die Massen sind, steckt in der realistischen Formulierung im Energie-Impuls-Tensor. Da Einstein von einem statischen Universum ausging, führte er außerdem die kosmologische Konstante ein, ohne die keine statische Lösung möglich wäre. Als sich herausstellte, dass das Universum ein expandierendes ist, bezeichnete Einstein sie angeblich als "größte Eselei" seines Lebens. Heute hat diese Konstante große Relevanz, jedoch wird sie nicht einfach wie ursprünglich als beliebiger Parameter behandelt, sondern stellt die Vakuumenergiedichte dar.

Zwei Jahre später formulierte Einstein auch das kosmologische Prinzip. Es besagt, dass das Universum sowohl homogen als auch isotrop ist, was bis heute auf den relevanten Skalen nicht widerlegt wurde.

Bereits 1927 postulierte *Georges Lemaitre* die Expansion des Universums. Mit seinen eigenen Daten untermauert veröffentlichte *Edwin Hubble* 1929 den linearen Zusammenhang zwischen dem Abstand und der Rotverschiebung extragalaktischer Objekte. Als Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen für ein expandierendes bzw. kontrahierendes Universum wurde die Robertson-Walker-Metrik (auch Friedmann-R-W-Metrik) eingeführt. Mit den in diesem Abschnitt genannten Annahmen und der Behandlung des Universums als ideales Fluid führt sie zum FLRW-Modell (Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker) des Universums.

2 Standardmodell der Kosmologie

Das Standardmodell der Kosmologie, auch Urknalltheorie, konstruiert auf Grundlage obiger Eigenschaften und den Erkenntnissen der Teilchenphysik die Entwicklung des Universums. Es ist allgemein akzeptiert, was der Übereinstimmung seiner theoretischen Erwartungen mit heutigen Messergebnissen in großer Genauigkeit und über viele Größenordnungen zu verdanken ist. Die wichtigsten dieser Stützen sind im Folgenden kurz erläutert.

2.1 Entwicklung des Universums

Im Urknall wird Energie in Form von Materie und Strahlung aus einer Singularität freigesetzt. Die Materie breitet sich aber nicht in einem leeren Raum aus, sondern die Materie "macht den Raum", der expandiert. Nach 10^{-43} s entkoppelt die gravitative von den anderen drei Wechselwirkungen und die Physik lässt sich prinzipiell mit unseren heutigen Theorien beschreiben. Die starke, die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung sind weiterhin vereinheitlicht, wofür es verschiedene Theorien gibt, die aber bisher keine experimentelle Evidenz besitzen, da die Energien in Beschleunigern nicht erreicht werden können. Außerdem befindet sich das Universum in einer exponentiell beschleunigten Ausdehnung, in der inflationären Phase, die eine starke Abkühlung mit sich bringt. Danach, nach etwa 10^{-34} s entkoppelt die starke von der elektroschwachen und danach die elektromagnetische von der schwachen Wechselwirkung, womit alle vier Grundkräfte vorliegen. Nach 10^{-10} s tritt das quark confinement ein; Quarks können also nicht mehr frei, sondern nur noch in farbneutralen Verbündungen auftreten. Dadurch entstehen die Nukleonen, mit denen ab etwa 10^{-2} s, nach Entkoppeln der Neutrinos, die Primordiale Nukleosynthese stattfindet. Nach ungefähr 380.000 Jahren ist die Energie soweit gesunken, dass die Atome stabil werden und die Photonen entkoppeln. Man sagt, das Universum wird transparent. Dies ist der Ursprung der kosmischen Hintergrundstrahlung. Ab etwa 10^9 Jahren entstehen Sterne und daraus Galaxien. Nach weiteren Milliarden von Jahren, nach dem Ableben der ersten großen Sterne, kommt es zu den ersten Supernovae und die schweren Elemente entstehen.

