

ASTROPHYSIK

Planck und wie er die Welt sah

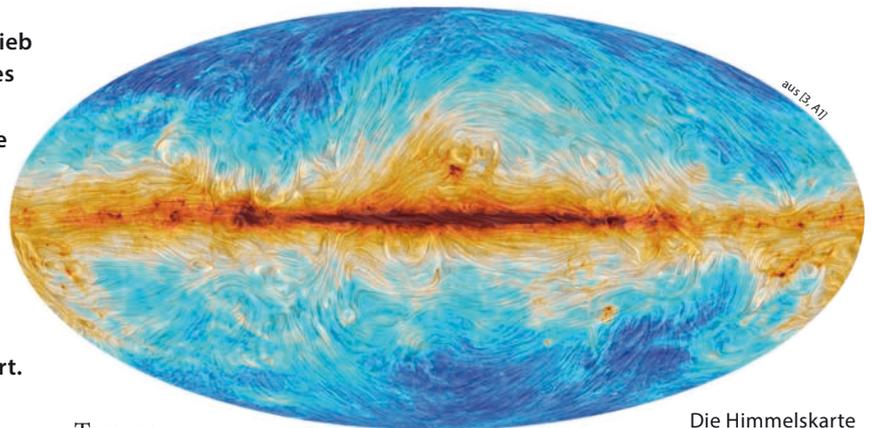
Die europäische Planck-Mission hat den Mikrowellenhintergrund mit bislang unerreichter Genauigkeit bestimmt, aber einige spannende Fragen offen gelassen.

Matthias Bartelmann

Im Oktober 2013 wurde nach über vier Jahren Betrieb der Planck-Satellit abgeschaltet. Inzwischen gibt es die ersten Ergebnisse, in die Daten der gesamten Mission eingegangen sind. Auch wenn noch einige Probleme ungelöst bleiben, hat Planck das kosmologische Standardmodell glanzvoll bestätigt und seine Parameter mit großer Genauigkeit bestimmt. Zudem hat die Mission die letzte große Lücke im astronomisch beobachteten elektromagnetischen Spektrum geschlossen und eine Fülle astrophysikalisch bedeutender Ergebnisse geliefert.

Das Interesse am kosmischen Mikrowellenhintergrund (Cosmic Microwave Background, CMB) geht auf Arbeiten von Gamow, Alpher und Herman aus den 1940er-Jahren zurück. In diesen untersuchten sie die Möglichkeit, dass ein Großteil der leichten Elemente im Universum kurz nach dem Urknall entstanden sein könnte. So deutete die beobachtete Häufigkeit von Helium-4 in der Sonne darauf hin, dass die heutige Temperatur der Wärmestrahlung im Universum zwischen einem und fünf Kelvin liegen sollte. Mit einer Intensität, die dieser Erwartung genau entsprach, entdeckten Penzias und Wilson 1965 diese Restwärmestrahlung des Urknalls bei einer Frequenz von 4080 MHz [1]. Dass es sich dabei tatsächlich um Wärmestrahlung handelt, belegten Ergebnisse des Cobe-Satelliten 1989 und 1990. Demnach liegt die mittlere Temperatur des CMB bei $2,728 \pm 0,004$ K und das Intensitätsmaximum bei 160 GHz [2]. Mithilfe des Cobe-Satelliten gelang es, die lang erwarteten Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund zu finden. Die Winkelauflösung lag bei 7°, die des WMAP-Satelliten bei 15', Planck erreichte 5'.

Der Mikrowellenhintergrund wurde freigesetzt, als das Universum 380 000 Jahre nach dem Urknall eine Temperatur von ca. 3500 K erreicht hatte. Zu dieser Zeit, bei dieser thermischen Energie und wegen der kleinen Amplitude der Schwankungen von Dichte, Intensität und Temperatur um ihren Mittelwert war das baryonische kosmische Material im vergleichsweise einfachen Zustand eines nichtrelativistischen, thermischen Plasmas mit kleinen Fluktuationen, dessen Wechselwirkung sich mit elektromagnetischer Strahlung durch Thomson-Streuung beschreiben lässt. Da der Thomson-Streuquerschnitt vom linearen Polarisationszustand der Streustrahlung abhängt, gehen



Die Himmelskarte des Positionswinkels der linearen Polarisation bei 353 GHz zeigt deutliche Strukturen der Milchstraße.

Temperaturschwankungen im CMB mit dazu korrelierten Schwankungen seiner Stokes-Parameter Q und U einher.

Die statistischen Eigenschaften dieser Temperatur- und Polarisationschwankungen sind aufgrund einfacher und gut verstandener physikalischer Vorgänge zu beschreiben. Dadurch ist das große Interesse an einer genauen Vermessung dieser Eigenschaften begründet: Durch sie lässt sich der physikalische Zustand des jungen Universums auf eine im Detail aufwändige, aber konzeptionell geradlinige Weise bestimmen.

Aufgrund seines Ursprungs im frühen Universum ist der Mikrowellenhintergrund hinter einer Reihe heller Vordergrundquellen verborgen, die bestmöglich zu subtrahieren sind (Abb. 1). Dazu trägt die Milchstraße zwei diffuse Komponenten bei: Relativistische Elektronen emittieren im galaktischen Magnetfeld Synchrotronstrahlung, deren Spektrum einem von niedrigen zu hohen Frequenzen abfallenden Potenzgesetz folgt. Staub in der Milchstraße mit Tempera-

KOMPAKT

- Die Planck-Mission hatte zum Ziel, den gesamten Himmel in einem weiten Frequenzbereich, bei einer Winkelauflösung von 5' und einer Empfindlichkeit nahe des Quantenlimits abzubilden.
- Planck hat den kosmischen Mikrowellenhintergrund mit bislang unerreichter Genauigkeit bestimmt und das kosmologische Standardmodell glanzvoll bestätigt.
- Auf großen Winkelskalen fehlen allerdings Fluktuationen im CMB, zudem gibt es eine eigenartige Asymmetrie zwischen den beiden Himmelshemisphären.
- Auch die Hubble-Konstante, die sich aus den Planck-Daten ableitet, liegt deutlich unter dem Wert aus Entfernungsmessungen in der kosmischen Nachbarschaft.

