

Karl Lanius

## **Kosmologie im Wandel**

Im Jahre 1913 wurde Albert Einstein zum Ordentlichen Mitglied der Preussischen Akademie der Wissenschaften gewählt. Im darauf folgenden Jahr erfolgte seine Übersiedlung nach Berlin. Im November 1915 legte er der physikalisch-mathematischen Klasse der Akademie die Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie vor, einer Verknüpfung von Raum und Zeit mit dem Gravitationsfeld. Sie beruht auf der Forderung nach Invarianz der Naturgesetze gegenüber beliebigen Transformationen. Die Struktur der Raum-Zeit ist nicht mehr ein fest vorgegebener Bezugsrahmen. Sie wird durch die vorhandenen Massen und Energien bestimmt. Die allgemeine Relativitätstheorie ist eine Theorie der vierdimensionalen raum-zeitlichen Welt, in der Massenkonzentrationen eine Krümmung der Raum-Zeit hervorrufen. Die Geometrie des dreidimensionalen Raumes ist nicht mehr euklidisch und die Zeit verläuft in verschiedenen Raumpunkten unterschiedlich. Ein Beobachter nimmt die Bewegung von Objekten als Bewegung auf gekrümmten Bahnen im dreidimensionalen Raum mit variierenden Geschwindigkeiten wahr.

Bereits im Februar 1917 trug Einstein in der physikalisch-mathematischen Klasse seine „Kosmologischen Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie“ vor, eine Arbeit, die das Akademiemitglied Otto Heckmann auf der Festveranstaltung der Akademie zum 100. Geburtstag Einsteins im März 1979 als „die Quelle aller späteren Entwicklungen bezeichnete“.

Um die Arbeit Einsteins würdigen zu können, möchte ich an den Stand der astronomischen Beobachtungen und Messungen zu Beginn des 20. Jahrhunderts erinnern. Lassen wir zwei vormalige Akademiemitglieder zu Wort kommen. 1904 schrieb Hugo von Seeliger, Direktor der Münchener Sternwarte an Hermann Carl Vogel, Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam zur Frage, ob Nebelflecke Teil der Milchstraße oder Welteninseln ähnlich der unseren seien: „... bisher ist keine Tatsache bemerkt worden, die dazu zwänge, in einigen der genannten Gebilde etwa Weltensysteme zu erblicken, die als unserem Sternsystem koordiniert angesehen werden müssen.“

Obwohl es abweichende Meinungen gab, und einige Astronomen in den am Himmel sichtbaren Spiralnebeln ferne Milchstraßensysteme vermuteten, stellte sich Vogel auf den Standpunkt des beobachtenden Astronomen. Er bemerkte: „Es läßt sich aber noch nicht sagen, ob diese Vermutung richtig ist, da über die Verteilung der Spiralnebel am Himmel aus Mangel an Material noch keine Untersuchungen haben angestellt werden können.“

Aus dem Studium der Entfernungen und Verteilungen von Sternhaufen schloß Harlow Shapley 1917, daß diese ein sphärisches System bilden. Noch in den zwanziger Jahren vertrat Shapley die Vorstellung von einem riesigen Milchstraßen-Universum. Die Kontroverse um die Größe des Milchstraßen-Universums fand erst nach umfangreichen Messungen der Entfernungen von Galaxien durch Edwin Hubble zum Beginn der dreißiger Jahre ihren Abschluß. In seinem Buch „The Realm of Nebula“ aus dem Jahre 1936 schrieb Hubble: „Die Nebel sind große Leuchtfeuer, die über die Tiefen des Raumes zerstreut sind ... Beobachtungen ergeben nicht den geringsten Hinweis auf ein Super-Nebelsystem. Deshalb dürfen wir für Zwecke der Spekulation den Grundsatz der Einheitlichkeit der Natur übernehmen und vermuten, daß jeder andere gleiche Teil des Universums, zufällig ausgewählt, dieselben allgemeinen Charakteristika aufweisen wird. Als eine Arbeitshypothese, die dienlich ist, bis sie zu Widersprüchen führt, können wir die Annahme wagen, daß der Bereich der Nebel das Universum ist – daß die von uns beobachtbare Region ein repräsentatives Stichprobenmuster ist und daß die Natur des Universums aus den beobachteten Charakteristika des Musters gefolgert werden kann.“

Durch Messungen Walter Baades während der Jahre des Zweiten Weltkriegs mit dem 100-inch-Teleskop auf dem Mount Wilson wurde die Ausdehnung des Universums verdoppelt und die anscheinend auffällige Größe unserer Galaxis schwand. Sie wurde eine unter vielen.

Wenn wir das Universum als das nicht erweiterbare Größte, d.h. als einen Grenzbegriff verstehen, so stellt die Kosmologie eine im Laufe der Zeit dem jeweiligen Erkenntnisstand entsprechende Beschreibung eines einmaligen Systems dar.

Jahrzehnte vor den erwähnten Entdeckungen wagte Einstein den Versuch eines kosmologischen Modells, das heute, stärker noch als vor wenigen Jahren, das Denken der Kosmologen prägt. Für Einsteins Arbeit gilt in vollem Umfang eine Anmerkung Henri Poincarés aus dem Jahre 1913: „Es ist unmöglich, das Schauspiel des gestirnten Universums zu betrachten, ohne sich zu fragen, wie es gebildet wurde: Vielleicht sollten wir warten und erst dann nach einer Lösung Ausschau halten, wenn wir die Elemente geduldig zusam-

men haben ... Wenn wir aber vernünftig wären, wenn wir ohne Ungeduld neugierig wären, hätten wir wahrscheinlich niemals die Naturwissenschaft erschaffen, und wir wären immer noch mit einer trivialen Existenz zufrieden. Der Geist hat aber gebieterisch die Lösung verlangt, lange bevor sie reif war, sogar als sie erst in schwachen Umrissen deutlich wurde – wobei wir lieber eine Lösung erraten, als sie abzuwarten.“

### **Das Einstein-Universum**

Das Einstein-Universum enthält eine gleichförmig verteilte Materie in einem gleichmäßig gekrümmten Raum. Einstein ging davon aus, daß das Universum statisch sei, sich also in einem Zustand des Gleichgewichts befinde und verbleibe. Um diesem Modellrahmen zu genügen, führte er in die Feldgleichungen ein zusätzliches Glied ein – die kosmologische Konstante  $\Lambda$  – zu der er sagte: „Ich komme nämlich zu der Meinung, daß die von mir bisher vertretenen Feldgleichungen der Gravitation noch einer kleinen Modifikation bedürfen“. Die kosmologische Konstante ist äquivalent einer abstoßenden Kraft, die der Schwerkraft entgegengewirkt.

Zum Schluß seiner Arbeit bemerkt Einstein. „Die theoretische Auffassung der tatsächlichen Welt wäre also, falls dieselbe unserer Betrachtung entspricht, die folgende. Der Krümmungscharakter des Raumes ist nach Maßgabe der Verteilung der Materie zeitlich und örtlich variabel, läßt sich aber im großen durch einen sphärischen Raum approximieren. Jedenfalls ist diese Auffassung logisch widerspruchsfrei und vom Standpunkte der allgemeinen Relativitätstheorie die naheliegendste; ob sie, vom Standpunkt des heutigen astronomischen Wissens aus betrachtet, haltbar ist, soll hier nicht untersucht werden. Um zu dieser widerspruchsfreien Auffassung zu gelangen, mußten wir allerdings eine neue, durch unser tatsächliches Wissen von der Gravitation nicht gerechtfertigte Erweiterung der Feldgleichungen der Gravitation einführen.“

In den Jahren 1922/24 veröffentlichte Alexander Friedman seine Modellvorstellungen. In den Arbeiten wird die Annahme eines statischen Universums aufgegeben. Damit wird es möglich die  $\Lambda$ -Kraft zu ignorieren.