2.2 Evidenzen

2.2.1 Expansion

In den 1920er Jahren veröffentlichte *Hubble* seine Beobachtungen der Rotverschiebungen kosmischer Objekte. Diese war in jeder Richtung festzustellen und hing nur vom Abstand ab. Demzufolge bewegt sich alles voneinander weg; das Universum ist also in Expansion. *Hubble* selbst ging zwar zunächst nicht von einem expandierenden Universum aus, beschrieb die Rotverschiebung z aber dieser Vorstellung entsprechend als Folge des Dopplereffekts, bei dem sie sich zu

$$z = \frac{1 + \beta}{1 - \beta} - 1$$

ergibt. Die Ergebnisse führten im Jahr 1929 zur Formulierung des Hubble-Gesetzes

$$v(r) = H \cdot r ,$$

wobei r der Abstand vom Beobachter und $H = H(t)$ die Hubble-Konstante ist, deren Wert aber nur räumlich konstant ist und sich mit der Zeit ändert. Ihr heutiger Wert liegt bei $H_0 = (70 \pm 10)$ $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$. Im Zusammenhang mit der Expansion sei deutlich gemacht, dass man sich den Urknall nicht als Explosion vorstellen darf, bei dem sich die Materie von einem Zentrum aus in den Raum verteilt. Auch hier wären die Teile, die zu einem bestimmten Zeitpunkt einen größeren Abstand vom Zentrum hätten, mit größerer Geschwindigkeit unterwegs und sogar der lineare Zusammenhang zwischen Abstand und Geschwindigkeit wäre gegeben. Eine bessere Vorstellung, dimensional heruntergebrochen, ist das Aufblasen eines Ballons. Alle Punkte auf der Oberfläche bewegen sich voneinander weg. Die radiale Ausdehnung wird in der Dimensionalität der Oberfläche nicht wahrgenommen. Auch wird in diesem Bild das Fehlen von Rändern trotz endlicher räumlicher Ausdehnung deutlich. Es bewegen sich also nicht nur die Objekte voneinander weg, sondern es handelt sich um eine Ausdehnung des Raumes. Dieser Ausdehnung unterliegen auch die Photonen, weshalb die Rotverschiebung nicht rein als Dopplereffekt zu sehen ist. Die von *Hubble* beobachteten Objekte lagen allerdings so nah, dass durch diese Beschreibung kein signifikanter Fehler entstand.

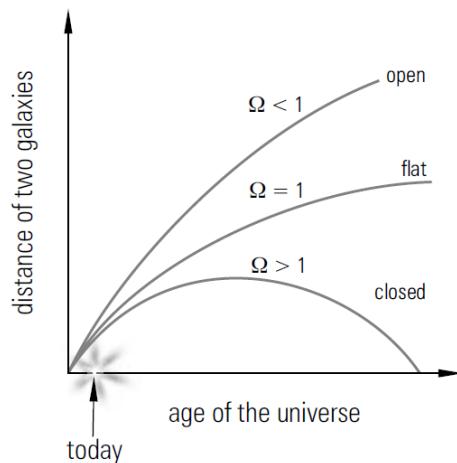


Abb. 2: Kosmologische Modelle [2]

Die gravitative Wechselwirkung, der die Materie unterliegt, wirkt der Ausdehnung entgegen und hat starken Einfluss auf das dynamische Verhalten, das man daher durch die Materiedichte charakterisieren kann. Dazu definieren wir das Verhältnis Ω der Dichte zur kritischen Dichte, bei der die Gravitation die Expansion gerade kompensiert, sie also für $t \rightarrow \infty$ zum Erliegen kommt. Ist die Dichte geringer ($\Omega < 1$), kann die Gravitation die Expansion nur bremsen, sie aber nicht zum Stillstand bringen. Ist die Dichte größer ($\Omega > 1$), wird die Gravitation sich durchsetzen und das Universum sich wieder zusammenziehen. Entsprechend diesen Fällen handelt es sich um ein flaches, offenes oder geschlossenes Universum. Graphisch dargestellt ist dies in Abbildung 2, in der schematisch die "Größe" des Universums gegen die Zeit aufgetragen ist.

