

Spezial: Kosmologie

Astronomen entziffern das Buch der Schöpfung

GERHARD BÖRNER | MATTHIAS BARTELMANN

Die 1964 entdeckte kosmische Hintergrundstrahlung ist das älteste, bekannte Zeugnis aus dem jungen Universum. Sie enthält alle Informationen über die grundlegenden kosmologischen Größen. Jüngste Ergebnisse deuten darauf hin, dass die stärkste treibende Kraft der Expansion des Kosmos eine „Dunkle Energie“ ist, deren Natur noch völlig unklar ist.

Im vergangenen Jahrhundert wurde unser Weltbild dramatisch verändert. Auf der einen Seite führte die Quantenmechanik zu einem neuen Verständnis der elementaren Bausteine der Materie und den zwischen ihnen wirkenden Kräften. Auf der andere Seite zeigte der amerikanische Astronom Edwin P. Hubble, dass sich fast alle fernen Galaxien von uns weg bewegen und der Kosmos sich entwickelt und verändert. Die Vorstellung einer gleichmäßigen, unveränderlichen Verteilung von Sternen bis in unendliche Tiefen – ein Bild, dem zunächst sogar Einstein vertraut hatte – musste aufgegeben werden.

Ein weiterer, großer Fortschritt in unserer Kenntnis des Kosmos war die Entdeckung einer Strahlung im Mikrowellenbereich im Jahre 1964, die einer Temperatur von etwa

2,7 Kelvin entspricht. Die Entdecker Arno Penzias und Robert Wilson von der Bell Telephone Gesellschaft erhielten hierfür den Physiknobelpreis (Abbildung 1). Diese Strahlung wird als kosmische Hintergrundstrahlung bezeichnet.

Wenn alle Galaxien sich heute voneinander entfernen, müssen sie früher näher beisammen gewesen sein. Auch die Strahlung war in der Vergangenheit komprimierter und auch heißer als heute. Der Schluss scheint nahezu zwangsläufig, dass die kosmische Entwicklung in einem heißen, dichten Frühzustand begonnen hat, in dessen Gluthitze die Galaxien und Sterne nicht bestehen konnten, sondern in dem alles in ein Gemisch aus Strahlung und Materie aufgelöst war.

Dieses heiße Urknallmodell ist zum Standardmodell der Kosmologie geworden [3]. Seine mathematische Darstel-

lung findet es in einfachen Lösungen der Einsteinschen Gravitationstheorie, die hervorragend zu den vielen, teilweise recht präzisen Beobachtungen passen.

Die kosmologischen Modelle

Die aus der Hintergrundstrahlung erschlossene Gleichförmigkeit der Welt zusammen mit der allgemeinen Expansion legen eine einfache Interpretation nahe. Sie geht auf die Forscher Alexander Friedmann und George Lemaître zurück, die als erste diese Lösungen aus Einsteins Gravitationstheorie ableiteten. In diesen Friedmann-Lemaître-Lösungen wird die Expansion als das Auseinanderfließen einer idealisierten, gleichmäßig verteilten Materie aufgefasst, die durch homogene Dichte $\rho(t)$ und Druck $p(t)$ beschrieben wird. Die Flüssigkeitsteilchen, die man sich in diesem Bild als repräsentativ für die Galaxien denken kann, schwimmen in der sich ausdehnenden kosmischen Materie. Ihr Abstand vergrößert sich mit der Zeit mit dem so genannten Expansionsfaktor $R(t)$.

Die Expansion kann ohne Ende immer weiter gehen, oder sie erreicht ein Maximum und kehrt sich danach in eine Kontraktion um (Abbildung 2). Das unterschiedliche Verhalten von $R(t)$ wird festgelegt durch die Energiedichte von Materie, Strahlung und anderen möglicherweise vorhandenen Komponenten. Die Rate der Expansion zum jetzigen Zeitpunkt t_0 ist eine zentrale kosmologische Größe. Man nennt sie Hubble-Konstante

$$H_0 = \left. \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \right|_{t=t_0}$$

Physikalische Größen zum heutigen Zeitpunkt sind mit dem Index 0 gekennzeichnet. Der gemessene Wert von $H_0 = 68 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ bedeutet, dass die Expansionsgeschwindigkeit pro 3,26 Millionen Lichtjahre um 68 km s^{-1} zunimmt ($1 \text{ Mpc} = 3,26 \cdot 10^6 \text{ Lichtjahre}$).

Die Lichtausbreitung in den Friedmann-Lemaître-Modellen erfolgt auf folgende Weise: Ein Stern beispielsweise sendet ein Photon zum Zeitpunkt t_e aus. Durch die Expansion des Raumes wird die Welle gedehnt, was sich in einer Verschiebung der Wellenlänge dieses Photons zu größeren Wellenlängen äußert. Die Astronomen nennen dieses Phänomen Rotverschiebung z . Ein Photon, das beim Empfänger zur Zeit t_0 ankommt, hat eine Rotverschiebung von

