

# DER KOSMISCHE MIKROWELLENHINTERGRUND

MATTHIAS BARTELMANN, MPA GARCHING

*Sterne und Weltraum 39/5, 337 (2000)*

## ZUSAMMENFASSUNG

Das frühe Universum hat uns eine Botschaft hinterlassen. Etwa 300.000 Jahre nach dem Urknall wurde es durchsichtig. Damit konnte die elektromagnetische Strahlung, die mit dem Urknall entstanden war, fast ungehindert auf Reisen gehen und Informationen über den frühen Zustand des Universums verbreiten. Wir empfangen diese Strahlung heute stark abgekühlt in Form von Mikrowellen, die uns aus allen Richtungen am Himmel mit fast gleicher Intensität erreicht. Die Strukturen, die im frühen Universum angelegt waren, haben sich aber dem kosmischen Mikrowellenhintergrund aufgeprägt. Diese feinen Muster, winzigen Wellen auf dem Ozean der Hintergrundstrahlung vergleichbar, liefern uns eine Fülle von Informationen über den Zustand des frühen Universums, seine Entwicklung und seine heutige Geometrie. Zahlreiche Experimente, darunter die beiden ehrgeizigen Satellitenprojekte *MAP* und *Planck*, werden in naher Zukunft den Mikrowellenhintergrund mit hoher Genauigkeit vermessen und uns damit einerseits viele kosmologische Fragen endgültig beantworten, uns andererseits aber vor Herausforderungen ganz neuen Ausmaßes stellen. Dieser Artikel beschreibt die wesentlichen physikalischen Prozesse, die dem Mikrowellenhintergrund seine Struktur aufgeprägt haben, und die Erwartungen, die sich insbesondere an die Satellitenexperimente richten.

## DER URKNALL UND SEIN ECHO

Die Urknall-Theorie ist eine weit verbreitete und gut gesicherte Vorstellung vom Beginn unseres Universums. Ihr zufolge ist das gesamte Weltall vor zehn bis 15 Milliarden Jahren in einem sehr heißen und dichten Zustand entstanden. Diese Theorie ist nicht eine bloße Vorliebe der modernen Kosmologie. Legt man Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie zugrunde und verbindet sie mit den beiden Postulaten, dass das Universum von uns aus betrachtet in jeder Richtung im wesentlichen gleich aussehe und dass unsere Position im Universum durch nichts von jeder anderen ausgezeichnet sei, dann ergeben sich kosmologische Modelle, die bis auf wenige Parameter festgelegt sind. Zu diesen Parametern gehören die mittlere Materiedichte im Universum, seine heutige Ausdehnungsrate und die so genannte Kosmologische Konstante.

Je nachdem, welche Werte diese Parameter annehmen, gibt es Weltmodelle mit oder ohne Urknall. Allerdings lässt sich schon aus wenigen gesicherten Beobachtungsdaten schließen, dass es einen Urknall gegeben haben muss. Es gibt daher sehr gute theoretische und experimentelle Gründe anzunehmen, dass unser Universum sich aus einem sehr heißen und dichten frühen Zustand entwickelt hat, indem es sich ausdehnte und abkühlte und damit die Voraussetzungen dafür schuf, dass die Strukturen entstehen konnten, die wir heute sehen.

Es war schon vor einigen Jahrzehnten erkannt worden, dass diese Vorstellung eindeutige beobachtbare Konsequenzen hat. In der sehr heißen frühen Phase des Universums musste eine Vielzahl von Elementarteilchen entstanden sein, darunter auch die Teilchen des Lichts, die Photonen. So lange das Universum sehr heiß war, konnten sich Elektronen, Neutronen und Protonen nicht zu Atomen verbinden. Das kosmische Material bestand daher nicht aus Atomen oder Molekülen, sondern aus einem Gemisch elektrisch neutraler sowie positiv und negativ geladener Elementarteilchen, einem so genannten Plasma. In einem Plasma können sich Photonen nicht ungehindert ausbreiten, denn sie treffen ständig auf elektrisch geladene Teilchen, die sie in zufällige Richtungen aus ihrer Bahn ablenken.