2.2.2 Primordiale Nukleosynthese

Bei der primordialen Nukleosynthese (kurz BBN für Big-Bang Nucleosynthesis) handelt es sich um die Bildung der leichten Elemente im frühen Universum. Sie wird auf Grundlage der Teilchenphysik und thermodynamischer Betrachtungen des Universums rekonstruiert. Ihr Beginn liegt bei etwa 10 MeV, also 10^{-2} s, wenn die relativistischen Teilchen (zu diesem Zeitpunkt noch γ , e^- , e^+ und die drei Generationen von Neutrinos und Antineutrinos) im thermischen Gleichgewicht sind. Die Baryogenese ist schon bei etwa 20 MeV abgeschlossen. Da sie theoretisch noch nicht verstanden ist, muss das Verhältnis η von Baryonen- und Photonenzahl, das bei der Nukleosynthese eine wichtige Rolle spielt, als freier Parameter (*der* freie Parameter) angesehen werden. In thermischen Gleichgewicht der relativistischen Teilchen findet eine Umwandlung von Neutronen und Protonen ineinander mit hoher Reaktionsrate statt. Das Verhältnis dieser Teilchenzahlen ist also das Verhältnis der Boltzmann-Faktoren, wobei die Massendifferenz ($m_n > m_p$) etwa 1,3 MeV beträgt. Ist diese Reaktionsrate zu gering verglichen mit der Expansionsrate, kommt die Umwandlung zum Erliegen. Das ist bei 0,7 MeV der Fall und das Verhältnis von Neutronen zu Protonen ergibt sich zu ungefähr 0,16. Protonen und Neutronen können nun zu Deuteronen fusionieren, die eine Bindungsenergie von 2,2 MeV haben. Durch Photonen dieser oder höherer Energie werden sie aber wieder zerstört. Da es sich bei der Photonenergie um eine Planck-Verteilung mit einem starken Ausläufer bei hohen Energien handelt und die Photondichte deutlich höher als die der Baryonen ist (Faktor 10^9), erliegt der Zerfall der Deuteronen erst bei etwa drei Minuten nach dem Urknall bei etwa 0,085 MeV. Bis zu dieser Zeit sind einige Neutronen, die frei nicht stabil sind und eine Halbwertszeit von ungefähr 886 haben, zerfallen und das Verhältnis von Neutronen zu Protonen beträgt nun etwa 0,13. Unter diesen Bedingungen beginnt die Fusion der Nukleonen, die die folgenden paar Minuten beansprucht, bis näherungsweise alle Neutronen, die nicht zerfallen, in ^4He gebunden sind. Dies geschieht, indem entweder das Deuteron mit einem Neutron zu ^3H fusioniert, das mit einem weiteren Proton zu ^4He reagiert, oder das Deuteron mit einem Proton ^3He baut, das ein weiteres Neutron einfängt. Vernachlässigt man als erste Näherung die Bindungsenergie erhält man mit $n(^4\text{He}) = n(n)/2$ einen Massenanteil des ^4He im Universum von 23 Prozent. Dies kommt dem Ergebnis genauerer Berechnungen sehr nahe und entspricht einem Teilchenzahlverhältnis von ^4He zu H von etwa sechs Prozent. Es entstehen auch andere leichte Kerne, deren Häufigkeit relativ zu H in Abbildung 3 als Funktion des Baryonen zu Photonen-Verhältnisses η aufgetragen ist. Diese Voraussagen, die sich über viele Größenordnungen erstrecken, stimmen