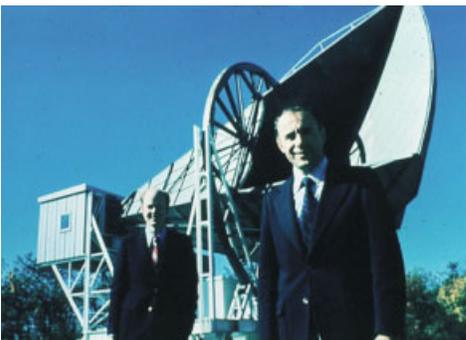
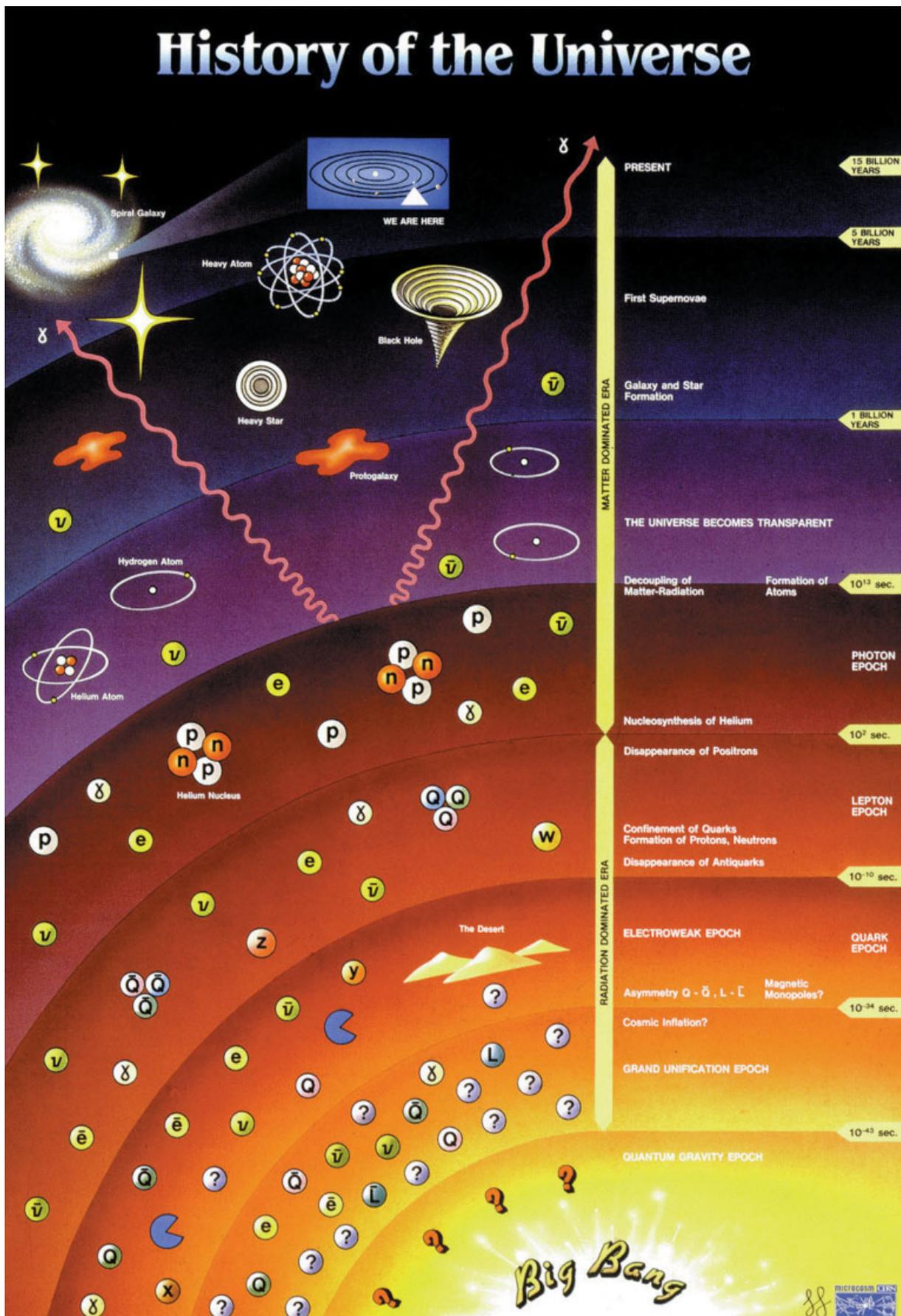


Abb. 1. Arno Penzias und Robert Wilson vor der Antenne, mit der sie die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckten.



Die wichtigsten Epochen in der Geschichte des Universums. Die kosmische Hintergrundstrahlung entstand etwa 300 000 Jahre oder 10¹³ Sekunden nach dem Urknall (Graphik: CERN).

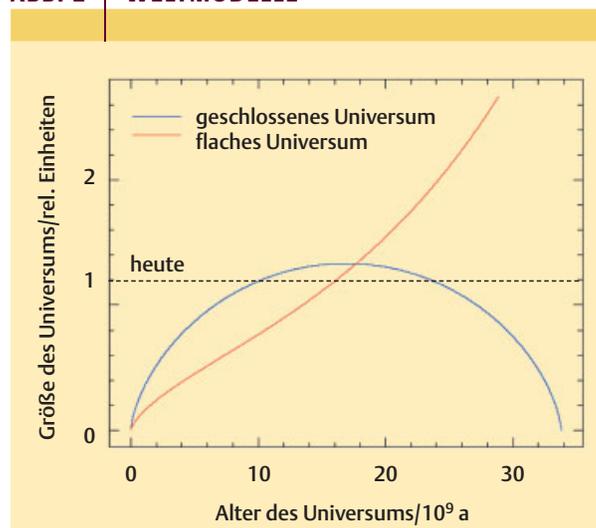
$$z = \left[1 + \frac{\dot{R}_0}{R_0} (t_0 - t_c) \right] - 1 = H_0 \cdot d$$