Prof. Dr. Matthias Bartelmann, Zentrum für Astronomie, Institut für Theoretische Astrophysik Philosophenweg 12, Uni Heidelberg, 69120 Heidelberg

turen um 20 K emittiert mit einem selbstabsorbierten Planck-Spektrum, das von mittleren zu hohen Frequenzen hin ansteigt. Dazwischen liegt in der Nähe des Intensitätsmaximums ein Frequenzfenster, durch das der Mikrowellenhintergrund relativ deutlich durchscheint. Der galaktische Staub besitzt neben einer rein thermisch emittierenden Komponente einen weiteren Bestandteil. Dieser „Spinning Dust“ trägt durch die vermutlich längliche Form der Staubteilchen und deren Ausrichtung im galaktischen Magnetfeld erheblich zum Polarisationsignal bei. Thermische Bremsstrahlung aus ionisiertem Gas, Molekülwolken und andere kompakte Quellen in der Milchstraße sind auf die galaktische Scheibe und teils auf die Sonnenumgebung begrenzt.

Vordergründe jenseits der Milchstraße

Auf dem langen Weg von der Rekombination des kosmischen Plasmas bis zur Milchstraße sammelt das Mikrowellensignal weitere Störeinflüsse auf. Dazu gehört zum einen ein Beitrag, der durch inverse Compton-Streuung der CMB-Photonen an freien Elektronen in heißen kosmischen Plasmen zustandekommt (thermischer Sunyaev-Zel'dovich-Effekt). Dieser Prozess streut CMB-Photonen niedriger Energie zu höheren Energien, verändert aber ihre Anzahldichte nicht. Dadurch verformt sich das Planck-Spektrum des Mikrowellenhintergrunds geringfügig auf charakteristische Weise, die durch den Compton-Parameter y

$$y = \int \frac{k_B T}{m_e c^2} n_e \sigma_T dz$$

quantifiziert wird. Er integriert das Verhältnis aus der thermischen Energie der Photonen und der Ruheenergie der streuenden Elektronen zusammen mit der Anzahldichte der Elektronen und dem Thomson-Wirkungsquerschnitt längs der Sichtlinie.

Einen weiteren Beitrag zum Mikrowellen-Vordergrund leistet der integrierte Sachs-Wolfe-Effekt, der zustandekommt, wenn sich die Schwankungen im Gravitationspotential zeitlich ändern. Dieser Effekt gibt daher Aufschluss, wie stark sich das Gravitationspotential kosmischer Strukturen verändert hat, während die CMB-Photonen zu uns unterwegs waren.

Vielleicht am wichtigsten ist der Gravitationslinseneffekt (Abb. 2). Die CMB-Photonen passieren kosmische Strukturen, welche die Bahnen der Photonen geringfügig ablenken. Der Mikrowellenhintergrund wirkt daher so, als würden wir ihn durch eine Glasplatte mit etwas ungleichmäßiger Dicke betrachten. Durch den Gravitationslinseneffekt erscheinen die Intensitätsschwankungen auf kleinen Winkelskalen etwas verwaschen. In genügender Näherung lässt er sich durch einen Brechungsindex beschreiben, der durch die Schwankungen im Gravitationspotential bestimmt ist,

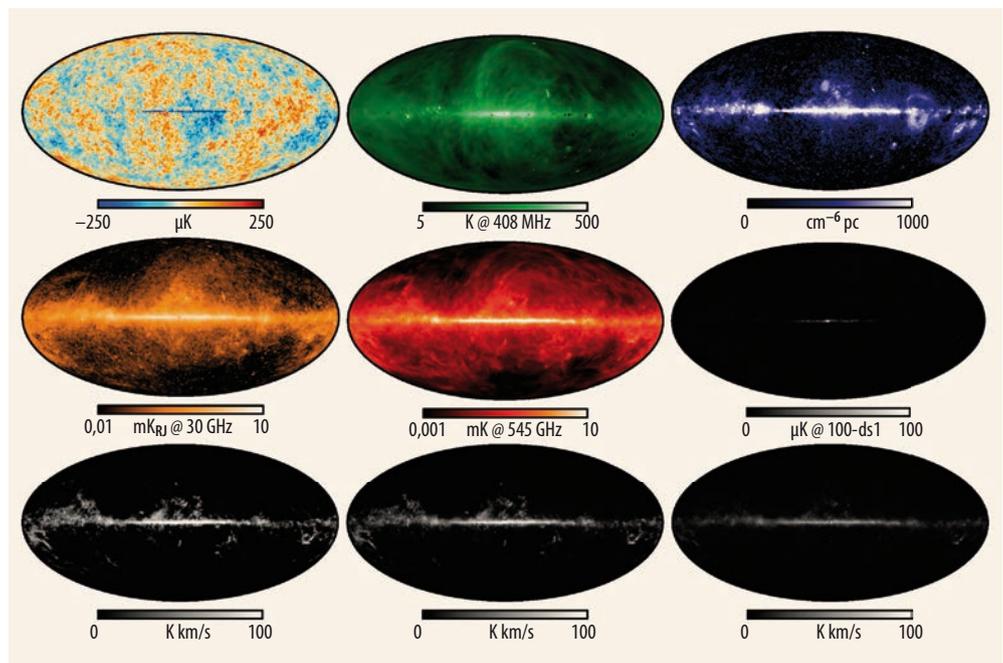
$$n = 1 - \frac{2\delta\Phi}{c^2}.$$

Die Winkelskalen, auf denen der kosmische Gravitationslinseneffekt den Mikrowellenhintergrund verändert, sind so klein, dass erst Planck sie sehen konnte. Daher ist es bei Planck erforderlich, den Effekt in die Analyse einzubeziehen. Glücklicherweise ist es möglich, ihn anhand des Signals selbst zu quantifizieren.