Während das Universum sich ausdehnte, kühlte sich das kosmische Plasma ab. Etwa 300.000 Jahre nach dem Urknall war die Temperatur auf etwa 4.000 Kelvin abgesunken; weit genug,

dass sich aus Elektronen und Atomkernen Atome bilden konnten. Dabei entstand vor allem Wasserstoff, aber auch andere Atome, denn schon vorher hatten aus Protonen und Neutronen leichte Atomkerne entstehen können, vor allem Heliumkerne. Mit der Entstehung der Atome verschwanden sehr schnell die elektrisch geladenen Teilchen. Innerhalb sehr kurzer Zeit wurde das kosmische Material durchsichtig, weil die Photonen sich von da an fast völlig ungehindert ausbreiten konnten.

Diese Photonen sind heute noch da, sie haben durch die Ausdehnung des Universums lediglich Energie verloren. Als sie sich vom kosmischen Material trennen konnten, hatten sie ein Spektrum, das allein durch die Temperatur des kosmischen Materials vorgegeben war. Nach seinem Entdecker spricht man von einem Planck-Spektrum. Die Photonen behielten die Form dieses Spektrums bei, so dass man ihre Gesamtheit nach wie vor durch die Angabe einer Temperatur vollständig beschreiben kann. Im Zuge der kosmischen Expansion sank diese Temperatur bis heute auf 2,73 Kelvin ab. Das bedeutet, dass der kosmische Strahlungshintergrund vorwiegend im Mikrowellenbereich leuchtet, weshalb man auch vom kosmischen Mikrowellenhintergrund spricht.

## VORHERSAGE UND ENTDECKUNG

Bereits in den 40er Jahren erkannten George Gamow und seine Mitarbeiter, dass sich auch die erwartete Temperatur des Mikrowellenhintergrunds vorhersagen ließ, und zwar aus dem Mengenverhältnis von Helium und Wasserstoff im Universum. Das kommt daher, dass das Universum sich in seiner Anfangsphase umso schneller ausdehnen konnte, je mehr Strahlung es enthielt, und umso schneller konnte es sich abkühlen. Atomkerne können sich nur dann bilden, wenn die Temperatur unter eine bestimmte Schwelle gefallen ist, denn anderenfalls trennen sich Protonen und Neutronen ebenso schnell wieder, wie sie sich vereinigen konnten. Sobald also die Temperatur unter diese Schwelle gefallen war, konnten sich Neutronen und Protonen zu Atomkernen verbinden. Freie Neutronen, also Neutronen außerhalb von Kernen, sind aber instabil, denn sie zerfallen mit einer Halbwertszeit von etwa einer Viertelstunde. Wenn die Abkühlung des Universums sehr langsam vor sich geht, zerfallen die meisten Neutronen schon, bevor sie sich in Atomkernen anlagern können, und es entstehen kaum Helium und kaum schwerere Kerne. Kühlt

das Universum sich dagegen sehr schnell ab, waren noch sehr viele Neutronen verfügbar, als Kerne sich bilden konnten, und entsprechend viel Helium konnte sich bilden.

Die Menge des Heliums im Universum ist also ein Maß dafür, wie schnell sich das Universum in seiner Anfangsphase ausdehnen konnte, und damit indirekt ein Maß für die Dichte der Strahlungsenergie zu dieser Zeit. Diese wiederum lässt sich durch die Temperatur der Strahlung vollständig angeben, und damit ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Menge des Heliums im Universum und der Temperatur des Mikrowellenhintergrunds. Der Wert, den Gamow und andere damals berechneten, war ungenau, denn die Menge des kosmischen Heliums war nur ungenau bekannt. Trotzdem wusste man seitdem, dass der kosmische Strahlungshintergrund vorwiegend im Mikrowellenbereich leuchten sollte.