erfahren. Die Rotverschiebung hat demnach einen ganz anschaulichen Hintergrund: Misst man in einem Galaxienspektrum beispielsweise eine Rotverschiebung von $z = 1$, so bedeutet dies, dass das Universum zu der Zeit, als das Licht ausgesandt wurde, halb so groß war wie heute (Abbildung 3). Zu welcher Zeit dies geschehen ist, lässt sich genau jedoch nur berechnen, wenn alle kosmologischen Parameter und somit das Weltmodell bekannt sind. Für kleine Zeitabstände ($t_0 - t_c$) ergeben die linearen Entwicklungsglieder von $R(t_c)$ gerade die einfache lineare Hubble-Beziehung, falls die Entfernung $d = c(t_0 - t_c)$ gesetzt wird. (Hier ist die Lichtgeschwindigkeit $c = 1$ gesetzt, das heißt wir geben die Geschwindigkeit als Bruchteil von c an.) Diese lineare Beziehung spiegelt Hubbles Beobachtungsergebnisse wider, wonach die „Fluchtgeschwindigkeit“ der Galaxien, die uns verhältnismäßig nahe sind, linear mit dem Abstand zur Milchstraße wächst.

Für größere Entfernungen, entsprechend Rotverschiebungen von $z > 1$, darf man diese Beziehung jedoch nicht mehr verwenden. Sie beschreibt den Expansionsverlauf des Universums, und dieser war über das gesamte Weltalter hinweg nicht linear. Der Expansionsverlauf hängt von der mittleren Dichte im Universum und der Hubble-Konstante ab. Abbildung 2 zeigt exemplarisch zwei Fälle: Liegt die mittlere Materiedichte über einem kritischen Wert ϱ_c , so erreicht das Universum eine maximale Ausdehnung (blaue Kurve) und kontrahiert danach wieder. Andernfalls dehnt es sich immer weiter aus (rote Kurve). Nach dem heutigen Kenntnisstand beschreibt die rote Kurve unser Universum. Die Hubble-Konstante wurde in beiden Fällen auf $H_0 = 68 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ gesetzt.

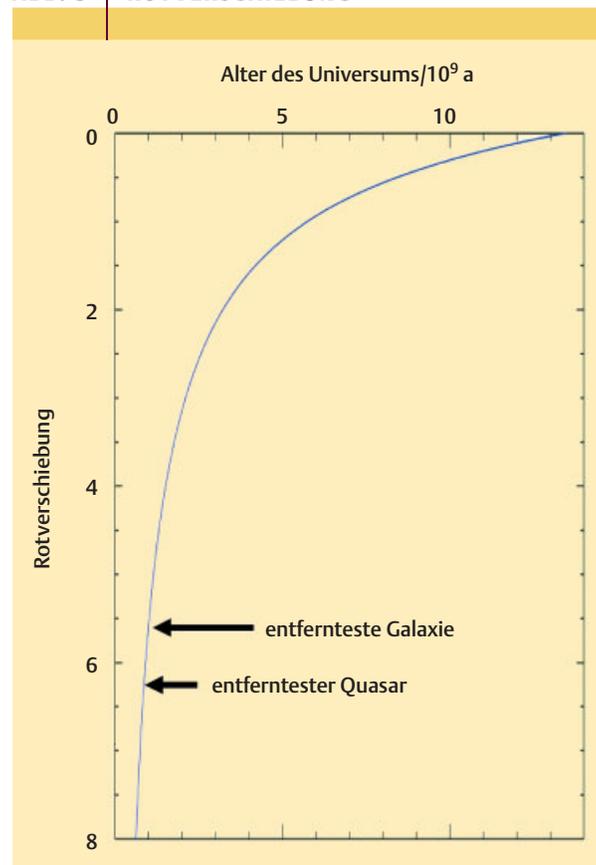
Die kritische Dichte ϱ_c trennt ein zeitlich begrenztes von einem unendlich lange expandierenden Universum. In der Kosmologie verwendet man üblicherweise das Ver-

ABB. 2 | WELTMODELLE



Entwicklung der Größe $R(t)$ des Universums als Funktion der Zeit.

ABB. 3 | ROTVERSCHIEBUNG



Die Abhängigkeit der Rotverschiebung z von der Zeit. Der genaue Kurvenverlauf hängt vom Weltmodell und dem Wert der Hubble-Konstante ab.

hältnis der kritischen Dichte zur heutigen mittleren Dichte, ausgedrückt durch den dimensionslosen Dichteparameter Ω_0 :

$$\Omega_0 = \varrho_c / \varrho_0.$$

Aus den Friedmann-Lemaître-Modellen lassen sich diese Größen ebenfalls herleiten:

$$\Omega_0 \equiv \frac{8\pi G}{3H_0^2} \varrho_0.$$

Die kritische Dichte ϱ_c ist

$$\varrho_c \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G}.$$

Man erkennt hier deutlich die zentrale Stellung der Hubble-Konstanten.

Zur Gesamtdichte tragen aber nicht nur die vorhandenen Massen bei, sondern gemäß der Relativitätstheorie auch jede andere Form von Energie. Insgesamt lassen sich diese verschiedenen Komponenten zu einer Gesamtdichte Ω addieren, wobei jede Komponente als Bruchteil der kritischen Dichte angegeben wird. Neben der normalen baryonischen Materie (Ω_B), aus der die Elemente, also alle Sterne

und wir selbst bestehen, muss es, wie verschiedene Beobachtungen zeigen, auch einen beträchtlichen Anteil nicht-baryonischer Materie geben. Sie zeigt sich aufgrund ihrer Schwerkraftwirkung und wird als Dunkle Materie Ω_{CDM} (vom englischen Cold Dark Matter) bezeichnet. Außerdem scheint es eine Energiedichte zu geben, die praktisch konstant ist, deren Natur aber völlig unklar ist. Sie wird als Ω_{Λ} bezeichnet. Auf diese rätselhaften Größen werden wir später zurück kommen.