Drei wichtige Aufgaben

Am 14. Mai 2009 startete der Planck-Satellit zum äußeren Lagrange-Punkt L2, von wo aus er den Mikrowellenhimmel beobachten konnte, während Sonne, Erde und Mond immer fast genau in seinem Rücken standen. Planck hatte drei Aufgaben: Er war darauf ausgelegt, den gesamten Himmel im Frequenzbereich zwischen 30 und 857 GHz mit einer Winkelauflösung

Abb. 1 Diese neun Himmelskarten zeigen die wesentlichen physikalischen Komponenten des Mikrowellenhimmels (von links nach rechts und von oben nach unten): CMB, Synchrotronstrahlung, Bremsstrahlung, rotierender Staub, thermischer Staub, Linienemission bei 90 GHz, Emission durch drei Rotationsübergänge des Kohlenmonoxids.



aus [3, A1]

von maximal 5' und einer Empfindlichkeit nahe am Quantenlimit abzubilden. Ziel war es, die Temperatur- und Polarisationschwankungen im CMB so präzise wie möglich zu vermessen, um das kosmologische Standardmodell (Infokasten) streng zu prüfen. Die hohe Winkelauflösung war theoretisch begründet: Auf noch kleineren Winkelskalen sollte es keine Temperaturschwankungen mehr geben, was Planck bestätigt hat. Für diese Winkelauflösung reichte ein Teleskop von 1,75 Meter Spiegeldurchmesser.

Die Temperaturschwankungen im CMB liegen bei etwa 10^{-5} K. Wichtige Informationen über die Entstehung des Mikrowellenhintergrunds sind in seiner linearen Polarisation enthalten, deren Intensität bei etwa 10^{-6} K liegt. Um diese ausreichend genau zu messen, musste der Planck-Satellit so ausgelegt sein, dass er relative Intensitätsschwankungen von etwa dem 10^{-7} -fachen der mittleren CMB-Intensität feststellen konnte. Dafür arbeiteten die Detektoren an Bord sehr dicht am Quantenlimit und wurden zum Teil auf 100 mK gekühlt. Der Heliumvorrat reichte für eine Beobachtungszeit von 29 Monaten.

Planck hatte zwei Instrumente an Bord, um einen großen Frequenzbereich von etwa einem Fünftel bis zum Fünffachen der Frequenz des Intensitätsmaximums im CMB abzudecken: Das Niederfrequenzinstrument (LFI) arbeitete bei 30, 44 und 70 GHz, das Hochfrequenzinstrument (HFI) bei 100, 143, 217, 353, 545 und 857 GHz. Alle Detektoren des LFI und einige des HFI waren polarisationsempfindlich.

Die Planck-Daten und ihre Qualität

Der breite Frequenzbereich, die hohe Winkelauflösung und Empfindlichkeit des Teleskops und der Detektoren ermöglichten es, das Mikrowellensignal zuverlässig in seine physikalischen Komponenten aufzuteilen und damit die Bestandteile der Vordergrundemission vom CMB zu trennen (Abb. 1 und 3). Dies geschieht im Wesentlichen dadurch, dass man denjenigen Anteil des Signals identifiziert, dessen Intensitätsverlauf am bes-

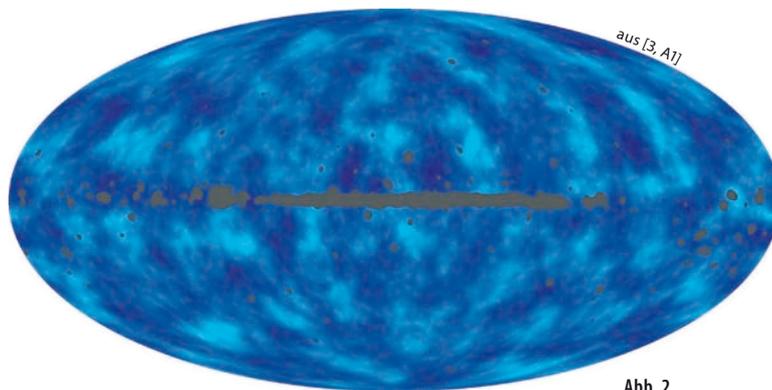


Abb. 2
Himmelskarte des Brechungsindex durch den Gravitationslinseneffekt

ten einem Planck-Spektrum entspricht, und bekannte Information über den Vordergrund berücksichtigt.

Planck ermöglichte es, den Vordergrund viel besser zu subtrahieren und die CMB-Polarisation genauer zu bestimmen. Ein wichtiges Ergebnis sind Himmelskarten der Intensität und der Stokes-Parameter Q und U der (linearen) Polarisation (Abb. auf S. 35), der Synchrotronstrahlung sowie der thermischen und polarisierten Staubemission der Milchstraße, der Intensität der Linienemission von Rotationsbanden von Kohlenmonoxid in Molekülwolken und des Compton-Parameters. Zudem entstanden Kataloge kompakter Quellen.