Entdeckt wurde er 1964 von Penzias und Wilson, aber sie erkannten ihn nicht als solchen. Sie stellten fest, dass die Antenne, die sie testeten, ein „Rauschen“ abgab, das sich nicht unterdrücken ließ und das völlig unabhängig davon war, wohin die Antenne zeigte. Unter einem entsprechend bescheidenen Titel veröffentlichten sie ihre Entdeckung. Eine Gruppe von Kosmologen um Robert Dicke in Princeton wusste jedoch sofort, was Penzias und Wilson wirklich gemessen hatten: Sie hatten den kosmischen Mikrowellenhintergrund entdeckt. Dicke und seine Mitarbeiter waren nur wenige Monate davon entfernt gewesen, selbst experimentell danach zu suchen. Nun waren ihnen Penzias und Wilson um Haarsbreite zuvor gekommen. Die Entdeckung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds war und ist eine der tragenden Säulen der modernen Kosmologie, denn seine Existenz folgt zwingend aus der Urknalltheorie, und umgekehrt erklärt ihn die Urknalltheorie auf einfachste Weise.

#### SUCHE NACH UNREGELMÄSSIGKEITEN

Der kosmische Mikrowellenhintergrund warf sofort ein neues Problem auf. Offensichtlich sind wir von sehr ausgeprägten kosmischen Strukturen umgeben. Wir befinden uns in einer Spiralgalaxie, diese ist Mitglied einer Galaxiengruppe, diese befindet sich am Rande eines Galaxienhaufens, und selbst Galaxienhaufen sind durch Materiebrücken miteinander verbunden. Diese Strukturen müssen im frühen Universum angelegt worden sein. Dem kosmischen Material müssen also bereits sehr früh kleine Unregelmäßigkeiten aufgeprägt gewesen sein, die dann im Laufe der kosmischen Entwicklung zu den Strukturen anwachsen konnten, die wir in unserer Umgebung sehen. Diese Unregelmäßigkeiten müssen dann aber auch im kosmischen Mikrowellenhintergrund erscheinen. Das bedeutet, dass die Temperatur des Mikrowellenhintergrunds nicht in jeder Richtung *genau* gleich sein darf, sondern eine schwache Richtungsabhängigkeit, eine Anisotropie, aufweisen muss. Diese Erwartung löste unmittelbar nach der Entdeckung des Mikrowellenhintergrunds die Suche nach seiner Anisotropie aus.

Siebenundzwanzig Jahre lang, von 1965 bis 1992, blieb diese Suche erfolglos. Während dieser Zeit wurden die Erwartungen an die Größe der Anisotropie durch Theorie und Experiment gleichermaßen immer wieder korrigiert. Ebenso wie man das Spektrum des Mikrowellenhintergrunds durch die Angabe einer Temperatur charakterisieren kann, lässt sich die Anisotropie als richtungsabhängige Temperaturschwankung am Himmel beschreiben. Während der genannten 27 Jahre sank die Erwartung an die Größe dieser Temperaturschwankungen von 10% auf 0,001% der mittleren Temperatur von 2,73 Kelvin, denn man erkannte, dass nicht leuchtende, sondern Dunkle Materie die entscheidende Rolle im Universum spielt.

Ernste Zweifel waren aufgekommen, ob unsere Vorstellung von der Entstehung der Strukturen im Universum richtig sei, als der amerikanische Satellit *Cosmic Background Explorer* (COBE) gestartet wurde. Innerhalb sehr kurzer Zeit übermittelte COBE zwei fundamentale kosmologische Ergebnisse zur Erde: Erstens folgt das Spektrum des kosmischen Mikrowellenhintergrunds mit extremer Genauigkeit einem Planck-Spektrum, wie es die Urknall-Theorie verlangt. Zweitens fand COBE die lang erwarteten Schwankungen in der Temperatur des Mikrowellenhintergrunds. Zwar konnte COBE nur solche Strukturen sehen, die am Himmel mindestens 7 Grad groß waren. Aber auch auf solchen recht großen Winkelskalen schwankt die Temperatur des Mikrowellenhintergrunds um etwa zwei Hundertstel Promille. Stellt man sich einen Ozean vor mit einer Tiefe von tausend Metern, entsprechen diese Schwankungen einem Wellengang mit etwa zwei Zentimetern Höhe. Eine wahrhaft sanfte Dünung!