Zu einer festen Zeit t beschreiben die Friedmann-Lemaître-Modelle einen dreidimensionalen Raum mit konstanter Gaußscher Krümmung K/R^2 , wobei es nur drei unterschiedliche Raumtypen $K = 0$ oder $K = \pm 1$ gibt. Zur jetzigen Epoche gilt $K/R_0^2 = H_0^2 (\Omega - 1)$. Für $\Omega = 1$, also in dem Fall, dass die mittlere Materiedichte gleich der kritischen Dichte ist, ist die Raumkrümmung gleich Null. Der Raum besitzt dann euklidische Geometrie.

Die Geschichte des Universums

Durch die Expansion wurden Strahlung und Materie verdünnt. Die Energiedichte der Strahlung nimmt mit R^{-4} , die mittlere Materiedichte mit R^{-3} und die Temperatur mit R^{-1} ab. Dies lässt sich durch die Rotverschiebung z darstellen: $T = T_0 (1 + z)$. Entsprechend ergibt sich für die Dichte von kalter, nichtrelativistischer Materie $\rho = \rho_0 (1 + z)^3$ und für die Energiedichte des Strahlungsfeldes $\rho_{\gamma} = \rho_{\gamma 0} (1 + z)^4$. Im heutigen Universum ist die Strahlungsdichte viel kleiner als ρ_0 , aber ρ_{γ} wächst mit rückschreitender Zeit (also in Richtung zum Urknall) um einen Faktor $(1 + z)$ schneller an. Als der Wert für $(1 + z) = \rho_0/\rho_{\gamma 0}$ bei 10^3 bis 10^4 lag, waren die Energiedichten von Materie und Strahlung gleich, und zu früheren Zeiten überwog das Strahlungsfeld sogar. Das Universum war anfangs also strahlungsdominiert.

Ausgehend vom jetzigen Zustand lässt sich mit Hilfe dieser Friedmann-Lemaître-Modelle die Geschichte des Kosmos theoretisch rekonstruieren. Es werden natürlich wegen der Homogenität der Modelle nur zeitliche Veränderungen erfasst. Schon aus diesem Grund können diese Modelle nur angenähert gültig sein.

Aus den Lösungen der Friedmann-Lemaître-Gleichungen lässt sich entnehmen (Abbildung 2), dass der Expansionsfaktor $R(t)$ vor einer endlichen Zeit gleich Null war. Bei Annäherung an diesen Zeitpunkt, beim Rückgang in die Vergangenheit also, wachsen Dichte und Ausdehnungsrate über alle Grenzen. Man kann deshalb die Entwicklung nicht weiter theoretisch zurückverfolgen, weil die Begriffe und Gesetze der Theorie ihren Sinn verlieren. Diese Anfangssingularität kennzeichnet den Anfang der Welt. Alles, was wir jetzt beobachten, ist vor 14 Milliarden Jahren in einer Urexplosion entstanden, die von unendlicher Dichte, Temperatur und unendlich großem Anfangsschwingung war.

Wir können versuchen, die Welt kurz nach dem Urknall mit der uns bekannten Physik zu beschreiben, und die zeitliche Abfolge physikalisch verschiedener Phasen darzustellen. Zur quantitativen Festlegung eines bestimmten kosmologischen Standardmodells benötigt man außer der Hub-

ble-Konstanten H_0 noch zwei Parameter. Geeignet sind der Dichteparameter Ω_0 und das Weltalter t_0 . Diese drei im Prinzip beobachtbaren Größen legen das Weltmodell einschließlich des Werts von Ω_{Λ} eindeutig fest.

Die kosmische Hintergrundstrahlung

Verfolgen wir die Geschichte des Kosmos im Rahmen der einfachen Friedmann-Lemaître-Modelle immer weiter in die Vergangenheit zurück, so sehen wir, dass in der Frühzeit im Strahlungsfeld der kos-

mischen Hintergrundstrahlung genügend viele energiereiche Photonen vorhanden waren, um alle Wasserstoffatome im ionisierten Zustand zu halten. Dies war noch der Fall, als die mittlere Strahlungstemperatur etwa 3000 K betrug. Zu dieser Zeit, etwa 400 000 Jahre nach dem Urknall (entsprechend einer Rotverschiebung von $z \approx 1100$), hatte noch etwa jedes Milliardstel Photon der kosmischen Hintergrundstrahlung eine größere Energie als die Ionisationsenergie des Wasserstoffs von 13,6 eV. Das reichte aus, um die vorhandenen Wasserstoffkerne an der Verbindung mit dem Elektron zu hindern. Die Materie bestand aus einem verhältnismäßig homogenen heißen Plasma. Sterne oder Galaxien gab es in dieser Frühphase noch nicht.