Die Datenanalyse wurde von der Analyse simulierter Daten begleitet, um deren Konsistenz zu überwachen und nach systematischen Fehlern und Verunreinigungen des Mikrowellenhintergrunds durch Vordergründe zu suchen. Dafür wurden in 25 Millionen CPU-Stunden 18 144 Himmelskarten und ihre Beobachtung durch Planck simuliert und auf dieselbe Weise analysiert wie die Messdaten selbst. Die Zerlegung des Signals in CMB und Vordergründe hat nun die Amplitude der Verunreinigungen auf 95 Prozent des Himmels und bei Frequenzen bis zu 353 GHz unter weniger als $4 \mu\text{K}$ abgesenkt. Zu den höheren Frequenzen hin nimmt die Staubemission schnell zu.

Aufgrund der bisherigen Ergebnisse von Planck hat die Karte der Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund eine voraussichtlich abschließende

KOSMOLOGISCHES STANDARDMODELL

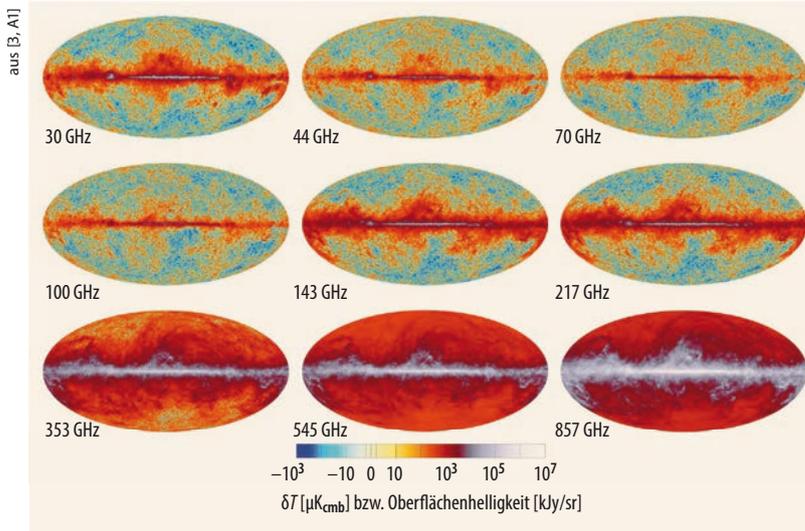
Das kosmologische Standardmodell gehört zur Klasse der Friedmann-Modelle, die aus der Allgemeinen Relativitätstheorie unter Annahme einer räumlich homogenen, isotropen Metrik hervorgehen. Aufgrund dieser Symmetrieannahme ist eine räumliche Expansion bzw. Kontraktion der einzige dynamische Freiheitsgrad. Er wird durch den **Skalenfaktor** $a(t)$ beschrieben, der angibt, wie sich das Modell mit der Zeit t räumlich ändert. Einsteins Feldgleichungen gehen damit in zwei gewöhnliche Differentialgleichungen in der Zeit über – die **Friedmann-Gleichungen**, die nur die Entwicklung des Skalenfaktors beschreiben. Mehrere

Parameter, die angeben, aus welchen Beiträgen sich die Energie- und Massendichte zusammensetzt, charakterisieren die Friedmann-Modelle.

Ergänzt wird das kosmologische Standardmodell durch die Annahme inflationärer Ausdehnung in einer sehr frühen Entwicklungsphase und durch ein Modell für die dominierende Dunkle Materie. Letzteres setzt voraus, dass die Dunkle Materie aus Teilchen besteht, deren kinetische Energie gegenüber ihrer Ruheenergie vernachlässigbar und die in diesem Sinne kalt ist. Es wird daher als „Cold Dark Matter“-Modell (CDM) bezeichnet. Da sich die beschleunigte Expansion des Universums

am einfachsten durch eine kosmologische Konstante Λ beschreiben lässt, spricht man vom **Λ CDM-Modell**.

Innerhalb dieses Modells reichen **sechs Parameter**, um den CMB vollständig zu erklären (Tab. 1): die Beiträge von baryonischer und Dunkler Materie zur kosmischen Materiedichte; die Winkelskala, unter welcher der Schallhorizont am CMB erscheint; die optische Tiefe für Thomson-Streuung der CMB-Photonen auf ihrem Weg zu uns; die Amplitude der Temperaturschwankungen im CMB und der Spektralindex, der die Skalenabhängigkeit der Dichteschwankungen im frühen Universum charakterisiert.



aus [3, A1]
Abb. 3 Der Planck-Satellit hat Himmelskarten in neun Frequenzbändern aufgenommen. Deutlich zeigt sich intensive Vordergrundemission durch die Milchstraße.

Qualität erreicht. Ihr stehen nun die Polarisationskarten zur Seite. Zudem hat das Gravitationslinsensignal, das aus dem CMB extrahiert wurde, eine Signifikanz von 40σ erreicht (**Abb. 2**). Zusammengenommen erlauben diese Signale weitreichende Schlussfolgerungen.