1921 hielt Einstein in Princeton vier Vorlesungen über die Relativitätstheorie, die 1922 veröffentlicht wurden. In der Auflage von 1946 fügte er dem Text einen Anhang zur Kosmologie an. Darin ging er ausführlich auf das „kosmologische Problem“ ein: „Wir sind auf Grund der Beobachtungen am Fixstern-Himmel hinreichend davon überzeugt, daß das System der Fixsterne nicht im wesentlichen einer Insel gleicht, die in einem unendlichen leeren

Raum schwebt, daß es also nicht so etwas gibt wie einen Schwerpunkt der ganzen in der Welt befindlichen Masse materieller Substanz. Wir fühlen uns vielmehr zu der Überzeugung gedrängt, daß es, abgesehen von den lokalen Verdichtungen in Einzelsterne und Sternensysteme, eine mittlere Dichte der Materie im Raum gibt, die überall größer als null ist. Es entsteht also die Frage: läßt sich diese von der Erfahrung nahegelegte Hypothese mit den Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie in Einklang bringen?“

Das Bedenkliche an seinem Lösungsversuch aus dem Jahre 1917 sieht Einstein darin „daß man einen negativen Druck einführen muß, für welchen es keine physikalische Rechtfertigung gibt. Ursprünglich habe ich zur Ermöglichung jener Lösung statt des sogenannten Druckes ein neues Glied in die Gleichung eingeführt, welches vom Standpunkt des Relativitäts-Prinzips erlaubt ist. ...

Die Einfügung dieses Gliedes (mit der kosmologischen Konstanten  $\Lambda$ ) ist eine Komplizierung der Theorie, welche deren logische Einfachheit bedenklich vermindert. Seine Einführung kann nur durch die Notlage entschuldigt werden, welche die kaum vermeidbare Einfügung einer endlichen durchschnittlichen Dichte der Materie mit sich bringt.

Aus diesem Dilemma hat der Mathematiker Friedmann einen Ausweg gefunden.<sup>1</sup> Sein Ergebnis hat dann durch Hubbles Entdeckung der Expansion des Fixstern-Systems (mit der Distanz gleichmäßig anwachsender Rotverschiebung der Spektrallinien) eine überraschende Bestätigung gefunden.“

## Das Friedman-Universum

Grundlage des Friedman-Versuchs einer modellhaften Beschreibung des Universums sind die Hypothesen:

- In großen Maßstäben ist das Universum isotrop und homogen. Einstein faßte dieses kosmologische Prinzip 1931 in die Worte: „Alle Plätze im Universum sind gleich“.
- Die physikalischen Naturgesetze sind raumzeitlich invariant. Messungen bis in die Gegenwart belegen die Gültigkeit dieser Hypothese.

Die Annahme eines homogenen und isotropen Universums führt zu einer starken Vereinfachung der Feldgleichungen. Die Galaxien werden als Massenpunkte betrachtet. Sie sind in einem Koordinatensystem fixiert, das sich

---

1 Er hat gezeigt, daß es nach den Feldgleichungen möglich ist, eine endliche Dichte im ganzen Raume (dreidimensional aufgefaßt) zu haben, ohne die Feldgleichungen ad hoc zu erweitern. Zeitschr. f. Physik 10 (1922).

mit der Expansion bewegt. Die Änderungen ihres tatsächlichen gegenseitigen Abstands wird durch einen universellen, allein von der Zeit abhängigen Meßfaktor  $R(t)$  beschrieben. In einem homogenen und isotropen Universum hat er überall den gleichen, mit der Zeit wachsenden Wert. Die idealisierte, gleichmäßig verteilte Materie wird durch eine Dichte  $\rho(t)$  und einen Druck  $p(t)$  beschrieben.

Die Lösung der Friedman-Gleichungen für einen homogenen und isotropen Kosmos, in dem der Druck sich vernachlässigen läßt – eine Annahme, die für die Zeiten oberhalb von ca.  $10^6$  Jahre nach der Singularität bei  $t = 0$ , dem sogenannten Urknall zutrifft – läßt sich wie folgt angeben:

$$H^2 = \left( \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) + \frac{\Lambda c^2}{3} - \frac{kc^2}{R^2(t)}$$

Darin sind:  $H(t)$  die Hubble-Zahl,  $G$  die Gravitationskonstante,  $\rho(t)$  die Dichte, also die Masse (bzw. Energie) pro Raumeinheit,  $\Lambda$  die kosmologische Konstante,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $k$  der Krümmungsparameter, der zwischen den Geometrien der Modelluniversa unterscheidet.

- Ist  $k = 0$  so ist der expandierende Raum flach (euklidisch). Er ist unendlich und unbegrenzt.
- Für  $k = 1$  hat das Universum einen sphärischen expandierenden Raum. Er ist endlich und unbegrenzt.
- Für  $k = -1$  hat das Universum einen hyperbolischen expandierenden Raum. Er ist unendlich und unbegrenzt.

Dividieren wir beide Seiten der Friedman-Gleichung durch  $H^2$  und bezeichnen die Gegenwart mit  $t_0$ , so wird mit  $H_0(t_0)$  der Hubble-Konstanten:

$$1 = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_0(t_0) + \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2} - \frac{kc^2}{R_0^2(t_0)H_0^2}$$

Bezeichnet man:

$$3H_0^2/8\pi G = \rho_c$$

als kritische Dichte und führt man folgende häufig benutzte Abkürzungen ein:

$$\Omega_m = \frac{\rho_0(t_0)}{\rho_c}; \quad \Omega_\lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}; \quad \Omega_k = -\frac{kc^2}{R_0^2(t_0)H_0^2}$$

erhält man folgende einfache, dimensionslose Form der Friedman-Gleichung:

$$1 = \Omega_m + \Omega_\lambda + \Omega_k$$

Friedman ignorierte die  $\Lambda$ -Kraft. Damit entfällt  $\Omega_\lambda$ .

Je nach dem Wert der Krümmungskonstanten folgen daraus drei Typen des Modelluniversums:

- für  $\Omega_m = 1$  d.h.  $\rho_0 = \rho_c$  ist  $k = 0$  (flacher Raum)
- für  $\Omega_m > 1$  d.h.  $\rho_0 > \rho_c$  ist  $k = +1$  (sphärischer Raum)
- für  $\Omega_m < 1$  d.h.  $\rho_0 < \rho_c$  ist  $k = -1$  (hyperbolischer Raum)

Die Größen  $H_0$  und  $\Omega_m$  sind Modellparameter, die Größe, Alter, Geometrie und Expansionsrate des Universums bestimmen. Diese Parameter sind jedoch nicht berechenbar, da wir die Anfangsbedingungen eines Universums für den Zeitpunkt  $t = 0$ , den sogenannten Urknall, nicht angeben können. Wenn wir uns dem Zeitpunkt  $t = 0$  nähern, strebt der Meßfaktor  $R(t)$  gegen Null, während Hubble-Zahl und Dichte unendlich groß werden. Der Modellkosmos beginnt mit einer unendlich großen Dichte und Temperatur, einer Singularität, die wir aus den physikalischen Beobachtungen auszuschließen haben.

Da die Singularität bei  $t = 0$  ausgeschlossen werden muß, sind wir nicht in der Lage Anfangsbedingungen anzugeben. Eine eindeutige Lösung der Feldgleichungen ist daher unmöglich und eine unendliche Zahl von Universen ist möglich. Welches Universum das zutreffende ist – wenn überhaupt eins – wissen wir nicht. Wir müssen auf Beobachtungen zurückgreifen. (In diesem Zusammenhang sei daran erinnert, daß bereits vor 75 Jahren Lemaître und Eddington kosmologische Modelle mit  $\Lambda$ -Term formulierten, die zu allen Zeiten singularitätsfrei sind.)