Doch bei weiterer Abkühlung infolge der Expansion entstanden in diesem heißen Urbrei allmählich erste Formen. Bei Temperaturen unterhalb von 3000 K begannen die freien Elektronen, sich mit den Atomkernen zu Wasserstoff und Helium zu verbinden. In dieser Epoche der so genannten Rekombination wurde das Universum durchsichtig, die Streuung der Photonen an Elektronen wurde stark reduziert. Dies geschah zwar in relativ kurzer Zeit, jedoch

INTERNET

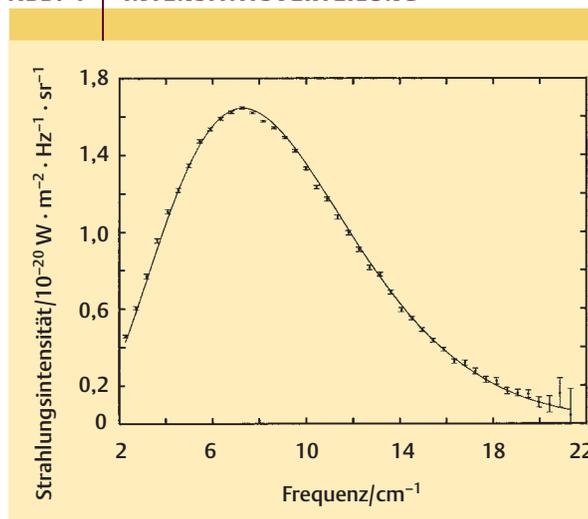
MAP
map.gsfc.nasa.gov

Planck
astro.estec.esa.nl/Planck

COBE-Mission
space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe

Boomerang
www.physics.ucsb.edu/~boomerang

ABB. 4 | INTENSITÄTSVERTEILUNG



Die Intensitätsverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung folgt exakt einer Planck-Kurve.

nicht ganz plötzlich. Zunächst bildeten sich angeregte Atome, die wiederum leicht ionisiert werden können oder selbst Photonen aussenden, die andere neutrale Atome ionisieren. Alleine ein relativ langsamer Prozess, in dem das H-Atom den Grundzustand durch die Emission von zwei Photonen erreicht, die beide zu geringe Energien haben, um weitere H-Atome zu ionisieren, führt allmählich zur Rekombination. Dieser Prozess erstreckte sich über eine Zeitdauer von etwa 40000 Jahren, entsprechend einem Rotverschiebungsintervall von $\Delta z = 80$. Die kosmische Hintergrundstrahlung ist somit für uns die älteste Kunde aus dem Universum. (Es sei hier angemerkt, dass der Begriff Rekombination etwas unglücklich gewählt ist, denn in dieser Phase entstehen zum erstenmal in der kosmischen Geschichte Wasserstoff- und Heliumatome.)

Dieses Rotverschiebungsintervall macht sich im Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung jedoch überhaupt nicht bemerkbar. Die Tatsache, dass keine Abweichung von einem Planckschen Spektrum mit einer präzisen Temperatur von $T = 2,728 \pm 0,002$ K gefunden wurde (Abbildung 4) [5], ist ein weiterer, sehr schöner Hinweis auf die Gültigkeit der einfachen kosmologischen Friedmann-Lemaître-Modelle: Die Energie $h\nu$ der Photonen und die Strahlungstemperatur T müssen auch während der 40000 Jahre dauernden Rekombinationsphase perfekt der kosmischen Expansion gemäß $h\nu \sim R^{-1}$ und $T \sim R^{-1}$ gefolgt sein. Deshalb blieben der Quotient $h\nu/kT$ und somit auch die Form der Planck-Kurve unverändert, während die Intensität der kosmischen Hintergrundstrahlung sich proportional zu T^4 verringerte.

Akustische Schwingungen im frühen Universum erstmals gemessen

Aus der kosmischen Hintergrundstrahlung lässt sich aber noch weit mehr herauslesen [1]. Bereits vor der Rekombinationszeit hatten sich wahrscheinlich in der dunklen Materie schon erste, schwach ausgeprägte Massenkonzentrationen gebildet. Das eng verkoppelte Plasma aus Photonen und Baryonen folgte diesen Kondensationen auf Grund der Gravitation. Doch dem Wunsch der Baryonen nach Zusammenballung stand der Druck der Photonen entgegen, durch den diese Plasmawolken wieder auseinander getrieben

wurden. Im Widerstreit der Kräfte begannen diese Wolken zu schwingen – ganz analog zu Schallwellen.

Die größte schwingende Plasmawolke war gerade bis zur Rekombinationszeit einmal von einer Schallwelle durchlaufen worden. Größere Wolken konnten noch keinen Gegendruck aufbauen, sondern folgten einfach der Schwerkraft und zogen sich langsam zusammen. Kleinere Wolken oszillierten mit höherer Frequenz. Alle Schwingungen waren in Phase, perfekt synchronisiert durch den Urknall. Bei der Kontraktion und Verdichtung wurde das Photonengas heißer, bei der Verdünnung, beim Auseinanderlaufen, kühlte es sich ab. Die Temperaturschwankungen lassen sich aus der Analyse adiabatischer kleiner Störungen in Friedmann-Lemaître-Modellen ableiten und können als Kosinusfunktion dargestellt werden:

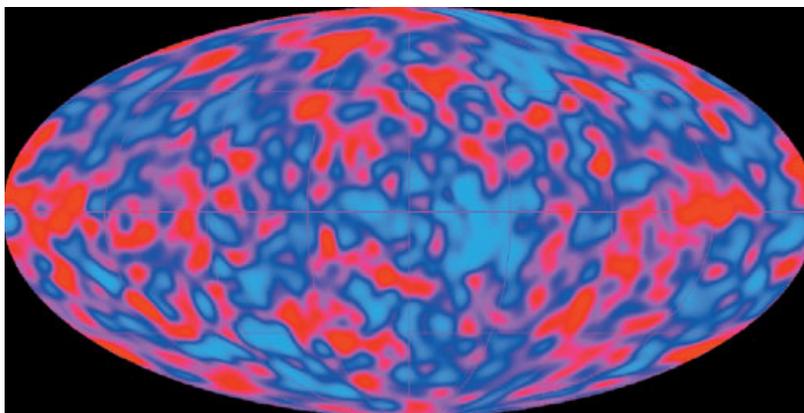
$$\Delta T = T(\eta) = \frac{1}{3} \Psi \cos(kr_s) - (1 + R_s) \Psi.$$

Dabei ist η ein Maß für die Zeit, Ψ ist das relativistische Analogon zum Newtonschen Gravitationspotential, k ist die Wellenzahl (Wellenlänge $\lambda = 2\pi/k$) und $r_s = c_s \eta$ ist der so genannte Schallhorizont. Die Schallgeschwindigkeit ist $c_s^2 = c^2/3 (1 + R_s)^{-1}$ und die Größe R_s kennzeichnet das Verhältnis der Baryonen- zur Strahlungsdichte: $3 \rho_B/4 \rho_\gamma$.