Hintergründige Strukturen

Sind die Vordergrunde vom Mikrowellensignal abgetrennt, liegen genaue Himmelskarten der Temperatur- und Polarisationschwankungen im CMB vor. Die statistische Auswertung dieser Karten entspricht einer Fourier-Analyse, die auf der Sphäre eine Zerlegung in Kugelflächenfunktionen erfordert. Die Koeffizienten a_{lm} dieser Zerlegung mittelt man quadratisch über alle m und erhält dadurch die gemittelten Varianzen

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l |a_{lm}|^2$$

als Funktion der Multipolordnung l . Die Größe

$$\frac{l(l+1)}{2\pi} C_l$$

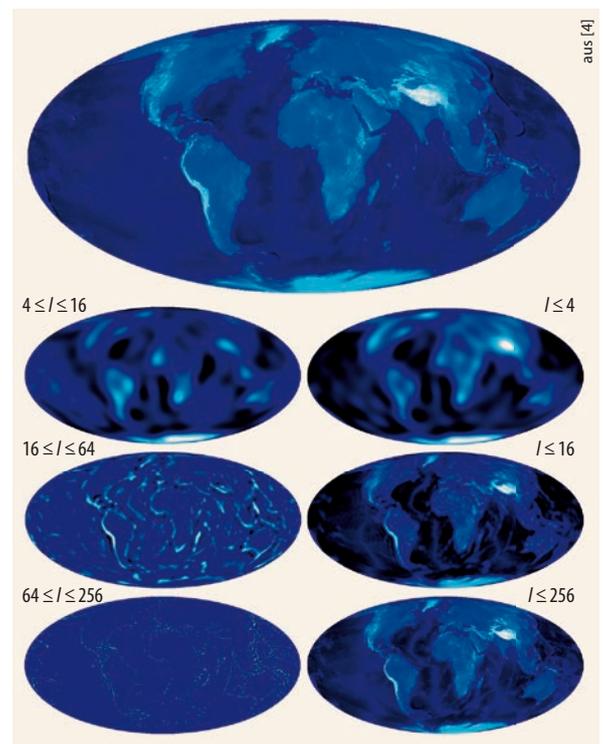
ist das Leistungsspektrum der Temperaturschwankungen. Ihr charakteristischer Verlauf mit l wird vor allem durch drei physikalische Effekte bestimmt:

- Bei $l \leq 30$ liegt das Sachs-Wolfe-Plateau. Die Temperaturschwankungen spiegeln dort wider, dass die CMB-Photonen bei ihrer Freisetzung aus dem kosmischen Plasma durch räumliche Schwankungen im Gravitationspotential rot- oder blauverschoben werden.
- Bei $l \approx 30$ beginnt der Bereich der akustischen Schwingungen, in dem bei $l \approx 200$ ein erstes Maximum liegt. Die Gravitationskraft, die durch Schwankungen in der Materiedichte entsteht, treiben diese akustischen Schwingungen an, während der Druck des kosmischen Plasmas als rückstellende Kraft wirkt. Die Längenskala, die dem ersten und höchsten Maximum entspricht, ist der Schallhorizont: Er gibt an, wie weit ein Schallsignal im kosmischen Plasma zwischen dem Urknall und der Freisetzung des CMB knapp 400 000 Jahre später

laufen konnte. Wegen des hohen Photonenanteils in diesem Plasma lag die Schallgeschwindigkeit bei $c/\sqrt{3}$. Die weiteren Maxima und Minima entsprechen den Oberschwingungen dieser Grundschwingung.

- Bei $l \geq 1000$ fällt die Amplitude der Maxima und Minima deutlich ab, da die mittlere freie Weglänge der CMB-Photonen erheblich zunimmt, während das kosmische Plasma rekombiniert. Durch die einsetzende Photonendiffusion werden kleine Fluktuationen gedämpft (Silk-Dämpfung).

Entscheidend ist, dass sich aus diesen drei Bereichen des CMB-Leistungsspektrums einige kosmologisch wichtige Parameter ablesen lassen. Das ist zum einen die Winkelskala θ des ersten und höchsten Maximums. Die Höhe dieses und der darauffolgenden Maxima gibt an, wie stark die Gravitation der Dichteschwankungen die akustischen Schwingungen angetrieben hat. Ihre Amplitude ist daher ein direktes Maß für die kosmische Materiedichte. Die Höhe der geradzahigen Maxima relativ zur Höhe der ungeradzahigen hängt von der Rückstellkraft der Schwingungen und damit von der Dichte desjenigen Anteils der kosmischen Materie ab, der mit elektromagnetischer Strahlung wechselwirkt. Daraus lässt sich die Dichte der baryonischen (im Gegensatz zur Dunklen) Materie ablesen. Das Ausmaß der Silk-Dämpfung hängt davon ab, wie lange die Rekombinationsphase des kosmischen Plasmas gedauert hat. Je schneller die kosmische Ausdehnung verlief, umso geringer war die Silk-Dämpfung. Dies erlaubt es, die effektive Anzahl relativistischer Freiheitsgrade im kosmischen Plasma zu bestimmen, da diese wiederum festlegt, mit welcher Rate sich das Universum damals ausdehnen konnte.



aus [4]
Abb. 4 Die Erdkarte (oben) lässt sich in Kugelflächenfunktionen zerlegen (unten).

Das minimale Modell

Die kosmologisch wichtigste Schlussfolgerung ist sicher, dass sich das Leistungsspektrum der Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund durch das minimale kosmologische Standardmodell mit bester Genauigkeit beschreiben lässt (Abb. 5 und 6). Mit Ausnahme der optischen Tiefe liegen die relativen Unsicherheiten der sechs Parameter im Prozentbereich oder darunter (Tab. 1). Das Leistungsspektrum des Gravitationslinseneffekts passt sehr gut zu demjenigen, das innerhalb des minimalen kosmologischen Standardmodells zu erwarten ist. Kombiniert man die CMB-Daten mit denen des Gravitationslinseneffekts, ist es möglich, die Hubble-Konstante anzugeben. Mit dieser wiederum lassen sich die dimensionslosen Dichteparameter bestimmen und die Zeitangaben kalibrieren.