## Die Expansion des Universums

Was wissen wir über die beiden Modellparameter? Hubble ermittelte einen einfachen Zusammenhang zwischen Galaxienbewegung und ihrer Entfernung: die Fluchtgeschwindigkeit  $v$ , mit der sich Galaxien von uns fortbewegen, ist proportional zu ihrer Entfernung  $d$ .

$$v = H \cdot d$$

Der Proportionalfaktor  $H$ , die Hubble-Zahl, gibt an, um welchen Betrag die Fluchtgeschwindigkeit wächst, gemessen in Kilometer pro Sekunde [ $\text{kms}^{-1}$ ], bei einer Zunahme der Entfernung der beobachtete Galaxie um ein Megaparsec [Mpc], d.h. 3,26 Millionen Lichtjahre.

Die Werte der Radialgeschwindigkeit werden aus der Rotverschiebung der Spektrallinien in den Spektren der Galaxien bestimmt. Ein ruhendes Objekt emittiert eine Linie der Wellenlänge  $\lambda$ . Bewegt sich das Objekt vom Beobachter weg, beobachtet er eine Verschiebung zu einer längeren Wellenlänge  $\lambda_0$ . Das Verhältnis

$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1$$

bezeichnet man als Rotverschiebung.

Licht wurde mit einer Wellenlänge  $\lambda$  von einer weit entfernten Galaxie emittiert. Zum Zeitpunkt der Emission hatte das Universum den Meßfaktor  $R$ . Nachdem es unter Umständen Jahrmilliarden unterwegs war, wird es mit seiner rotverschobenen Wellenlänge  $\lambda_0$  von einem irdischen Beobachter empfangen. Zu diesem Zeitpunkt hat das Universum den Meßfaktor  $R_0$ . Die Wellenlänge wuchs während der Zeit, die das Licht von der Quelle bis zum Empfänger brauchte, im gleichen Verhältnis wie der Meßfaktor:

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{R_0}{R}$$

Ersetzt man  $\lambda_0/\lambda$  durch  $z + 1$ , erhält man:

$$z = \frac{R_0}{R} - 1$$

Wenn also das Universum zwischen Emission und Absorption seine Ausdehnung verdoppelt,  $R_0/R$  also den Wert 2 hat, so zeigt das Licht aller Wellenlängen die Rotverschiebung  $z = 1$ .

Jede Messung der Rotverschiebung einer entfernten Galaxie gestattet uns unmittelbar festzustellen, um das Wievielfache das Universum zwischen Emission und Absorption expandierte. Um aus einer Messung der Rotverschiebung die Entfernung einer Galaxie zu bestimmen, müssen wir die zeitliche Variation von  $H$  bzw. die Wachstumsgeschwindigkeit des Meßfaktors kennen.<sup>2</sup> Wir müssen daher theoretische Annahmen über die Geometrie des Universums machen, um aus den gemessenen Rotverschiebungen auf solche Größen wie Entfernungen, Fluchtgeschwindigkeiten oder das Alter des Universums zu schließen.

---

2 Bisher haben wir die Frage der zeitlichen Konstanz der Hubble-Zahl nicht berührt. Falls es in der Vergangenheit Perioden gab, in denen die Expansion schneller (langsamer) erfolgte, so war die Hubble-Zahl größer (kleiner) als heute. Sollte  $H$  einer zeitlichen Veränderung unterliegen, müßten sich mit wachsender Entfernung der Galaxien Abweichungen im linearen Zusammenhang des Hubble-Gesetzes zeigen.

Was Hubble fand, war ein linearer Zusammenhang zwischen der Rotverschiebung und der Entfernung der Galaxie:

$$z = \frac{H \cdot d}{c}$$

Das eigentliche Problem bei der Messung von  $H$  ist nicht die Messung der Rotverschiebung, sondern die Entfernungsbestimmung der Galaxien. Dazu bedient man sich sogenannter Standardkerzen, wie Delta-Cephei-Sterne und Supernovae des Typs Ia.<sup>3</sup> Es sind Objekte, deren Leuchtkraft man genau kennt.

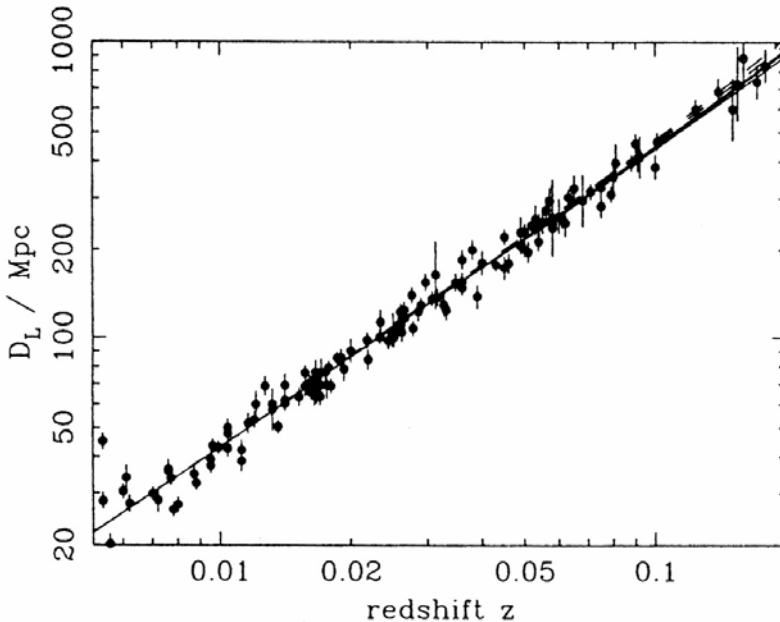


Abb. 1

- 3 Cepheiden verändern periodisch ihre Helligkeit. Zwischen der Periode und der Leuchtkraft besteht ein linearer Zusammenhang. Aus der Pulsationsperiode läßt sich die Leuchtkraft ableiten.

Supernovae des Typs Ia sind explodierende Weiße Zwerge in Doppelsystemen. Die Leuchtkraft des explodierenden Sterns wächst innerhalb kurzer Zeit auf ein Maximum, um dann wieder abzufallen. Da die freigesetzte Energie in Supernovae des Typs Ia nahezu gleich ist, zeigen sie annähernd die gleiche Variation ihrer Leuchtkraft.

Aus der scheinbaren Helligkeit der Standardkerzen kann man ihre Entfernung bestimmen, da die Helligkeit mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt.



Die wechselvolle Geschichte der Entfernungsmessungen führte bis in die neunziger Jahre zu folgenden Grenzen für die Hubble-Konstante:

$$H_0 = (50 - 100) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

Erst mit Hilfe des Hubble-Teleskops gelang in mehrjährigen Messungen die Bestimmung eines Mittelwertes:

$$H_0 = (72 \pm 8) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

Abb. 1 zeigt das Resultat der Entfernungsmessungen.

## Die Nukleonensynthese

Neben dem sicheren Nachweis der Expansion des Universums sind es zwei Beobachtungen, die die Kosmologen davon überzeugten, daß das Universum früher heißer und dichter war: die Nukleonensynthese und eine den Kosmos füllende thermische Strahlung, die 3K-Hintergrundstrahlung.

Betrachten wir zunächst die Nukleonensynthese. Beim Versuch, die Evolution des Universums zu erkennen und modellhaft abzubilden, müssen wir auf unser Wissen über den Mikrokosmos zurückgreifen. Die Nukleonensynthese ist bisher die zuverlässigste Probe des frühen Universums. Die ihr zugrunde liegenden Prozesse zwischen den Teilchen sind bekannt. In den zurückliegenden Jahrzehnten entstand eine sich stetig verstärkende Verknüpfung zwischen der Physik des Mikrokosmos und der des Makrokosmos.