Zur Rekombinationszeit η_R verließen die Photonen, die wir heute in der kosmischen Hintergrundstrahlung wiederfinden, die Plasmawolken. Die Photonen weisen ganz geringe räumliche Temperaturschwankungen auf. Diese sind proportional zu $\cos(kr_s)$ und sollten sich als heißere und kühlere Bereiche in der Hintergrundstrahlung zeigen. Bei der Rekombinationszeit verstehen wir $\cos(kr_s)$ als Funktion der Wellenzahl k . Extrema der Temperaturschwankungen sollten bei den Werten $k = m\pi/r_s$ mit ganzzahligem $m = 1, 2, 3, \dots$ auftreten. Damit ergibt sich die einzigartige Möglichkeit, aus der Mittelung der quadratischen Temperaturmesswerte in der kosmischen Hintergrundstrahlung über verschiedene Winkelskalen Hinweise auf diese akustischen Schwankungen zu bekommen. (Üblicherweise mittelt man über die Komponenten einer Multipolentwicklung der Temperaturschwankungen in der Hintergrundstrahlung.)

Erstmals gelang es 1992 amerikanischen Astrophysikern mit dem NASA-Satelliten COBE (Cosmic Background Explorer), diese Temperaturschwankungen nachzuweisen. Auf der Himmelskarte der kosmischen Hintergrundstrahlung zeigen sich die Schwankungen in Form von „Flecken“ mit unterschiedlichen Temperaturen (Abbildung 5). Die relativen Amplituden sind mit $\Delta T/T \approx 10^{-5}$ außerordentlich gering. Die COBE-Instrumente besaßen jedoch nur eine geringe Winkelauflösung von etwa sieben Grad (entsprechend dem 14-fachen Vollmond Durchmesser). Zum Vergleich: Beim Blick auf die Erde wäre ganz Bayern gerade nur ein Messpunkt auf der COBE-Karte. Die Intensitätsschwankungen, die man als Keime für die Entstehung von Galaxienhaufen und Galaxien erwartet, zeigen sich aber erst auf Skalen von deutlich unter einem Grad.

Abb. 5. Die mit COBE gemessenen Temperaturvariationen in der kosmischen Hintergrundstrahlung (Foto: NASA).



Vor kurzem wurde der amerikanische Satellit MAP gestartet, der eine Karte des gesamten Mikrowellenhimmels mit einer Winkelauflösung von etwa 15 Bogenminuten im Wellenlängenbereich zwischen 3 mm und 1,5 cm aufnehmen wird. Der europäische Satellit Planck wird 2007 folgen. Seine Winkelauflösung wird 5 Bogenminuten erreichen, und er wird einen erheblich weiteren Wellenlängenbereich zwischen 1 cm und 0,3 mm Wellenlänge überdecken. Planck wird in der Lage sein, Temperaturschwankungen von etwa einem Mikrokkelvin zu messen. Die Winkelauflösung dieses Instruments wird erstmals dazu ausreichen, das gesamte Spektrum der akustischen Schwingungen zu überdecken.

Beide Satelliten messen nicht nur die Intensität, sondern auch die Polarisationseigenschaften der kosmischen Mikrowellenstrahlung, aus denen man zusätzliche kosmologische Informationen gewinnen können. Temperatur- und Polarisationsmessungen mit der erforderlichen Präzision sind durch neuartige Transistoren und Bolometer möglich geworden, die zum Teil auf Temperaturen von 100 mK gekühlt werden müssen.

MAP und Planck werden nicht die Erde umkreisen. Sie werden in 1,5 Millionen Kilometern Entfernung von der Erde an einem Ort positioniert, in dem sich die Gravitations- und die Zentrifugalkraft gerade aufheben, die auf die Satelliten wirken. An diesem äußeren Lagrange-Punkt ist es möglich, dass die Satelliten Erde und Sonne immer gleichzeitig im Rücken behalten können, wodurch störende Strahlung erheblich reduziert wird.

Mittlerweile ist aber ein beträchtlicher Himmelsausschnitt auch durch Ballonexperimente (Boomerang und Maxima) aufgenommen worden. Die Winkelauflösung von ungefähr 0,5 Grad reichte aus, um in der kosmischen Hintergrundstrahlung die Signale der akustischen Schwingungen zu finden [2].

Abbildung 6 zeigt das Ergebnis dieser Messungen. Bei einem Multipolindex $l = 200$, entsprechend einem Winkel von etwa einem Grad, zeigt sich ein ausgeprägtes Maximum

der gemittelten Temperaturschwankungen. Dies entspricht der größten akustischen Schwingung, der Strecke $r_s = c_s \eta$, die eine Schallwelle vom Urknall bis zur Rekombinationszeit zurücklegen konnte.