Im kosmologischen Standardmodell führt die einfachste Annahme über den Ursprung kosmischer Strukturen zu der Vermutung, dass die Dichteschwankungen im frühen Universum, und damit die Temperaturschwankungen im CMB, Gaußsche Zufallsfelder bilden sollten. Die Statistik der Temperaturschwankungen und ihrer Extrema in den Planck-Daten stimmt mit dieser Erwartung sehr gut überein. Eine Anisotropie im CMB auf großen Skalen ist möglich, aber ihre Signifikanz ist gering und hängt von der Nachweismethode ab [3, A16]. Mögliche primordiale Abweichungen von der Gaußschen Statistik hat Planck stark eingeschränkt. Alle Methoden, die zur Suche nach nicht-Gaußschen Anteilen in den Planck-Daten zum Einsatz kamen, liefern sehr kleine, mit Null verträgliche Ergebnisse und grenzen mögliche Abweichungen von der Gaußschen Statistik eng ein [3, A17].

Spektralindex und Inflation

Der Befund, dass der Spektralindex n_s der primordialen Dichteschwankungen um mehr als 5σ nach unten von eins abweicht, hat große Bedeutung für die Vorstellung, dass das Universum sehr früh eine Phase inflationärer Expansion durchlaufen haben soll. Diese Inflation gilt als Ursache für die Entstehung kosmischer Strukturen. Hätte die kosmische Inflation ewig gedauert, müsste das primordiale Leistungsspektrum der Dichteschwankungen völlig skaleninvariant sein, dann wäre $n_s = 1$. Da die Inflation zwar effektiv gewesen sein muss, aber nicht unendlich lange gedauert haben kann, sollte n_s nahe bei eins liegen, aber die eins nicht ganz erreichen. Die Messung durch Planck bestätigt daher die kosmische Inflation [3, A20].

Dagegen existieren keine Hinweise, dass das primordiale Leistungsspektrum von einem Potenzgesetz abweicht. Dieses Ergebnis schränkt das Potential des Inflatonfeldes weiter ein. Weitaus am besten stimmt nach wie vor das R^2 -Modell der Inflation mit den Daten überein, das kaum von einem Modell zu unterscheiden ist, in dem das Higgs-Boson die Inflation bewirkt [3, A20].

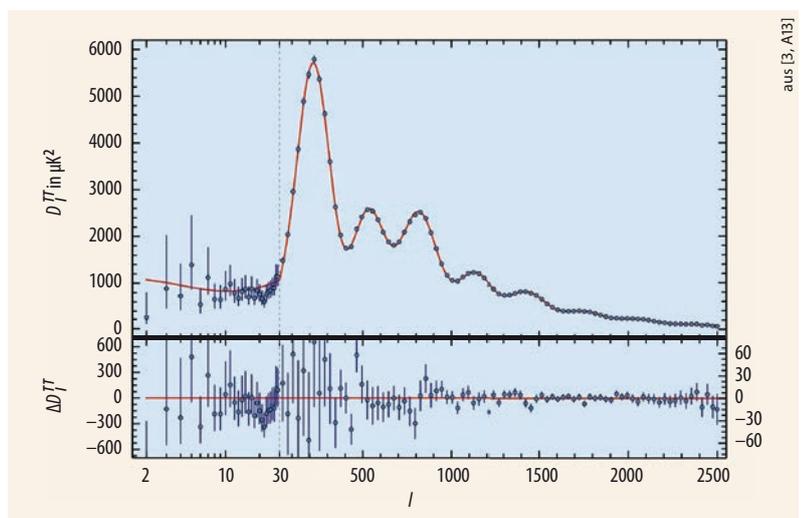
| Parameter des kosmologischen Standardmodells | | |
|--|-----------------------|--|
| Parameter | Wert | Bedeutung |
| $100 \Omega_{\text{B}0} h^2$ | $2,226 \pm 0,016$ | Massendichte der Baryonen |
| $\Omega_{\text{c}0} h^2$ | $0,1193 \pm 0,0014$ | Massendichte der Dunklen Materie |
| 100θ | $1,04087 \pm 0,00032$ | Winkelskala des ersten akustischen Maximums |
| τ | $0,063 \pm 0,014$ | optische Tiefe für Streuung entlang der Sichtlinie |
| $\ln(10^{10} A_s)$ | $3,059 \pm 0,025$ | Amplitude der Temperaturschwankungen |
| n_s | $0,9653 \pm 0,0048$ | Spektralindex der Dichteschwankungen |

aus [3, A13]

Tab. 1 Die Werte für die Parameter leiten sich aus den Planck-Messungen ab und beziehen Temperatur- und Polarisationschwankungen sowie den Gravitationslinseneffekt ein.

Je geringer die Masse der Neutrinos ist, umso mehr verwischen sie die kosmischen Strukturen im Mikrowellenhintergrund auf eine Weise, die dem Gravitationslinseneffekt ähnelt. Da diese Glättung der Temperaturschwankungen auf kleinen Skalen etwas stärker ist, als allein aufgrund des Gravitationslinseneffekts zu erwarten wäre, lässt sich eine obere Schranke an die Summe der Neutrinomassen von $0,23 \text{ eV}$ ableiten [3, A13]. Durch Kreuzkorrelation des Mikrowellenhintergrunds mit dem Gravitationslinseneffekt wurde der integrierte Sachs-Wolfe-Effekt mit einer Signifikanz von 4σ entdeckt. Seine Amplitude bestätigt die zeitliche Änderung des Gravitationspotentials, die im kosmologischen Standardmodell zu erwarten ist [3, A21].