Etwa eine hundertstel Sekunde nach dem Urknall sollte nach dem Friedmann-Modell das plasmaartige Teilchengemisch eine Temperatur von  $10^{11}$  Kelvin entsprechend einer Teilchenenergie von 10 Millionen Elektronenvolt haben. Das Plasma bestand aus Photonen, Leptonen, wie Elektronen ( $e^-$ ), Neutrinos ( $\nu_e$ ) und Antileptonen, wie Positronen ( $e^+$ ) und Antineutrinos ( $\bar{\nu}_e$ ).<sup>4</sup> Dabei entfielen auf rund  $10^9$  Photonen nur ein Nukleon, d.h. ein Proton oder ein Neutron. Durch Stoßprozesse fand ein ständiger Austausch zwischen Protonen und Neutronen statt. Im thermischen Gleichgewicht entstanden und vergingen gleich viele Protonen und Neutronen. Eine Vereinigung beider, z.B. zu Deuteronen konnte nur außerordentlich kurzzeitig erfolgen. Jeder gebildete Atomkern wurde genauso schnell wieder zerstört, wie er entstanden war. Zwischen allen Teilchen herrschte thermisches Gleichgewicht.

Die Geschwindigkeit, mit der die Prozesse ablaufen, hängt sehr empfind-

---

4 Als Leptonen bezeichnet man alle Teilchen, die nur der schwachen Wechselwirkung unterliegen. Zu ihnen zählen die Elektronen, die Myonen, die  $\tau$ -Leptonen, die entsprechenden Neutrinos und die zugehörigen Antiteilchen.

lich von der nach dem Standardmodell berechenbaren zeitlichen Änderung der Temperatur ab. Mit sinkender Temperatur verlangsamt sich drastisch der Ablauf aller Reaktionen. Unterschreitet die Reaktionsgeschwindigkeit einen Grenzwert, der durch die Expansionsgeschwindigkeit bestimmt wird, so verlieren die Reaktionen effektiv ihre Wirksamkeit. Nach etwa vier Minuten waren nur noch 12 Prozent aller Nukleonen Neutronen. Zu dieser Zeit ist die Temperatur auf  $0,9 \cdot 10^9$  Kelvin gesunken. Damit war die mittlere Energie der Protonen so weit gefallen, daß sie nicht mehr ausreichte, um Deuteriumkerne wieder zu zertrümmern, die sich durch Verschmelzung von Neutronen und Protonen ständig bildeten. Nach Ablauf einer Folge von Fusionsprozessen (siehe Abb. 2) sind alle freien Neutronen verschwunden.

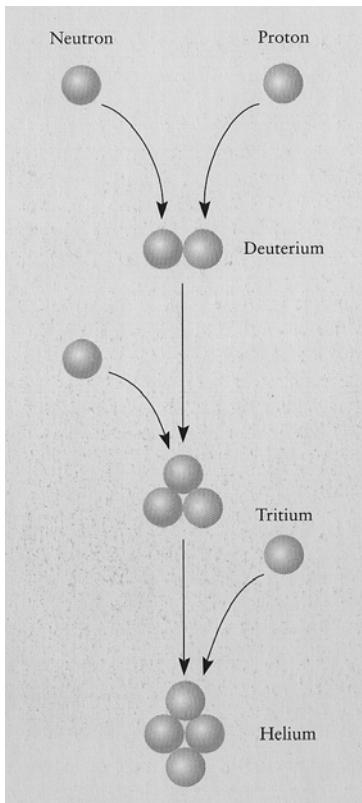


Abb. 2: Die Nukleonensynthese

Der Anteil der Neutronen zum Beginn der Synthese bestimmt den Anteil des Heliums. Die Vorhersage des Standardmodells für den Helium-Gewichtsanteil unter allen aus Nukleonen bestehenden Materieformen im Universum beträgt  $(24,0 \pm 0,5)$  Prozent.

Neben dem dominierenden Protonenanteil und dem im  $^4\text{He}$  gebundenen Nukleonen verbleibt auch ein vergleichsweise geringer Gewichtsanteil in Deuterium und  $^3\text{He}$ -Kernen. Hinzu kommt ein sehr kleiner Anteil an Li-Kernen.

Vergleicht man die Vorhersagen des Standardmodells mit den im Universum gemessenen Gewichtsanteilen von Wasserstoff, Deuterium, den Heliumisotopen und Lithium, findet man eine erstaunlich gute Übereinstimmung.

Die Häufigkeit, mit der die leichten Elemente entstanden, hängt empfindlich von der Dichte der Protonen und Neutronen – der Baryonen – ab. Im Rahmen des Friedman-Modells läßt sich ihr Wert zu  $\Omega_b \approx 0,04$  bestimmen. Nur rund vier Prozent der kritischen Dichte ist aus Baryonen gebildet. Das schließt Sterne sowie sichtbare und unsichtbare Gase ein.

## **Die 3K-Hintergrundstrahlung**

Die Vorstellung eines sich stetig abkühlenden expandierenden Universums wird durch die Beobachtung der 3K-Hintergrundstrahlung überzeugend gestützt.

Ist die sekundlich von der Flächeneinheit eines Körpers abgestrahlte Energie, seine Wärmestrahlung, gleich der vom Körper aufgenommenen Energie, befinden sich Körper und Umgebung im thermischen Gleichgewicht. Sie haben die gleiche Temperatur.

Für diesen Fall läßt sich die je Raumeinheit enthaltene Energie (bzw. die mittlere Photonenzahl) durch eine Formel beschreiben, in der nur die Temperatur  $T$  der Strahlung und ihre Wellenlänge  $\lambda$  als Veränderliche auftreten. Die Formulierung dieser Strahlungsformel gelang Max Planck im ersten Jahr des 20. Jahrhunderts. In ihr trat erstmals in der Geschichte der Physik das Plancksche Wirkungsquantum auf, eine den Mikrokosmos beherrschende fundamentale Konstante.

Bei einer Temperatur von 5 800 Kelvin, der Oberflächentemperatur der Sonne, liegt das Maximum der Strahlungsenergie bei einer Wellenlänge von  $5 \cdot 10^{-5}$  Zentimetern. Sinkt die Temperatur auf  $-270$  Grad Celsius = 3 Kelvin, liegt das Strahlungsmaximum gemäß der Planckschen Formel bei einer Wellenlänge von rund 2 Millimetern. 1964 entdeckten Robert Wilson und Arnold Penzias in New Jersey (USA) mit einer Hornantenne eine von der Beobachtungsrichtung im Raum unabhängige Mikrowellenstrahlung bei 7,35 Zentimetern. Sie müßte einer Äquivalenztemperatur von 3,5 Kelvin entsprechen, wenn es sich um einen Meßpunkt auf der Planckschen Strahlungskurve handeln sollte.

Die meisten Messungen der Folgejahre wurden auf der langwelligeren Seite der Strahlungskurve durchgeführt, da die Atmosphäre bei Wellenlängen unterhalb von 2 Millimeter immer undurchlässiger wird. Eine neue Qualität der Messung kosmischer Hintergrundstrahlung wurde mit dem Start des Cosmic Background Explorer (COBE)-Satelliten im November 1989 erreicht. Bereits nach kurzer Betriebsdauer erhielt man Daten, die mit beeindruckender Genauigkeit der Planckschen Strahlungsformel folgten (siehe Abb. 3). Die Äquivalenztemperatur ergibt sich zu  $2,728 \pm 0,002$  Kelvin. Die Messungen bestätigen die Isotropie des Raumes mit Abweichungen von weniger als 0,03 Prozent.