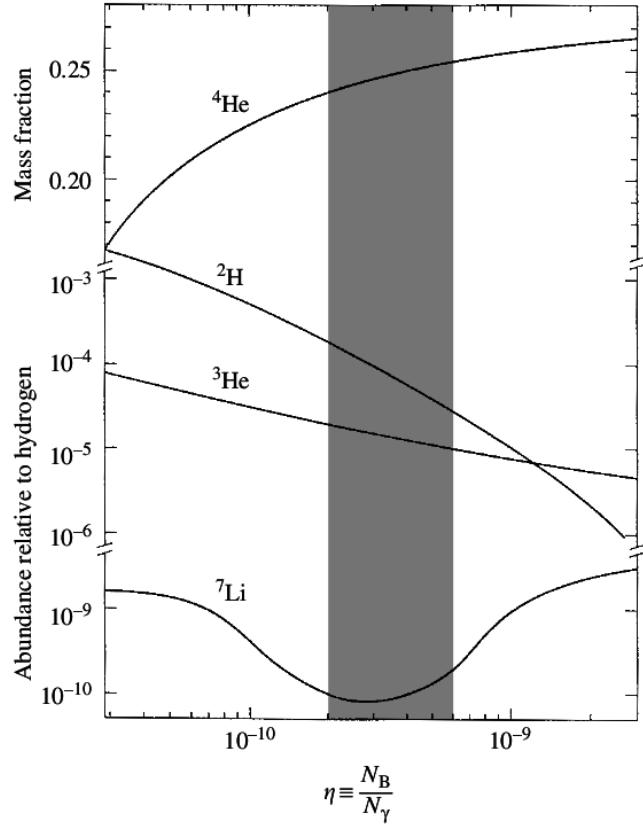


Abb. 3: Häufigkeit leichter Elemente [3]

mit großer Genauigkeit mit den heutigen Beobachtungen überein und grenzen den Wertebereich von η ein. Alle schwereren Elemente, bis hin zum Eisen, entstanden viel später in Sternen, noch schwerere in Supernovae.