Karten des Compton- γ -Parameters wurden konstruiert, die bei Multipolen $20 \leq l \leq 600$ durch den thermischen Sunyaev-Zel'dovich-Effekt dominiert werden [3, A22]. Dieser Effekt verteilt einen kleinen Teil der CMB-Photonen von niedrigeren zu höheren Energien um und bewirkt damit, dass der CMB in Richtung von Galaxienhaufen bei Frequenzen unterhalb von 217 GHz etwas schwächer, oberhalb etwas heller als im Mittel erscheint. Durch dieses eigenartige Signal ließen sich 1653 Galaxienhaufen identifizieren, von denen inzwischen 1203 durch externe Daten bestätigt wurden.



aus [3, A13]

Abb. 5 Leistungsspektrum der Temperaturschwankungen im CMB (blau) zusammen mit der Erwartung aus dem am besten angepassten, minimalen ΛCDM -Modell (rote Kurve). Unten sind die Residuen zu sehen.

Dieser Galaxienhaufenkatalog enthält auch solche Galaxienhaufen, die aufgrund ihrer schwachen Röntgenemission bisher unbekannt waren [3, A27].

Ein Katalog von 13188 kalten, kompakten Quellen mit Temperaturen von 5,8 bis 20 K zählt auch zu den Ergebnissen. Diese Quellen befinden sich größtenteils innerhalb einer Entfernung von 10,5 kpc von uns in Richtung des Milchstraßenzentrums. Darunter befinden sich kompakte Kerne und Molekülwolken [3, A28].

Hinweise auf primordiale Magnetfelder gibt es nicht. Ihre Amplitude kann somit höchstens wenige Nanogauss betragen [3, A19]. Ebenso existieren keine Hinweise auf alternative kosmologische Modelle oder Gravitationstheorien. Es gibt lediglich Andeutungen, wenn Messungen berücksichtigt werden, die neben der Geometrie des Universums auch das Wachstum von Dichteschwankungen betreffen. Diese Andeutungen verschwinden aber wieder, wenn der Gravitationslinseneffekt berücksichtigt wird [3, A14]. Schließlich könnte der CMB auch Signale enthalten, die auf eine nichttriviale, beispielsweise toroidale Topologie des Universums hinweisen könnten, doch auch solche Signale wurden nicht gefunden. Sollte das Universum eine nichttriviale Topologie haben, muss deren charakteristische Skala größer sein als der Radius des für uns überschaubaren Universums [3, A18].

Ungelöste Rätsel

Zwar beschreibt das minimale kosmologische Standardmodell die Planck-Daten unerhört genau, und keine Erweiterung des Modells hat die Übereinstimmung der Daten mit der Erwartung verbessert. Dennoch bleiben einige Probleme bestehen, die der Kosmologie und der Astrophysik ungelöste Rätsel aufgeben.

Bereits WMAP hatte festgestellt, dass es dem Mikrowellenhintergrund auf großen Winkelskalen an

Fluktuationen fehlt. Planck hat dies bestätigt [5]. Auf Winkelskalen zwischen 80° und 170° fällt die mittlere Amplitude der Temperaturschwankungen beinahe auf Null ab. Die Signifikanz dieser Beobachtung ist gering, und es ist schwierig, ihre Bedeutung ohne ein konkretes Modell für solche Abweichungen zu beurteilen.

Ebenso bestätigte sich der Befund, dass es eine eigenartige Asymmetrie zwischen den beiden Hemisphären des Himmels gibt: Zum nördlichen Pol der Ekliptik hin sind die Temperaturschwankungen im CMB kleiner als erwartet. Leichte Anzeichen von Richtungsasymmetrien auf großen Skalen bleiben also bestehen, auch wenn sich ihre Signifikanz nur schwer bewerten lässt [3, A16]. Weitere Analysen der Polarisationsdaten könnten hier neue Einsichten liefern.

Eine geeignet gemittelte Amplitude der kosmischen Dichteschwankungen leitet sich anhand der Planck-Daten auf zwei verschiedene Weisen ab. Ein Wert für diese Amplitude folgt direkt aus den Temperaturschwankungen im CMB, ein anderer indirekt aus der Häufigkeit der aufgrund ihres Sunyaev-Zel'dovich-Effekts entdeckten Galaxienhaufen. Diese beiden Werte stimmen nicht überein: Der Wert aus der Häufigkeit der Galaxienhaufen liegt – etwas abhängig von der Bestimmungsmethode – bei etwa 85 Prozent des aus den Temperaturschwankungen bestimmten Werts [3, A24]. Die geringe Signifikanz erlaubt wiederum keine eindeutige Schlussfolgerung, aber der Verdacht liegt nahe, dass sich dahinter ein Hinweis darauf verbergen könnte, dass die späte kosmische Strukturbildung anders verlaufen sein mag, als das kosmologische Standardmodell vorhersagt.

Ein weiteres Rätsel betrifft die Hubble-Konstante, die sich nun mithilfe des Gravitationslinsensignals direkt aus den Planck-Daten ableitet. Ihr Wert liegt deutlich unter demjenigen, der aus Entfernungsmessungen in unserer kosmischen Nachbarschaft folgt: Planck findet $67,51 \pm 0,64 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, während neueste lokale Messungen $73,24 \pm 1,74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ergeben [6]. Auch hier ist unklar, wie dieser Widerspruch zu lösen ist.