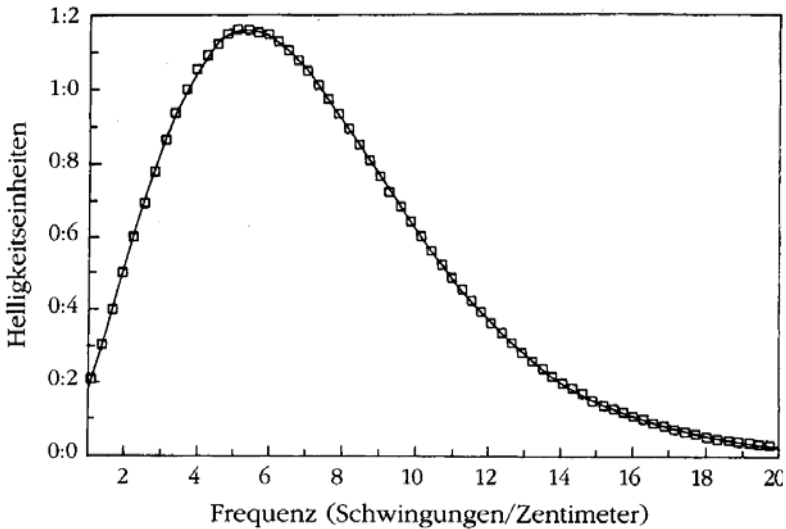


Abb. 3: Die ausgezogene Plancksche Strahlungskurve folgt mit beeindruckender Genauigkeit dem Verlauf der Meßpunkte.

Die Plancksche Strahlungsformel gilt unter Voraussetzung eines thermischen Gleichgewichts zwischen Strahlung und strahlendem Körper. Nur wenn zwischen den Photonen der Strahlung und den Körpern, z.B. den Atomen, sehr viele Wechselwirkungen stattfinden, haben Körper und Strahlung die gleiche Temperatur.

Es ist offensichtlich, daß in Gegenwart und „sichtbarer“ Vergangenheit ein thermisches Gleichgewicht zwischen Körpern und Strahlung nicht besteht bzw. bestand. Selbst von kosmischen Quellen, die mehr als 10 Milliarden Lichtjahre entfernt sind, erreicht uns das Licht beinahe unbeeinflusst. Der Bereich des Universums, den die Photonen auf ihrem langen Weg von der Quelle zum Beobachter durchleiten, ist offensichtlich so durchlässig, daß sie weder gestreut noch absorbiert wurden.

Aus der Rotverschiebung schlossen wir auf die Expansion des Universums, einen Prozeß, der mit einer stetigen Reduzierung der Substanzdichte einherging. Also muß in der Vergangenheit das Universum dichter gewesen sein.

Die phänomenologische Thermodynamik lehrt uns, daß mit einer größeren Dichte auch stets eine höhere Temperatur verbunden ist. Im frühen Universum gab es eine Periode, in der Dichte und Temperatur sehr große Werte hatten. Zwischen Strahlung und substantiellen Materieformen, wie den Elektronen, bestand ein thermisches Gleichgewicht.

In dieser Phase gab es weder Sterne noch Galaxien. Selbst Elektronen und Atomkerne konnten sich nicht zu stabilen Atomen zusammenfügen. Die den Raum homogen erfüllenden, relativ energetischen Photonen zerschlugen sich bildende Atome sofort wieder. Wegen der riesigen Zahl der sekundlich ablaufenden Stoßprozesse zwischen Photonen und Elektronen bestand ein thermischer Gleichgewichtszustand. Mit fortschreitender Expansion nahmen Dichte und Temperatur und folglich die mittlere Energie der Photonen und der Elektronen allmählich ab. Als ca. 400 000 Jahre nach dem Urknall die Temperatur schließlich rund 3000 Kelvin erreichte, hatten selbst die wenigen Photonen am kurzwelligen Ende der Planckschen Strahlungskurve nur noch Energien von einigen Elektronenvolt. Sie reichten nicht mehr aus, um Elektronen aus sich bildenden Wasserstoff- und Heliumatomen herauszuschlagen, d.h. sie zu ionisieren. Selbst zur Anregung war diese Photonenenergie nicht mehr ausreichend. Zur Anregung eines Wasserstoffatoms aus dem Grundzustand sind mindestens 10 Elektronenvolt notwendig.

Unter der Wirkung der elektrischen Anziehung zwischen positiv geladenen Atomkernen und negativ geladenen Elektronen hatten sich in dieser Periode neutrale Atome, überwiegend Wasserstoff, gebildet. Daher waren keine freien Elektronen mehr vorhanden, an denen die Photonen gestreut werden konnten. Strahlung und Substanz hatten sich entkoppelt. Die Photonen konnten sich fortan wechselwirkungsfrei durch das expandierende Universum bewegen. So behielt ihre Intensitätsverteilung die Form der Planckschen Strahlungskurve.

Die Wirkung der Expansion des Universums auf die sich ausbreitenden elektromagnetischen Wellen besteht in einem linearen Anwachsen der Wellenlänge, in einer linearen Rotverschiebung. In der Planckschen Strahlungsformel sind Wellenlänge und Temperatur einander umgekehrt proportional.

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{T}{T_0}$$

wobei  $T \approx 3000$  Kelvin die Temperatur und  $\lambda$  die Wellenlänge zum Zeitpunkt der Entkopplung und  $T_0 = 2,73$  Kelvin bzw.  $\lambda_0$  ihre gegenwärtigen Werte sind. Im Verhältnis  $T/T_0 \approx 1000$  ändert sich auch die Rotverschiebung. Das früheste Relikt der Entwicklung des Universums, das Astrophysiker bisher entdeckt haben, ist demnach die kosmische Hintergrundstrahlung mit  $z \approx 1000$ .

Verbinden wir die Beobachtung der Galaxienflucht mit Homogenität und Isotropie des Universums, gesichert durch die Hintergrundstrahlung, werden

wir zur „Urknall“-Hypothese geführt. Am Anfang der Evolution fand eine Art Explosion statt, die den gesamten Raum erfaßte. Bei der Explosion drängten nicht sich verändernde Materieformen in einen leeren Raum vor, sondern der Raum mit den sich zeitlich wandelnden Materieformen expandierte.

Ein homogenes Universum, in dem alle Orte gleichwertig sind, muß in seiner Expansion dem Hubble-Gesetz folgen. Dabei ist zu beachten, daß diese Expansion nicht mehr mit einer Expansion der Galaxien selbst verbunden ist. Sie werden durch die Schwerkraft zusammengehalten. Gleiches gilt für unser Sonnensystem, aber auch für jedes durch elektromagnetische Wechselwirkung zusammengehaltene Atom.

Das Hubble-Gesetz besagt, daß das Licht entfernter Galaxien rot verschoben ist, und diese Rotverschiebung mit wachsendem Galaxienabstand linear wächst. Hubble interpretierte seine Beobachtungen als Doppler-Effekt. So eingängig das damit verbundene Bild von uns wegrasender Galaxien auch ist, es ist falsch. Die Rotverschiebung hat ihre Ursache in der Expansion des Raumes selbst.

## Die Dunkelmaterie

Seit Jahrzehnten bemühen sich die Astronomen um die Messung der Massendichte  $\rho_0$  im Universum. Aus dem Verhältnis zur kritischen Dichte  $\rho_c$  erhält man Aufschluß über seine Geometrie. Der Zahlenwert des Dichteparameters  $\Omega_m$  bestimmt das Vorzeichen des Parameters  $k$ , der die Krümmung des Raumes charakterisiert.

Wie wir sahen, trägt baryonische Materie nur annähernd vier Prozent zum Wert der kritischen Dichte bei. Unterschiedliche Beobachtungen lassen es immer wahrscheinlicher werden, daß der weit überwiegende Teil der Materie im Universum uns, zumindest bisher, verborgen blieb. Die Astrophysiker sprechen von Dunkelmaterie. Unter dunkler Materie verstehen wir Materie, die weder leuchtet noch Strahlung absorbiert.