2.2.3 Kosmischer Mikrowellenhintergrund

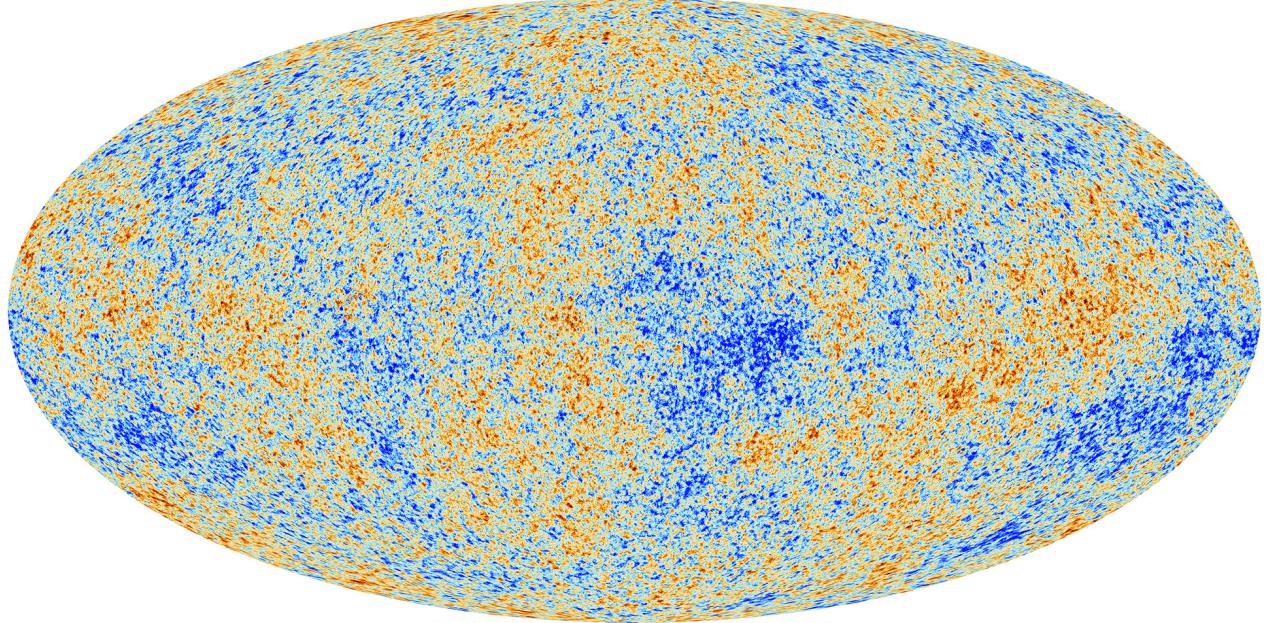


Abb. 4: CMB von Planck [4]

Bereits 1948 sagten *Gamow, Alpher* und *Herman* den Strahlungshintergrund voraus. Seine Entstehung liegt bei etwa 380.000 Jahren nach dem Urknall, als die Photonen von der Materie entkoppelten, da die Energie soweit gesunken war, dass Atome stabil waren. Mit der Photonenenergie der Phase des Entkoppelns, die einer Verteilung gemäß des Planckschen Strahlungsgesetzes genügt, und der Rotverschiebung, die sich aus der Zeitdifferenz zu heute ergibt, ließ sich das heutige Spektrum des Hintergrundes, das einer Temperatur von etwa 2,7 K entspricht und im Mikrowellenbereich liegt (daher der Name), voraussagen.

Tatsächlich nachgewiesen wurde er im Jahre 1964 durch *Penzias* und *Wilson* (Nobelpreis 1978), nachdem er bei bestimmten Wellenlängen (bspw. 33 cm, *Le Roux*; 3,2 cm, *Shmaonov*) bereits gemessen, aber aufgrund von Unkenntnis der Voraussage verkannt wurde. *Penzias* und *Wilson* verwendeten die gleiche Antenne wie zuvor *Ohm*, der die Signale des Hintergrundes als Rauschen abtat.

Die neuste Vermessung der Hintergrundstrahlung (kurz CMB für Cosmic Microwave Background) ist in Abbildung 4 zu sehen. Die Mission wurde von der ESA durchgeführt und die Messung, die 2009 begann, geschah mit der Raumsonde Planck. Zuvor gab es bereits zwei Missionen von der NASA. Es handelt sich um die Messungen durch den COBE-Satelliten (1989-1993) und die Raumsonde WMAP (2001-2010). Die hier abgebildeten Daten enthalten bereits Korrekturen. Zunächst wurde die starke Störung durch die Milchstraße, die entlang der großen Achse verläuft, abgezogen. Weitere Anisotropien lassen sich erst im mK-Bereich finden.

Sie röhren von Relativbewegung der Erde zum Hintergrund und werden aufgrund der daraus resultierenden Charakteristik Dipolanisotropie genannt. Die übrigen, in der Abbildung zu sehenden Anisotropien

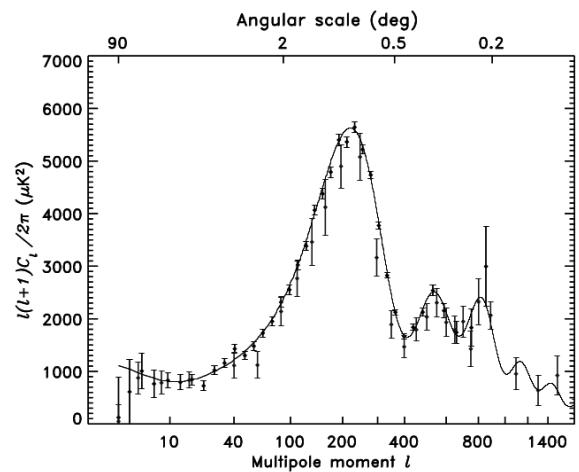


Abb. 5: Leistungsspektrum der CMB (WMAP)[5]