Ein möglicherweise erhebliches Problem für die Astrophysik des jungen Universums ist die optische Tiefe τ , welche durch die Planck-Ergebnisse nochmals gesunken ist [3, A11]. Das Universum ist also gegenüber Thomson-Streuung an freien Elektronen in ionisiertem Gas durchsichtiger, als bisherige Messungen ergeben hatten. Das kosmische Gas, das bei der Freisetzung des Mikrowellenhintergrunds rekombinierte, wurde also später wieder reionisiert als bisher angenommen. Das kann weitreichende Konsequenzen für Modelle der Galaxienentstehung haben, die erklären müssen, warum junge Galaxien offenbar weit weniger ionisierende UV-Strahlung abgegeben haben.

Eine vorläufige Bilanz

Die Planck-Mission hat das kosmologische Standardmodell in seiner einfachsten Form glanzvoll bestätigt. Seine sechs Parameter und eine ganze Reihe weiterer,

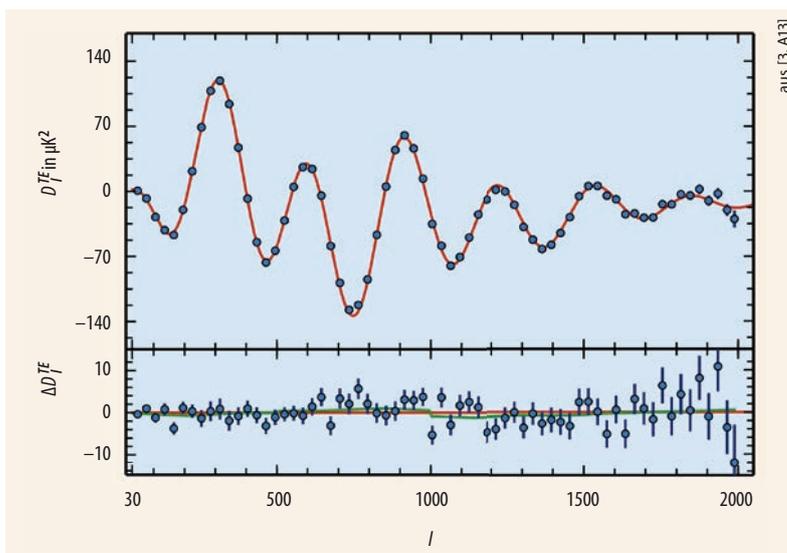


Abb. 6 Leistungsspektrum der Temperatur- und Polarisationsschwankungen im CMB (blau). Die rote Kurve zeigt die Erwartung aus dem minimalen Λ CDM-

Modell, das durch die Temperaturschwankungen festgelegt wurde. Die untere Teilabbildung zeigt die Residuen.

abgeleiteter Größen sind nun sehr genau bekannt. Keine Erweiterung dieses Modells hat im Hinblick auf die Planck-Daten eine signifikante Verbesserung erbracht. Zum kosmologischen Standardmodell gehört auch die Inflation: Planck hat das fast skaleninvariante Leistungsspektrum der kosmischen Dichteschwankungen bestätigt und bekräftigt, dass das Higgs-Boson die Inflation angetrieben haben mag.

Auch astronomische Einsichten hat Planck in Fülle geliefert. Dazu gehören die Ergebnisse über Staub, Gas, Molekülwolken, Plasma und Magnetfelder in der Milchstraße, aber auch über Galaxienhaufen, kompakte Quellen und den Gravitationslinseneffekt der kosmischen Strukturen entlang des weiten Weges zwischen uns und dem CMB.

Das kosmologische Standardmodell gibt auch dem Standardmodell der Teilchenphysik einige Hinweise. Die effektive Anzahl relativistischer Freiheitsgrade stimmt genau mit derjenigen überein, die aufgrund des subatomaren Standardmodells zu erwarten ist, und die Summe der Neutrinomassen erweist sich als sehr klein.

Leichte Hinweise bleiben, dass noch nicht alles im kosmischen Mikrowellenhintergrund erforscht ist. Die bestehenden Asymmetrien, das Leistungsdefizit auf großen Skalen, die verschiedenen Ergebnisse zur Normierung kosmischer Dichteschwankungen und der abweichende Wert der Hubble-Konstante zählen dazu. Noch ist die Analyse der Polarisationsdaten von Planck nicht abgeschlossen, und sie mag neue Hin-

weise darauf geben, wie ernst diese Abweichungen zu nehmen sind. Künftige Messungen des Mikrowellenhintergrunds dürften wohl ihre Aufmerksamkeit auf das polarisierte Signal richten, nicht mehr auf die Temperaturschwankungen.

Literatur

- [1] A. A. Penzias und R. W. Wilson, *ApJ* **142**, 419 (1965)
- [2] D. J. Fixsen et al., *ApJ* **473**, 576 (1996)
- [3] R. Adam et al. (Planck. Coll.), *A&A* **594**, A1 – A28 (2016)
- [4] Data Announcement 88-MGG-02, Digital relief of the Surface of the Earth. Technical report, NOAA, National Geophysical Data Center (1988)
- [5] D. Schwarz, Plancks rätselhafter Hintergrund, *Physik Journal*, Dezember 2013, S. 18
- [6] A. G. Riess et al., *ApJ* **826**, 56 (2016)

DER AUTOR

Matthias Bartelmann (FV Gravitation und Relativitätstheorie) studierte Physik an der LMU München. Seine Promotion fertigte er am MPI für Astrophysik in Garching an, wo er, unterbrochen von einem Auslandsaufenthalt am Harvard-Smithsonian Center für Astrophysics, anschließend forschte.

Nach der Habilitation 1998 war er Projektleiter des deutschen Beitrags zum Planck-Satelliten. Seit 2003 ist er Professor für theoretische Astrophysik am Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg. Sein Arbeitsgebiet ist die Kosmologie, vor allem die Theorie der Gravitationslinsen, kosmische Strukturbildung und Mikrowellenhintergrund.