Eine Methode der Massenbestimmung ist die Untersuchung des Rotationsverhaltens von Spiralgalaxien. Die Rotationskurve einer Spiralgalaxie, d.h. die Variation der Rotationsgeschwindigkeit mit dem Radius erlaubt Rückschlüsse auf die Dichteverteilung der Materie. Mit hochauflösenden Teleskopen und leistungsfähigen Spektrographen wurden die Rotationsgeschwindigkeiten zahlreicher Spiralgalaxien durch Messung des Dopplereffekts ermittelt. Alle Messungen zeigen im Zentrum der Galaxie einen schnellen Anstieg der Rotationsgeschwindigkeit. Sie fällt jedoch außerhalb

des selbstleuchtenden Bereichs nicht ab, sondern verläuft annähernd horizontal weiter. Abbildung 4 zeigt als Beispiel die Rotationskurve der Zwerggalaxie M 33. Die Gültigkeit des Gravitationsgesetzes vorausgesetzt, folgt daraus ein lineares Anwachsen der Gesamtmasse einer Spiralgalaxie vom Zentrum zum sichtbaren Rand.

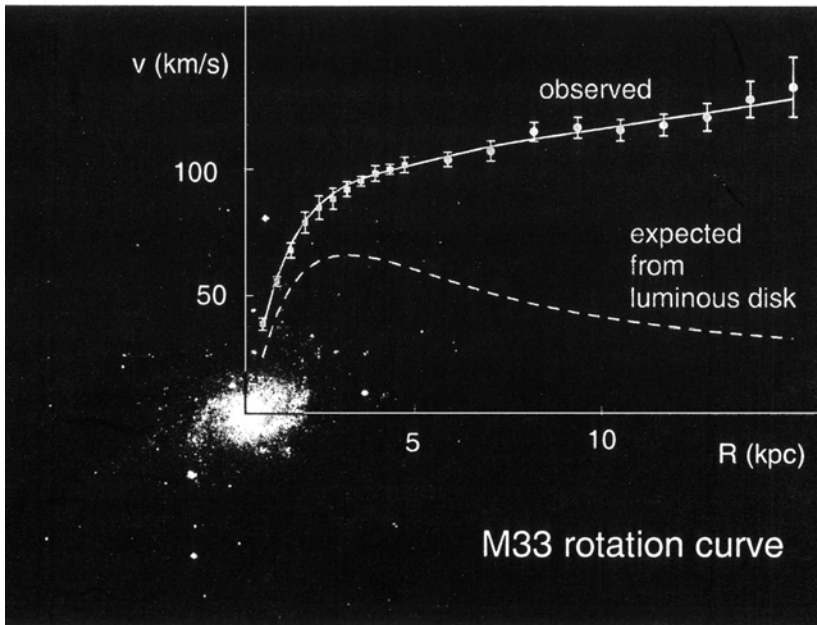


Abb. 4: Die Rotationskurve der Zwerggalaxie M33.

Betrachten wir ein zweites Beispiel zur Messung des Anteils der Dunkelmaterie: Sie beruht auf der Messung der Relativbewegungen einzelner Galaxien bzw. Galaxiengruppen in Haufen. Diese Art der Massenbestimmung setzt ein dynamisches Gleichgewicht zwischen den betrachteten Komponenten im Haufen sowie eine räumliche Verteilung der Dunkelmaterie ähnlich der des jeweils betrachteten Galaxienkomplexes voraus.

Abbildung 5 zeigt zwei Fotografien des Abell 2029-Haufens, eines in rund 1000 Millionen Lichtjahren von uns entfernter Haufens, der tausende Galaxien umfaßt. Während er auf der rechten Fotografie wie einer Ansammlung von Sternsystemen erscheint, zeigt eine Aufnahme des gleichen Gebiets mit einem Röntgensatelliten eine gewaltige kugelförmige Gaswolke, in die die Galaxien des Haufens eingebettet sind. Quelle der Röntgenstrahlung ist

ein dünnes, mehr als 10 Millionen Grad heißes Gas, das den Raum des Haufens erfüllt. Da die gemessene Temperatur ein Maß für die gravitative Anziehungskraft des Haufens ist, wenn sich dieser im Gleichgewichtszustand befindet, läßt sich daraus die Masse bestimmen.

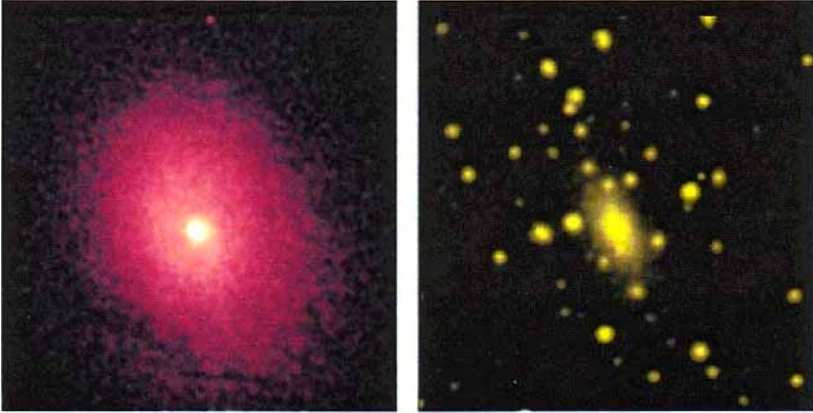


Abb. 5: Der Abell 2029-Haufen aufgenommen im Röntgenbereich und sichtbaren Licht.

Aus dem Rotationsverhalten von Spiralgalaxien, aus der Analyse von Galaxienhaufen und anderen Messungen ergaben sich einander ähnelnde Werte des Anteils an dunkler Materie. Sie entsprechen einem Dichteparameter von  $\Omega_{\text{dm}} \approx 0,25$ . Vergleicht man diesen Wert mit dem aus selbstleuchtenden Materieformen, überwiegt die Dunkelmaterie im Universum bei weitem.

Woraus diese dunkle Materie besteht, wissen wir nicht. Bisher konnten weder an Teilchenbeschleunigern noch in Detektoren der Astroteilchenphysiker Teilchen gefunden werden, wie sie beispielsweise supersymmetrische Modelle vorhersagen. Ein Kandidat dieser Modelle sind Neutralinos, nur schwach wechselwirkende Teilchen, deren Masse das tausendfache eines Wasserstoffatoms beträgt.

Kein bisheriger Versuch, einer großen einheitlichen Theorie der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen, erscheint überzeugend und, was schwerer wiegt, keine der in Verbindung damit vorhergesagten experimentell überprüfaren Konsequenzen, wie beispielsweise die Instabilität des Protons, konnte nachgewiesen werden.



## Die Expansionsbeschleunigung

Die US-Zeitschrift „Science“ erklärte im Dezember 1998 die Entdeckung der Expansionsbeschleunigung des Universums zum „Durchbruch des Jahres“.

Die neuen Beobachtungs- und Meßtechniken, die den Astronomen seit den neunziger Jahren zur Verfügung stehen, ermöglichten erstmals die Bestimmung der Leuchtkraft an geeigneten Objekten, deren Rotverschiebung zwischen  $z = 0,3$  und  $0,9$  liegt. Als geeignete Standardkerzen, die in Entfernungen von vier bis neun Milliarden Lichtjahren nachweisbar sind, erwiesen sich Supernovae des Typs Ia.

1997 und 1998 suchten zwei Forschungsgruppen nach Ia-Supernovae mit Rotverschiebungen zwischen  $z = 0,3$  und  $0,9$ . Das „high-z-team“, das Brian P. Schmidt vom australischen Siding Spring Observatory gründete, und das „Supernova Cosmology Project“ unter der Leitung von Saul Perlmutter vom Lawrence Berkeley National Laboratory in Kalifornien. Die beiden unabhängig voneinander arbeitenden Gruppen beobachteten rund 50 weit entfernte Kernexplosionen des gesuchten Typs. Übereinstimmend war der überraschende Befund: Die Helligkeit der Ia-Supernovae lag im Mittel um 25 Prozent unter den erwarteten Werten. Ein Meßresultat, das das kosmologische Standardmodell in Frage stellt.