liegen im Bereich von μK . Ihre Ursache liegt in Dichteschwankungen des frühen Universums. Es wird als schwingungsfähiges System betrachtet und die Anisotropien nach Multipolmomenten entwickelt. Das entsprechende Leistungsspektrum zeigt Abbildung 5. Hierzu werden die Daten des CMB nach Kugelflächenfunktionen $Y_{lm}(\theta, \phi)$ entwickelt. Da es keine ausgezeichnete Achse gibt, kann man gleiche l zusammenfassen. Die Peaks entsprechen "akustischen" Oszillationen. Aus der Lage des Peaks mit dem geringsten Multipolmoment, hier also etwa 200, lässt sich die Krümmung k bzw. die Gesamtdichte berechnen zu $\Omega_{\text{tot}} = 1,02 \pm 0,02$ ($k \approx 0$). Oszillationen höherer Ordnungen sind durch die sogenannte Silk-Dämpfung unterdrückt. Das Verhältnis vom zweiten Maximum zum ersten ist ein Maß für den Anteil Ω_B der Materie, die elektromagnetisch mit den Photonen wechselwirkte, also der baryonischen Materie. Bezieht man das gesamte Spektrum ein, erhält man ein Maß für den Anteil Ω_m der gesamten gravitativ wechselwirkenden Materie. Die Werte ergeben sich zu $\Omega_B = 0,041 \pm 0,002$ und $\Omega_m = 0,257$, sodass der Anteil Ω_{DM} Dunkler Materie über zwanzig Prozent der gesamten Energiedichte beträgt und etwa fünfmal so groß ist wie der baryonischer Materie.

3 Ungeklärte Phänomene

Neben der engmaschigen Kohärenz und den vielen beeindruckend präzisen Vorhersagen gibt es auch einige Beobachtungen, die die Urknalltheorie bisher nicht erklären kann. Den wichtigsten Problemen widmet sich dieses Kapitel.

3.1 Baryogenese

Beim Urknall werden Materie und Antimaterie gleichermaßen erzeugt. Die Welt, in der wir leben, besteht zweifelsfrei aus Materie und es gibt auch bisher keine Anzeichen dafür, dass es irgendwo im Universum Gebiete aus (überwiegend) Antimaterie gibt. Der Ursprung dieses Ungleichgewichts stellt ein großes Problem dar und ist bis heute ungeklärt. Nach dem Standardmodell der Kosmologie müsste das Verhältnis von baryonischer Materie zu Photonen gleich dem Verhältnis von antibaryonischer Materie zu Photonen sein und etwa 10^{-18} betragen. Tatsächlich liegt das Baryonen zu Photonen-Verhältnis allerdings bei etwa 10^{-9} und das Verhältnis von Materie zu Antimaterie ist größer als 10^4 . Wenn auch die Ursache dafür noch nicht geklärt ist, so veröffentlichte *Andrei Sacharow* 1967 Kriterien, die für diese Asymmetrie notwendig sind und nach ihm benannt wurden. Die drei **Sacharow-Kriterien** sind:

- Thermisches Ungleichgewicht

Im thermischen Gleichgewicht hängt die Teilchenzahl nur von der Temperatur und der Masse ab. Die Masse von Teilchen und Antiteilchen ist aber identisch, sodass sich keine Asymmetrie ausbilden könnte. Anders gesagt stünden Kreation und Annihilation im Gleichgewicht.

- Baryonenzahlverletzung

Baryonenzahlverletzende Prozesse sind in GUTs (grand unified theories) enthalten. Diese versuchen, die starke und die elektroschwache Wechselwirkung zu vereinheitlichen. Experimentelle Evidenzen gibt es aber bisher für keine solcher Theorien, da die betrachteten Energien in Beschleunigern noch nicht erreicht werden können.