Diese Länge ist durch physikalische Prozesse festgelegt, und erscheint uns heute als Signal in der kosmischen Hintergrundstrahlung bei einem Winkel von etwa einem Grad. Der Winkel, unter dem man eine bestimmte Strecke sieht, wird durch die Krümmung des Raumes bestimmt. Bei positiver Krümmung ($K = 1$) nimmt die selbe Strecke einen größeren Winkel ein als bei Krümmung Null ($K = 0$), bei negativer Krümmung ($K = -1$) einen kleineren (Abbildung 7).

Der gemessene Wert passt zur Krümmung Null. Demnach besitzt das Universum eine euklidische Geometrie: Die Welt ist geometrisch so einfach wie nur möglich. Krümmung Null heißt auch, dass die gesamte Masse- und Energiedichte Ω_{tot} den kritischen Wert 1 erreicht. Die genaue Analyse ergibt [5, 4]:

$$\Omega_{\text{tot}} = 1,02 \pm 0,06.$$

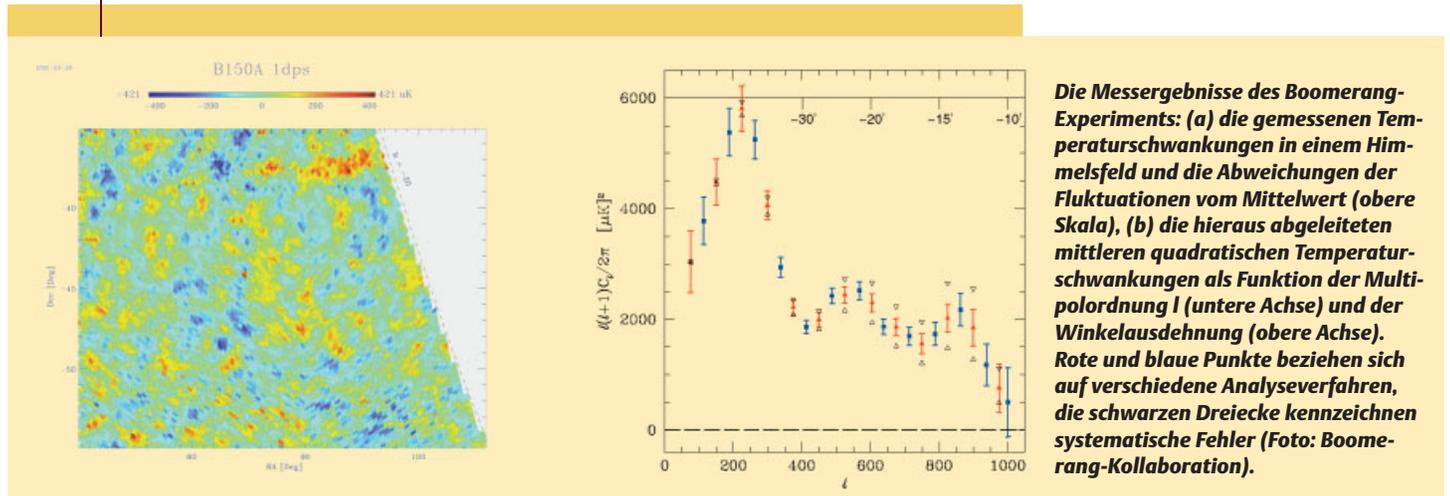
Nur noch eine kleine positive oder negative Krümmung ist im Rahmen der Messgenauigkeit zugelassen.

Bei den akustischen Schwingungen folgt auf die Verdichtung eine Verdünnung, die in Abbildung 6b als zweites Maximum erscheint (gezeigt wird ja das Quadrat der Schwankungen). Je mehr baryonische Materie vorhanden ist, desto stärker ist die Verdichtung beim Einfall in die Gravitationspotentiale der Dunklen Materie ausgeprägt. Das Verhältnis der Amplituden vom ersten und zweiten Maximum ergibt die Einschränkungen für die baryonische und Dunkle Materie. Die Werte hängen nur noch von der Hubble-Konstante ab. Mit dem derzeit favorisierten Wert $H_0 = 68 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ergeben sich

$$\Omega_B = 0,048 \pm 0,008 \text{ und}$$

$$\Omega_{\text{CDM}} = 0,28 \pm 0,01.$$

ABB. 6 | FLUKTUATIONEN



Die Messergebnisse des Boomerang-Experiments: (a) die gemessenen Temperaturschwankungen in einem Himmelsfeld und die Abweichungen der Fluktuationen vom Mittelwert (obere Skala), (b) die hieraus abgeleiteten mittleren quadratischen Temperaturschwankungen als Funktion der Multipolordnung l (untere Achse) und der Winkelausdehnung (obere Achse). Rote und blaue Punkte beziehen sich auf verschiedene Analyseverfahren, die schwarzen Dreiecke kennzeichnen systematische Fehler (Foto: Boomerang-Kollaboration).

Diese Werte sind in Einklang mit anderen astronomischen Messungen. Liegt aber, wie oben ausgeführt, der Dichteparameter Ω_{tot} bei 1, so macht die normale baryonische Materie, aus der alle uns bekannten Himmelskörper und interstellare Materie besteht, nur drei Prozent der insgesamt im Universum vorhandenen Materie aus! Und selbst die baryonische und die Dunkle Materie zusammen ergeben nur etwa ein Drittel der Gesamtmaterie. Es muss eine weitere Komponente $\Omega_{\Lambda} = 0,7$ geben, die dieses Defizit ausgleicht. Sie muss sehr gleichmäßig verteilt sein, das heißt, sie darf keine Klumpung auf der Skala von Galaxienhaufen oder darunter aufweisen.