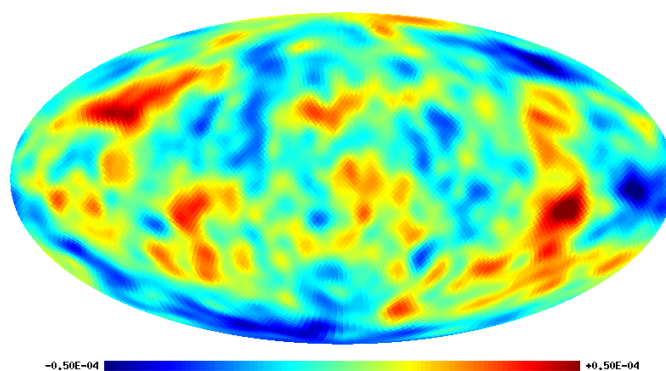


ABBILDUNG 1.—Simulierte Himmelskarte der Schwankungen in der Temperatur des kosmischen Mikrowellenhintergrunds bei einer Winkelauflösung von 7 Grad, wie COBE sie erreichte. Blaue Farbe kennzeichnet geringere, rote Farbe höhere Temperatur als im Mittel. Die Einheit der Zahlenwerte an der Farbskala ist Kelvin.

Zahlreiche Experimente wurden seit COBE unternommen, um die Existenz dieser Temperaturschwankungen zu bestätigen und auf kleineren Winkelskalen ihre Amplitude nachzumessen. Von der Erdoberfläche aus ist das nur sehr bedingt möglich, denn die Atmosphäre legt einen unruhigen, nur teilweise durchlässigen Schleier vor den Mikrowellenhimmel. Solche Experimente müssen daher an Orten stattfinden, die hoch gelegen, kalt oder beides sind, wie etwa der Südpol. Besser noch sind Ballon-Experimente geeignet, die aus der Stratosphäre beobachten, wo die Atmosphäre kaum noch stört. Obwohl die Erfolge dieser Experimente spektakulär sind, erwartet man sich die besten Ergebnisse von Satelliten-Experimenten. Zwei solche Satelliten werden derzeit gebaut, die amerikanische *Microwave Anisotropy Probe* (MAP) und der europäische *Planck*-Satellit.

Nachdem die Existenz der Unregelmäßigkeiten im Mikrowellenhintergrund als zweifelsfrei nachgewiesen gelten darf, stellt sich die Frage, warum denn weitere Experimente durchgeführt werden sollen, die diese winzigen Temperaturschwankungen immer genauer nachweisen sollen? Um diese Frage zu beantworten, müssen wir betrachten, woher die Schwankungen kommen, welche physikalischen Prozesse sie also hervorgerufen haben.

#### ALS DER NEBEL SICH HOB

Wie erwähnt, zeigt der kosmische Mikrowellenhintergrund das Universum in dem Zustand, in dem es war, als die Elektronen, Protonen und schwereren Atomkerne des kosmischen Plasmas

sich zu Atomen verbinden konnten. Damit wurde das kosmische Material elektrisch neutral, und die Photonen konnten sich frei bewegen. Leicht irreführend wird dieser Vorgang als „Rekombination“ bezeichnet: Elektronen und Atomkerne wurden zu Atomen kombiniert. (Für die Vorsilbe „re“ gibt es keinen rechten Grund, denn natürlich fanden zu dieser Zeit Elektronen und Atomkerne zum ersten Mal zusammen.) Die Rekombination geschah nicht auf einen Schlag, sondern dauerte eine Weile, in der das Universum von seinem anfänglichen undurchsichtigen in den durchsichtigen Zustand überging. Vielleicht lässt sich dieser Vorgang damit vergleichen, wie sich an einem Herbstmorgen der Nebel hebt. Was geschah während dieser Übergangsphase?

Drei wesentliche physikalische Effekte müssen in Betracht gezogen werden:

1. *Der Sachs-Wolfe-Effekt*: Die Strukturen, die wir heute in unserer kosmischen Nachbarschaft beobachten können, mussten bereits angelegt gewesen sein, als die Rekombination begann. Anderenfalls hätten sie sich bis heute nicht zu den ausgeprägten Gebilden entwickeln können, die wir sehen. Es gab also, als die Rekombination einsetzte, bereits Verdichtungen und Verdünnungen des kosmischen Materials. Photonen, die sich in verdichtetem Material aufhielten, als sie frei wurden, mussten einen gewissen Teil ihrer Energie dafür aufbringen, das überdichte Gebiet zu verlassen, denn seine Schwerkraft überstieg die der Umgebung. Dieser Energieverlust bedeutete eine Vergrößerung der Lichtwellenlänge, die als Verringerung der Photonen-Temperatur beschrieben werden kann. Photonen, die in überdichtetem Material frei wurden, haben also eine etwas niedrigere als die mittlere Temperatur.