- C- und CP-Verletzung

Die Symmetrieverletzung unter Ladungskonjugation (C, für charge) und Ladungskonjugation und Parität (räumliche Inversion) sind im Standardmodell der Teilchenphysik enthalten. Die beobachtete CP-Verletzung ist allerdings zu klein, um die Baryonenasymmetrie zu erklären.

3.2 Dunkle Materie

Die Analyse des Leistungsspektrums nach Multipolmomenten der Mikrowellenhintergrundstrahlung (Abb. 5) zeigte bereits, dass über achtzig Prozent der Materie im Universum nicht baryonisch sind, also nicht elektromagnetisch wechselwirken. Diesen für uns daher nicht sichtbaren Anteil nennt man Dunkle Materie. Es gibt einige beobachtete Phänomene, die aus der gravitativen Wechselwirkung resultieren und für die eine höhere Massendichte erforderlich als sichtbar ist. Beispielsweise weist die Rotationsgeschwindigkeit in Spiralgalaxien als Funktion des Abstands vom Zentrum einen Verlauf auf, der zeigt, dass im Zentrum eine deutlich höhere Masse sein muss, als bisher beobachtet wurde. Auch durch den Gravitationslinseneffekt, also die Ablenkung von Licht durch eine hohe Masse, sieht man indirekt Materie, die direkt nicht beobachtet wird.

Aber auch die Strukturbildung generell benötigt, um zum heutigen Universum zu führen, eine Massendichte, die durch die baryonische Materie bei weitem nicht realisiert wird.

Um die Strukturbildung erklären zu können, kann man Neutrinos als Träger der "unsichtbaren" Masse ansehen. Hier ist aber eine genaue Dosierung heißer und kalter Neutrinos erforderlich, damit die Abläufe den tatsächlichen entsprechen. Eine falsche Verteilung würde zum Beispiel zu einem Top-down-Prozess führen, in dem sich erst die großen und dann die immer kleineren Strukturen bilden. Beobachtungen zeigen aber, dass erst Sterne entstanden waren und sich aus diesen dann größere Strukturen gebildet haben, dass es sich also um einen Bottom-up-Prozess handelt. Für die Erklärung anderer Beobachtungen reicht es nicht, (nur) Neutrinos als Dunkle Materie heranzuziehen. Für die nötige Masse wäre eine solche Dichte von Neutrinos erforderlich, dass es wiederum zu einem anderen Ablauf der Strukturbildung gekommen wäre. Zwar sieht der sogenannte Seesaw-Mechanismus, der einen Erklärungsansatz für die Neutrinos darstellt, auch sehr schwere Neutrinos vor, doch dieses Feld ist für sich noch nicht abgeschlossen und ist eine entsprechend unsolide Grundlage.

In einigen Modellen nimmt man neue Teilchen an, die diesen Eigenschaften, also ausschließlich der gravitativen und der schwachen Wechselwirkung, entsprechend WIMPs (weakly interacting massive particles) genannt werden. Eine vielversprechende Möglichkeit ist, hierzu Teilchen aus der supersymmetrischen Erweiterung des Standardmodells heranzuziehen, genauer das leichteste der Neutralinos, das verglichen mit den Massen der Standardmodell-Teilchen aber sehr schwer ist und stabil sein muss.

3.3 Dunkle Energie

Bei dem Vergleich von Rotverschiebung und Magnitude, als Maß der hier an kommenden Energie, entfernter Supernovae, derer gewisse Typen als "Standardkerzen" in der Astronomie verwendet werden, stellte man fest, dass die Entfernung größer ist als bei der jeweiligen Rotverschiebung erwartet. Der Schluss ist, dass sich das Universum in einer beschleunigten Expansion befindet (Nobelpreis 2011 *Perlmutter, Schmidt, Riess*). Dies widerspricht den zuvor erwähnten kosmologischen Modellen, in denen die Expansion durch die Gravitation gebremst wurde. Es muss also noch etwas geben, was die Expansion vorantreibt, die sogenannte Dunkle Energie.