Dunkle Materie und Dunkle Energie

Hieraus ergeben sich für die Kosmologie eine Reihe von Fragen. Es bleibt das Phänomen der Dunklen Materie, deren Existenz sich aus der Rotationsgeschwindigkeit von Spiralgalaxien oder auch aus der Bewegung von Galaxien in Haufen ergibt. Die Natur dieser nichtbaryonischen Materie ist nach wie vor unklar. Derzeit laufen eine ganze Reihe von Experimenten an, mit denen man Elementarteilchen als Kandidaten für die Dunkle Materie entdecken will.

Es bleibt aber noch eine Deckungslücke in der kosmischen Energiebilanz von etwa 70% der kritischen Dichte. Die Physiker neigen dazu, dieses Defizit durch die Energie eines speziellen Feldes oder durch die Energie des Vakuums, des Grundzustands der Welt, auszugleichen. Sie greifen dabei einen Gedanken Einsteins auf, der eine kosmologische Konstante Λ einführte. Sie sollte ihm ein statisches, also nicht expandierendes Universum, garantieren.

Eine derartige, nahezu konstante Feldenergie würde die kosmische Expansion beschleunigen, im Gegensatz zu den Massen im Kosmos, die durch ihre gegenseitige Schwerkraftwirkung die Expansion abbremsen. Was steckt hinter dieser dunklen Energie?

Die Quantentheorie könnte eine Deutung dieser Größe als Energie des Vakuums liefern. Der leere Raum ist, quantentheoretisch betrachtet, ein komplexes Gebilde, durchzogen von einem Geflecht aus fluktuierenden Feldern, die

zwar nicht beobachtet werden können, die aber zu einer Energie des Grundzustandes beitragen. Die Theoretiker können einige dieser Beiträge ganz gut abschätzen, erhalten aber einen Wert, der um etwa 120 Größenordnungen den Wert übertrifft, den die astronomischen Beobachtungen nahe legen. Andere Beiträge, die (noch) nicht berechnet werden können, würden vielleicht diesen Wert ausbalancieren, aber dieser Ausgleich müsste dann mit unvorstellbarer Präzision bis auf 120 Stellen nach dem Komma erfolgen. Es ist ein ungelöstes Rätsel der Quantenphysik, wie das zugehen könnte.

Somit bleiben zunächst nur die Versuche, unsere Unkenntnis mathematisch zu präzisieren durch die Beschreibung als potentielle Energie eines skalaren Feldes mit passenden Eigenschaften. Auch der schöne Name Quintessenz ist für diese kosmische Energiedichte erfunden worden. Er geht auf die Naturphilosophie von Aristoteles zurück, der damit das fünfte Element, den Äther, bezeichnete.

Tatsächlich bleibt es ein Rätsel, warum diese dunkle Energie überhaupt vorhanden ist, und warum sie gerade jetzt die kosmische Expansion bestimmt. Bleibt die dunkle Energie konstant, so wird die kosmische Expansion sich immer weiter beschleunigen und stets weitergehen (rote Kurve in Abbildung 2).

Die Verknüpfung mit dem Konzept der Feldenergie bietet aber auch die interessante Möglichkeit, dass in der Zukunft überraschende Wendungen durch das zeitliche Verhalten des Feldes in der kosmischen Entwicklung auftreten.

Zusammenfassung

Die kosmische Hintergrundstrahlung ist ein Stützpfeiler des kosmischen Urknallmodells. Aus kleinen räumlichen Temperaturschwankungen in diesem Strahlungsfeld, die in den letzten Jahren durch zwei Ballonexperimente genauer vermessen wurden, lassen sich die kosmologischen Größen, die das Weltmodell festlegen, recht genau herauslesen. Es zeigt sich, dass wir in einem Universum mit der kritischen Energiedichte leben, wobei eine noch rätselhafte dunkle Energie den überwiegenden Anteil stellt. Diese bewirkt eine beschleunigte und immerwährende Ausdehnung des Weltalls.

Literatur

- [1] M. Bartelmann, *Sterne und Weltraum* **2000**, 39, 337.
- [2] M. Bartelmann, *Phys. Bl.* **2000**, 55(5), 5.
- [3] G. Börner, *The Early Universe*, Springer-Verlag, Heidelberg 1993.
- [4] A. H. Jaffe et al., *Phys. Rev. Lett.* **2001**, 86, 3475.
- [5] J. C. Mather et al., *Astrophys. J.* **1994**, 420, 439.
- [6] C. Pryke et al., *Astrophys. J.* (im Druck); astro-ph/01044490.

Autoren



Gerhard Börner ist Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching. Sein Forschungsgebiet ist die Kosmologie, speziell die Bildung der Strukturen in der kosmischen Materie. Eine Neuauflage seines Lehrbuchs *The Early Universe* wird in diesem Jahr erscheinen.

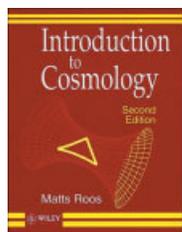


Matthias Bartelmann promovierte 1992 an der Universität München und ist seitdem wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astrophysik. Seit 1998 leitet er den deutschen Beitrag zum Planck-Projekt.

Anschrift

Prof. Dr. Gerhard Börner, Dr. Matthias Bartelmann, Max-Planck-Institut für Astrophysik, Postfach 1317, 85741 Garching. grb@mpa-garching.mpg.de, mbartelmann@mpa-garching.mpg.de

Zum Thema



Introduction to Cosmology.

M. Roos, 226 S., 56 Abb., brosch., € 60,18. ISBN 0-471-97383-1.

Der Winkel, unter dem eine feste physikalische Länge erscheint, hängt von der Raumkrümmung ab.

ABB. 7 RAUMKRÜMMUNG