Umgekehrt erging es Photonen, die sich in unterdichtetem Material aufhielten, als der Nebel sich hob. Die Schwerkraft des unterdichten Gebiets ist geringer als die der Umgebung, so dass die Photonen aus unterdichten Gebieten gewissermaßen herausgezogen wurden. Sie gewannen dabei Energie, konnten ihre Wellenlänge verkürzen und damit ihre Temperatur erhöhen.

Dieser Effekt, der allein darauf beruht, dass die Photonen während der Rekombination teils aus überdichten Gebieten herausklettern mussten und teils von unterdichten Gebieten weggeschoben wurden, heißt nach seinen Entdeckern *Sachs-Wolfe-Effekt*.

2. *Akustische Schwingungen*: Aufgrund seiner noch recht hohen Temperatur hatte das kosmische Gemisch aus Plasma und Photonen einen Druck, der bestrebt war, der Schwerkraft entgegen zu wirken. Überdichte Materiewolken, die sich auf Grund der Schwerkraft hätten zusammenziehen sollen, wurden demnach durch den Gasdruck wieder auseinander getrieben, bis die Schwerkraft wieder überwog, kollabierten dann, bis der Druck überwog, und so fort; mit anderen Worten: Das Wechselspiel zwischen Schwerkraft und Druck führte zu Schwingungen im kosmischen Plasma.

Dieser Vorgang ist einem gewöhnlichen Federpendel vergleichbar. Das Gewicht des Pendels wird durch die Schwerkraft nach unten, durch die Federspannung aber nach oben gezogen. Beide Kräfte zusammen sorgen dafür, dass das Gewicht sich auf und ab bewegt, dass also das Pendel schwingt.

Im kosmischen Fall können nur ausreichend kleine Materiewolken schwingen. Das liegt daran, dass die Schallgeschwindigkeit eine gewisse endliche Zeit braucht, um von einem Rand der Wolke zum anderen zu kommen. Das bedeutet, dass die Information darüber, dass der eine Rand der

Wolke sich auf deren Zentrum zu bewegt, den gegenüberliegenden Rand der Wolke umso später erreicht, je größer die Wolke ist. Der Druck in der Wolke baut sich demnach erst mit einer gewissen Verzögerung auf, die mit der Größe der Wolke wächst. Umgekehrt kollabiert eine Materiewolke umso schneller, je mehr Material sie enthält. Dementsprechend gibt es eine Grenzgröße dergestalt, dass noch größere Wolken schneller kollabieren, als der Druck sie daran hindern könnte. Solche und größere Wolken geraten nicht in Schwingungen, sondern kollabieren geradewegs.

Ein Beispiel für eine Auswirkung der endlichen Schallgeschwindigkeit sind Überschallflugzeuge. In dem Moment, in dem ihr Schall uns erreicht, haben sie uns längst überquert, und es ist zu spät, dem Piloten zuzurufen, er möge vom Gas gehen: Das entsprechende zurückgesandte Schallsignal würde ihn nie erreichen.

Für die Auswirkungen dieses Effekts entscheidend ist, dass die endliche Schalllaufzeit und das endliche Alter des Universums dazu führen, dass die Schwingungen von Materiewolken gleicher Größe synchronisiert werden. Betrachten wir eine Wolke, die klein genug ist, dass der Schall sie in dem Zeitraum zwischen dem Urknall und dem Einsetzen der Rekombination durchqueren kann. Noch vor Beginn der Rekombination kann sich in ihr der Druck aufbauen, der den Kollaps bremst. Kleinere Materiewolken schwingen bereits, größere noch nicht. Entscheidend ist, dass sich Materiewolken gleicher Größe zu einem gegebenen Zeitpunkt vor der Rekombination in derselben Schwingungsphase befinden, weil sie zur selben Zeit zu schwingen beginnen konnten. Da diese Schwingungen Schallwellen vergleichbar sind, nennt man sie akustische Schwingungen.