Bevor die beiden Gruppen dramatische Schlußfolgerungen zogen, überprüften sie andere einfachere Erklärungsmöglichkeiten, beispielsweise die Frage, ob Staub längs des Lichtweges die Strahlung geschwächt haben könnte. Diese und andere Erklärungsmöglichkeiten konnten ausgeschlossen werden.

Als Konsequenz der Beobachtungen bleibt, daß die Struktur des Universums, seine Raum-Zeit, die unerwartet geringe Helligkeit ferner Supernovae bewirkt. Dabei können zwei Eigenschaften von Raum und Zeit wirksam sein:

Erstens könnte der Raum hyperbolisch sein und damit der Krümmungsparameter  $k = -1$  und der Dichteparameter  $\Omega_m < 1$ . Ein Lichtblitz aus der Frühzeit des Universums würde sich über eine größere Fläche verteilen als im Euklidischen Raum, uns also weniger hell erscheinen.

Zweitens könnte es aber auch sein, daß die Supernovae weiter von uns entfernt sind als es ihre Rotverschiebungen vermuten lassen. Das Licht mußte einen größeren Weg zurücklegen, um uns zu erreichen. Die Expansionsgeschwindigkeit in der Frühzeit des Universums war also kleiner als heute.

Die beste Übereinstimmung mit den Meßdaten zeigt eine Modellvariante mit den Parametern  $\Omega_m = 0,3$ ,  $\Omega_\lambda = 0,7$  und  $\Omega_k = 0$ . Sie läßt aber die Frage nach der Bedeutung von  $W_1 = 0,7$  offen, d.h. einer von Null verschiedenen

Einsteinschen kosmologischen Konstanten, die strukturlos ist und das Universum homogen erfüllt.

Im Universum müßte eine Energie wirken, die nicht an Massen gebunden ist und die Expansion des Universums im Laufe der Zeit beschleunigt, also eine das gesamte Universum erfüllende, zeitlich unveränderliche Vakuumenergie, eine Art Antigravitation.

Die Frage nach dieser Vakuumenergie geht zunächst an die Teilchenphysiker. Bisherige Berechnungen der Vakuumenergie mittels der Quantenfeldtheorie ergaben einen Wert, der 120 Größenordnungen über dem Wert liegt, den man bei  $\Omega_\lambda = 0,7$  erwarten sollte.

In einem bemerkenswerten Denkansatz betrachten einige Theoretiker eine zeitlich veränderliche Form der Vakuumenergie. Diese dynamische Form einer inhomogenen Dunkelenergie trägt den bezeichnenden Namen „Quintessence“. Er erinnert uns an Aristoteles. In seiner Naturphilosophie erfüllten den irdischen Raum die vier Grundelemente Erde, Wasser, Luft und Feuer, während den himmlischen Raum ein fünftes Grundelement, der Äther, – die Quintessence erfüllte.

Wuchs nun die Expansionsgeschwindigkeit von Anbeginn, oder erst seit einigen Milliarden Jahren? Mit der Advanced Camera for Survey, die 2002 am Hubble-Teleskop installiert wurde, gelang der Nachweis einiger Supernovae, die mehr als sieben Milliarden Jahre ( $z > 0,9$ ) von uns entfernt sind. Damals hatte das Universum weniger als die Hälfte seiner heutigen Ausdehnung. Supernovae in diesen Entfernungen erschienen wieder dunkler. Die Expansionsgeschwindigkeit hatte sich also zunächst verlangsamt. Der Übergang von einer Verlangsamung zu einer Beschleunigung der Expansion fand vor rund fünf Milliarden Jahren statt.

## Die Anisotropie der Hintergrundstrahlung

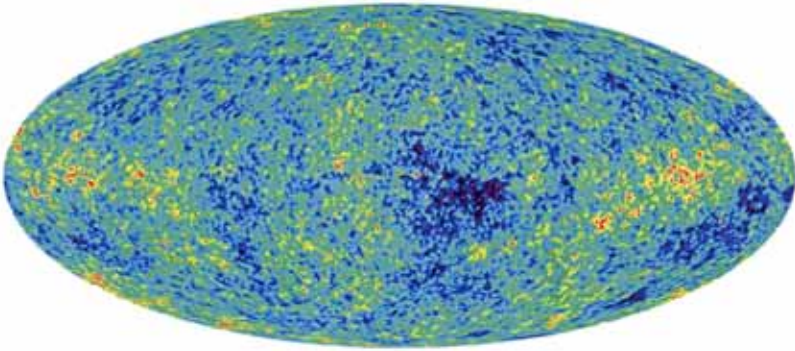


Abb. 6: Die von WMAP gemessene Mikrowellenkarte des Himmels zeigt Fluktuationen der Hintergrundstrahlung im Bereich von millionstel Kelvin. Wärmere Regionen erscheinen hell, kältere dunkel.

Wie gezeigt, ist die Hintergrundstrahlung, die wir heute sehen, eine *fast* perfekte Schwarzkörperstrahlung einer Temperatur von 2,728 Kelvin. Genaueres Hinsehen, wie es insbesondere der WMAP-Satellit (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) ermöglicht, zeigt Temperaturfluktuationen in der Größenordnung von  $10^{-5}$  Kelvin. In einem ersten, 12 Monate währenden Beobachtungszyklus, der im Juni 2001 begann, wurde der Himmel bei Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung zwischen 13 und 3 Millimetern vollständig erfasst. Die in Abb. 6 gezeigten Messungen der Strahlungsschwankungen zeigen ein Muster wärmerer und kälterer Flecken.

Bereits Peebles und Yu (Princeton) bzw. Seldowitsch und Sinajew (Moskau) sagten in den 60er Jahren vorher, daß das stark gekoppelte System – ein Plasma aus Elektronen, Protonen und Photonen – sich wie ein einziges Gas verhalten wird. Ständig stattfindende Streuungen verursachen kleine Dichteschwankungen, eine Folge geringfügiger Verdichtungen und Verdünnungen, die sich als Schallwellen fortpflanzen. Die winzigen Variationen der Temperatur lassen sich mit zufälligen, einer Gaußverteilung folgenden Fluktuationen vergleichen.

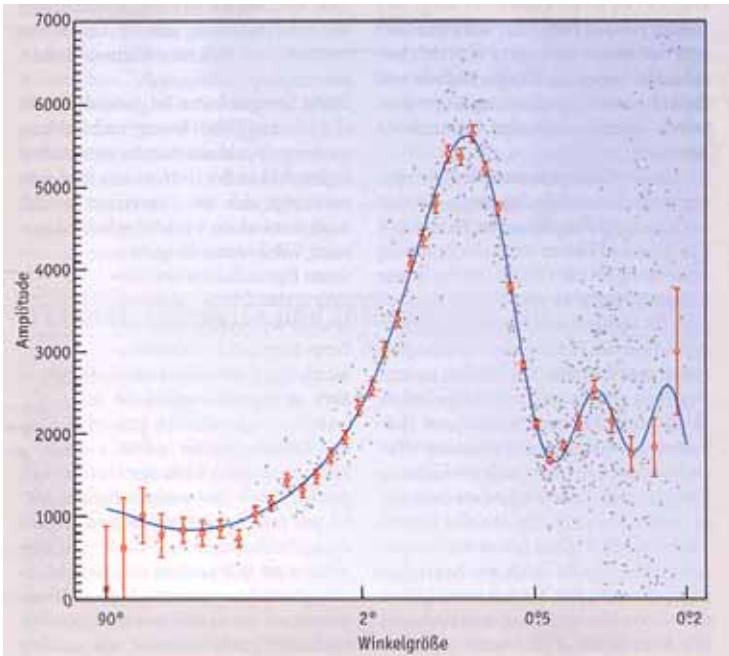


Abb. 7: Das Leistungsspektrum der Hintergrundstrahlung.