Die Auswertung des CMB hat gezeigt, dass etwa 26 Prozent der Energiedichte von der Materie röhren, von denen nur ungefähr ein Sechstel von der baryonischen Materie beigetragen wird. Das bedeutet, dass deutlich über 70 Prozent Dunkle Energie sind. Es gibt verschiedene Ansätze einer Erklärung, wie bspw. die Vakuumenergie, doch bisher hat sich noch kein Modell etabliert.

3.4 Inflation

Verschiedene Probleme des Standardmodells der Kosmologie versucht man durch die Inflationäre Phase zu lösen, in der sich das Universum exponentiell beschleunigt ausgedehnt haben soll.

Dies scheint eine Lösung für das Horizontproblem zu sein, das sich dadurch auftut, dass Gebiete, die ohne diese Inflation nicht kausal verknüpft sein könnten, eine starke Korrelation aufweisen, wie wir bereits beim CMB gesehen haben. Dem Zeitpunkt seiner Entstehung entsprechen etwa zwei Grad der Entfernung, ab der kein kausaler Zusammenhang mehr existieren könnte.

Darüber hinaus gibt es das Flachheitsproblem, das darin besteht, dass $\Omega = 1$ einen instabilen Gleichgewichtszustand darstellt. Ohne die inflationäre Phase hätte $(\Omega - 1)$ zur Zeit der Primordialen Nukleosynthese kleiner als 10^{-15} sein müssen. Das ist zwar nicht unmöglich, stellt aber ein enormes fine-tuning dar, das nicht ohne weitere Erklärungen angenommen werden könnte.

4 Zusammenfassung

Als Standardmodell der Kosmologie bezeichnet man die Urknall-Theorie. Sie findet breite Akzeptanz, da es durch heutige Beobachtungen starke Evidenzen gibt. Die am weitesten zurückreichende, direkte Evidenz stellt die primordiale Nukleosynthese dar, die im Modell bei etwa 10^{-2} s nach dem Urknall beginnt und deren Voraussagen breite und sehr genaue experimentelle Bestätigung finden. Auch die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung, die bei etwa 380.000 Jahren und einer Rotverschiebung von $z = 1100$ entkoppelte, sodass sie heute etwa 2,73 K entspricht, wird in Übereinstimmung mit dem Modell beobachtet und gibt Aufschluss über wichtige Eigenschaften des Universums wie beispielsweise die Flachheit oder die Anteile von baryonischer und Dunkler Materie und Dunkler Energie.

Was diese Dunkle Materie und Dunkle Energie allerdings genau sind, blieb bisher unerklärt. Eine weitere offene Frage ist die nach dem Ursprung der Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie. Sakharov hat die Kriterien genannt, die erfüllt sein müssen, damit sie sich ausbilden konnte. Auch die Phase der Inflation ist im Standardmodell nicht erklärt. Sie wird gefordert wegen Problemen, die sich aus der Flachheit des Universums und der Korrealtion kausal nicht verbundener Bereiche des Universums ergibt.

5 Quellenverzeichnis

Literatur

- Kolb, E., Turner, M.: 1990, The Early Universe, Addison-Wesley Publishing Company.
Perkins, D.: 2009, Particle Astrophysics, Oxford University Press.
Grupen, C.: 2005, Astroparticle Physics, Springer.

Abbildungen

- [1]: <http://deltiolog.files.wordpress.com/2012/03/unesco-stonehenge.jpg>
<http://www.unesco.de/8003.html>
- [2]: Grupen, C.: 2005, Astroparticle Physics, Springer, S. 185.
- [3]: Perkins, D.: 2009, Particle Astrophysics, Oxford University Press, S. 145.
- [4]: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck_CMB
- [5]: Grupen, C.: 2005, Astroparticle Physics, Springer, S. 239.