3. *Silk-Dämpfung*: Der dritte wesentliche Effekt wird jedem sofort einleuchten, der einmal versucht hat, bei starkem Herbstwind trockenes Laub auf einen Haufen zu kehren: Der Haufen wird immer wieder verweht. Ähnlich geht es kosmischen Materiewolken im „Wind“ der Photonen. So lange noch elektrisch geladene Teilchen im kosmischen Gas vorhanden sind, so lange also die Rekombination noch nicht abgeschlossen ist, wechselwirken die Photonen kräftig mit dem Plasma. Sie tendieren daher dazu, entstehende Materiewolken wieder auseinander zu treiben. Von diesem Effekt bleiben nur solche Materiewolken unberührt, die groß und damit massereich genug sind, trotz des „Gegenwindes“ zu kollabieren. Kleinere Materiewolken werden zerstört oder, wie man auch sagt, „weggedämpft“. Ebenfalls nach seinem Entdecker heißt dieser Vorgang *Silk-Dämpfung*.

Zusammengefasst, lässt die gesamte Wirkung dieser drei Effekte folgendes erwarten: Ganz große Dichteschwankungen im Universum beeinflussen die Temperatur der Photonen nur durch den Sachs-Wolfe-Effekt. Photonen müssen aus ihnen herausklettern oder werden aus ihnen herausgezogen und verlieren oder gewinnen dabei Energie. Weitere Effekte beeinflussen sie nicht.

Geht man zu kleineren Dichteschwankungen, setzen ab einer bestimmten Maximalgröße Schwingungen ein. Diese Maximalgröße ist durch das Alter des Universums zum Zeitpunkt der Rekombination und die Schallgeschwindigkeit im kosmischen Material bestimmt, und diese beiden physikalischen Größen sorgen auch dafür, dass die Schwingungen in Materiewolken gleicher Größe synchronisiert werden. Diese synchronisierten Schwingungen rufen charakteristische Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund hervor.

Geht man schließlich zu noch kleineren Dichteschwankungen über, macht sich der Effekt der Silk-Dämpfung bemerkbar: Je kleiner sie sind, umso effektiver werden Schwankungen in

der Materiedichte „verweht“. Dementsprechend werden Temperaturschwankungen auf sehr kleinen Skalen verwischt.

#### ANALYSE VON HIMMELSKARTEN

Im vorigen Abschnitt wurde deutlich, dass die Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund je nach ihrer Größe typische Eigenschaften aufweisen sollten. Wie kann man diese Temperaturschwankungen abhängig von ihrer Größe beschreiben?

Üblicher Weise verwendet man dazu die Technik der Fourier-Transformation. Sie zerlegt die untersuchte Größe in Sinus- und Cosinuskurven aller möglichen Wellenlängen und gibt an, welche Wellenlängen wie häufig benötigt werden, um die Größe zu beschreiben. Ein typisches Beispiel ist die Zerlegung des Sonnenlichts beim Durchgang durch ein Prisma. Ein einfallender weißer Lichtstrahl wird nach allen Regenbogenfarben in ein Lichtbündel aufgefächert. Da die Farbe des Lichts ein Maß für seine Wellenlänge ist, gibt die Intensität der einzelnen Farben an, wie groß der Anteil der einzelnen Wellenlängen am Farbmisch des weißen Lichtstrahls war. Entsprechend funktioniert eine Fourier-Transformation: Der Durchgang durch das Prisma entspricht der Transformation, das farbige Spektrum der Fourier-Transformierten. Völlig analog kann man andere Größen in ihre strukturellen Bestandteile zerlegen, diese nach ihrer Wellenlänge sortieren und das Ergebnis durch die Häufigkeit quantifizieren, mit der einzelne Wellenlängen in der ursprünglichen Größe vorkamen.