Mit der Entkopplung und der Bildung neutraler Atome wurde das Muster der Schallwellen im Strahlungshintergrund gleichsam eingefroren. Abb. 7 zeigt das mit WMAP gemessene Leistungsspektrum der Temperaturfluktuationen ( $\Delta T^2$ ) in Abhängigkeit vom Winkelintervall unter dem die Messung erfolgte. Punkte zeigen die Meßdaten, offene Kreise die abschnittsweise gemittelten Daten.

Die größte schwingende Plasmawolke wurde zum Zeitpunkt der Entkopplung von einer Schallwelle durchlaufen. Diese Grundwelle entspricht dem ausgeprägten Maximum unter rund einem Grad im Leistungsspektrum. Nachfolgende kleinere Maxima repräsentieren Obertöne, die sich Schwingungen kleinerer Plasmawolken zuordnen lassen.

Der Winkel, unter dem das Maximum der Temperaturschwankungen erscheint, wird durch die Geometrie des Universums beeinflusst. Der gemessene Wert entspricht  $k = 0$ . Die genaue Analyse ergibt  $\Omega_{\text{tot}} = \Omega_{\text{m}} + \Omega_{\lambda} = 1,02 \pm 0,02$ , d.h. das Universum ist räumlich flach.

Mit der Entkopplung schwand auch der Strahlungsdruck, der ein Fortschreiten der Verdichtungen und damit Zusammenballungen der Materie verhinderte. Erst danach konnten sich unter der Wirkung der Schwerkraft in den verdichteten Regionen, Sterne und Galaxien bilden. Die allein durch baryonische Materie ausgeübte Schwerkraft reichte jedoch nicht aus, um in der bisher verflorenen Zeit ( $z = 1100$ ) die heute unser Universum dominierenden Strukturen zu bilden. Sie hätte lediglich zu Verdichtungen im Prozentbereich geführt. Der Kosmos wäre auch heute noch nahezu gleichförmig. Erst ein dominierender Anteil dunkler Materie, die an den Wechselwirkungen im Plasma unbeteiligt war, konnte zu klumpenden Zentren führen, in denen sich die sichtbaren Strukturen bildeten.

Das Friedmann-Modell des Kosmos erforderte zwei Parameter: den Dichteparameter  $\Omega_m$  und die Hubble-Konstante  $H_0$ . Um jedoch die Meßdaten von WMAP durch ein kosmologisches Modell zu beschreiben, sind mindestens sechs Parameter erforderlich:  $H$ ,  $\Omega_b$ ,  $\Omega_{dm}$ ,  $\Omega_k$ , zwei Parameter zur Beschreibung der Amplitude der Fluktuationen und die sogenannte optische Tiefe, die ausdrückt, wann die Sternenstehung begann.

- Die Anpassung der Meßdaten erfolgt also durch ein kosmologisches Modell mit folgenden Eigenschaften:
- flach ( $k = 0$ )
- homogen und isotrop über große Distanzen  $\Omega_b \approx 0,04$
- erfüllt von Strahlung  $\Omega_{dm} \approx 0,26$
- $\Omega_m > 0$  und  $\Omega_\lambda > 0$   $\Omega_\lambda \approx 0,70$
- Ursprung der Hintergrundstrahlung sind skalarkonforme adiabatische Dichtefluktuation  $\Omega_k = 0$

Dieses sogenannte  $\Lambda$ CDM-Modell wird heute von den meisten Kosmologen akzeptiert. Abbildung 8 zeigt eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Meßdaten und die durch Anpassung an die Messungen gewonnenen Schlüsselparameter.

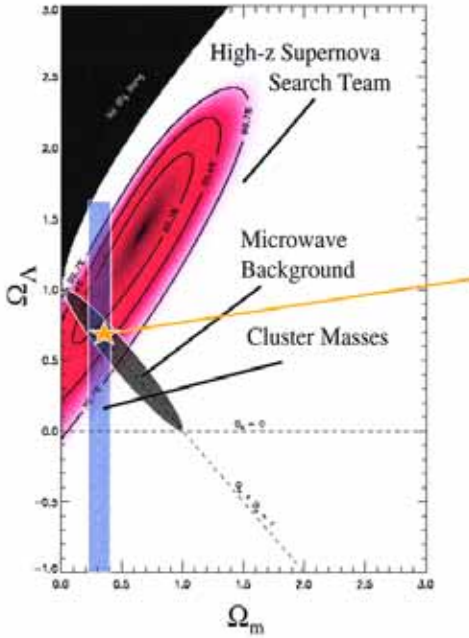


Abb. 8: Meßdaten und die daraus gewonnenen Parameter des  $\Lambda$ CDM-Modells.

Es sei jedoch betont: Diese Schlüsselparameter hängen von den Meßdaten *und* von der Parameterwahl ab. Denkbar wäre auch, daß fundamentale Naturkonstanten wie die Gravitationskonstante oder die Feinstrukturkonstante variieren.

Die Bilanz des erreichten Erkenntnisstandes überlasse ich zwei der prominentesten Kosmologen:

Zensuren für kosmologische Hypothesen		
Hypothese	Note	Bemerkungen
Das Universum entwickelte sich aus einem heißen, dichten Anfangszustand.	+ Sehr gut	Überwältigende Beweise aus vielen Bereichen von Astronomie und Physik.
Das Universum expandiert gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie.	+ Gut	Besteht alle bisherigen Tests, aber nur wenige Tests waren streng.
In Galaxien überwiegt dunkle Materie aus exotischen Teilchen.	+ Befriedigend	Viele indirekte Hinweise, aber die Teilchen müssen noch gefunden und konkurrierende Theorien ausgeschlossen werden.
Die Masse des Universums ist größtenteils gleichmäßig verteilt; sie wirkt wie Einsteins kosmologische Konstante und beschleunigt die Expansion.	- Ausreichend	Passt gut zu neuesten Messungen; aber die Indizien sind noch lückenhaft und theoretische Probleme ungelöst.
Das Universum machte zu Beginn eine Phase rapider Expansion durch – die so genannte Inflation.	- Mangelhaft	Elegante Theorie, aber noch ohne direkte Beweise; erfordert enorme Erweiterung der physikalischen Gesetze.

Die vorstehende Wertung in Tabellenform formulierte James Peebles, einer der Senioren der Kosmologie.<sup>5</sup>

Auf den letzten Punkt der Zensuren, den er mit mangelhaft bewertet, bin ich nicht eingegangen. In den inflationären Modellen wird eine exponentielle Expansion des Universums postuliert im Zeitintervall zwischen  $10^{-35}$  und  $10^{-33}$  Sekunden nach dem Urknall.

David Spergel leitet die Gruppe der Kosmologen, welche die Daten des Satelliten WMAP analysierte. In einem Interview sagte er:

„Was als Schwäche des Modells geradezu aufschreit, ist die Dunkle Energie und vielleicht auch die Dunkle Materie. Das Modell ist einfach, und es gibt die Beobachtungen gut wieder. Doch es enthält diese zwei Zutaten, die wir erfunden haben, genauso wie die Astronomen der Antike Epizyklen eingeführt haben, um die Planetenbewegung zu beschreiben. Dieser Teil des Modells wird scheitern.“<sup>6</sup>

Es vergingen mehr als 1000 Jahre bis die Epizyklen des Ptolemäus durch das heliozentrische Weltbild des Kopernikus ersetzt wurde. Vielleicht können wir, angesichts des gegenwärtigen Entwicklungstempos der Naturwissenschaften, eine Lösung der Probleme bis zum hundertsten Jahrestag des Einsteinschen Klassenvortrages (2017) erwarten.

5 Peebles, J. Spektrum der Wissenschaft 3 (2001) S. 40.

6 Spergel, D. Sterne und Weltraum, November 2004. S. 28.