Bei der Analyse von Himmelskarten geht man fast genau so vor, nur verwendet man statt der Sinus- und Cosinusfunktionen der Fourier-Transformation so genannte Kugelflächenfunktionen. Wie bei der Fourier-Transformation ist das Ergebnis ein Spektrum, das angibt, wie stark Strukturen bestimmter Größe in der Himmelskarte vertreten sind. „Größe“ bezieht sich hier natürlich auf die Winkelausdehnung der Strukturen. Zur Unterscheidung vom elektromagnetischen Spektrum spricht man hier von einem „Leistungsspektrum“.

#### DAS LEISTUNGSSPEKTRUM

Aufgrund der vorausgegangenen Überlegungen zu den physikalischen Prozessen, die Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund erzeugen können, lässt sich nun qualitativ abschätzen, wie sein Leistungsspektrum aussehen sollte.

Sehr große Strukturen im Mikrowellenhintergrund können nur durch den Sachs-Wolfe-Effekt hervorgerufen worden sein. Sind die Strukturen nämlich größer als die Strecke, die der Schall zwischen dem Urknall und der Rekombination zurücklegen konnte, kann der Druck keinen Einfluss nehmen, und die Silk-Dämpfung setzt erst bei sehr viel kleineren Strukturen ein.

Ausreichend kleine Strukturen konnten durch das Wechselspiel zwischen Druck und Schwerkraft in Schwingungen versetzt werden. Schwingungen von Strukturen bestimmter Größe waren synchronisiert. Sie führten zu Verdichtungen und Verdünnungen des kosmischen Materials sowie zu beschleunigter und verzögerter Bewegung. Damit erzeugten sie Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund, die im Leistungsspektrum als charakteristisches Wellenmuster erscheinen. Physikalisch nicht ganz richtig werden die Maxima auch als „Doppler-Peaks“ bezeichnet.

Zu noch kleineren Strukturen hin setzt die Silk-Dämpfung ein und unterdrückt sie. Das bedeutet, dass so gut wie keine sehr kleinen Strukturen im kosmischen Mikrowellenhintergrund zu erwarten sind. Das Leistungsspektrum fällt daher zu sehr kleinen Strukturen hin steil (exponentiell) ab.

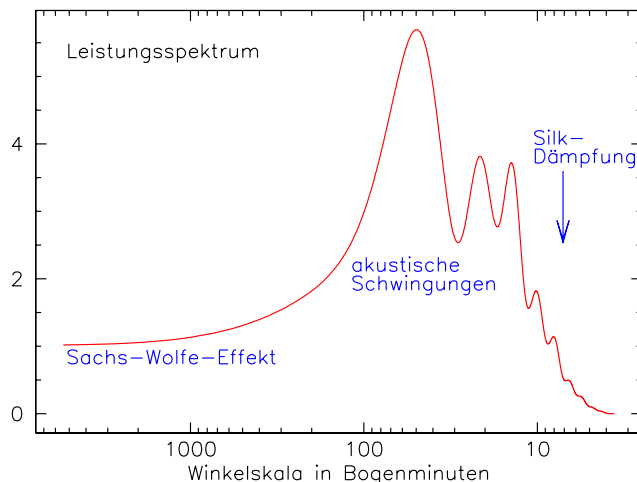


ABBILDUNG 2.—Beispiel für ein mögliches Leistungsspektrum des kosmischen Mikrowellenhintergrunds. Die Abszisse gibt die Größe der Strukturen in Bogenminuten an, die Ordinate ist willkürlich normiert. Der Konvention entsprechend nimmt die Größe der Strukturen von links nach rechts ab. Der flache Teil der Kurve bei großen Strukturen wird durch den Sachs-Wolfe-Effekt hervorgerufen. Zwischen einigen zehn und einigen 100 Bogenminuten erzeugen die akustischen Schwingungen die charakteristische Abfolge von Maxima und Minima, die zu noch kleineren Winkelgrößen hin durch die Silk-Dämpfung unterdrückt werden. COBE beobachtete bei 420 und mehr Bogenminuten, also im reinen Sachs-Wolfe-Teil des Leistungsspektrums.

Ein typisches Beispiel für ein mögliches Leistungsspektrum des kosmischen Mikrowellenhintergrunds zeigt Abb. 2.

#### KOSMOLOGISCHE PARAMETER

Das Leistungsspektrum des kosmischen Mikrowellenhintergrunds weist also eine ganz charakteristische Gestalt auf. Zwischen einem flachen Verlauf bei großen Strukturen und dem exponentiellen Abfall zu sehr kleinen Strukturen hin liegt ein Bereich, in dem einige deutliche Maxima und Minima aufeinander folgen. Sie werden durch synchronisierte akustische Schwingungen hervorgerufen. Die wesentliche Größe, die die Grundwellenlänge dieser Schwingungen bestimmt, ist der Schallhorizont, der wiederum durch das Alter des Universums zur Zeit der Rekombination festgelegt wird.

Aus dem Analogon zwischen den akustischen Schwingungen und dem Federpendel lässt sich schließen, dass die Größe der Rückstellkraft die Auslenkung und die Frequenz der Schwingungen entscheidend bestimmt. Die Rolle der Rückstellkraft im Federpendel übernimmt hier der Druck, und der wiederum hängt davon ab, wieviel Gas dem kosmischen Material beigemischt ist.

Vergleicht man Leistungsspektren, wie sie für verschiedene Kombinationen kosmologischer Parameter zu erwarten sind, zeigt sich, dass die Lage der Maxima und Minima, ihr Abstand zueinander, ihre absolute Höhe und die Tiefe der Einsenkungen zwischen ihnen empfindlich von den kosmologischen Parametern abhängen. Umgekehrt bedeutet das, dass diese kosmologischen Parameter sehr genau bestimmt werden können, wenn nur das Leistungsspektrum des kosmischen Mikrowellenhintergrunds ausreichend präzise gemessen werden kann.

Hierin begründet liegt eine der wesentlichen Triebkräfte hinter den modernen Experimenten zum kosmischen Mikrowellenhintergrund. Die meisten kosmologischen Parameter sind bis heute nur recht ungenau bekannt. Unsicherheiten von einigen zehn Prozent sind üblich, und dieser Zustand ist sehr unbefriedigend, denn so gut wie alle kosmologischen Theorien hängen von den

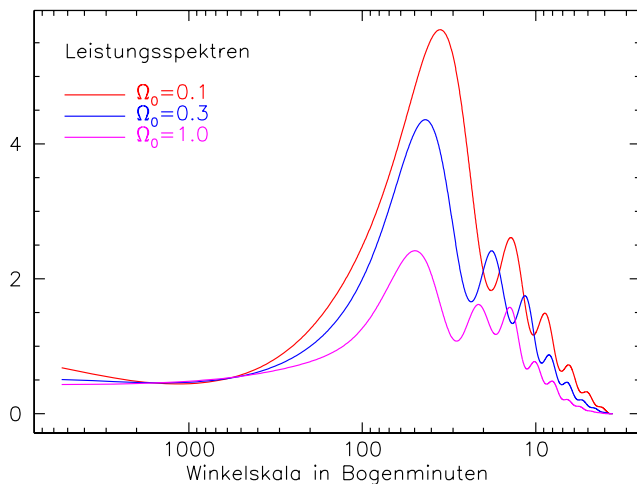


ABBILDUNG 3.—Leistungsspektren des kosmischen Mikrowellenhintergrunds für verschiedene Werte des kosmischen Dichteparameters  $\Omega_0$ . Die Achsen sind mit denen der Abbildung 2 identisch. Mit abnehmender kosmischer Dichte, also abnehmendem  $\Omega_0$ , nimmt die Amplitude der akustischen Schwingungen zu, und die Maxima höherer Ordnung (rechts neben dem höchsten Maximum) verschieben sich zu kleineren Winkelgrößen hin.

kosmologischen Parametern wesentlich ab. So lange diese nicht genau bekannt sind, bleibt die Vorhersagekraft und damit die Prüfbarkeit der Theorien beschränkt.

Wie genau die kosmologischen Parameter aus dem Leistungsspektrum des Mikrowellenhintergrunds abgeleitet werden können, hängt ganz entscheidend davon ab, wie viele der Maxima und Minima des Leistungsspektrums dem Experiment zugänglich sind. Maßgeblich dafür ist die Winkelauflösung des Experiments, also die kleinste Winkelgröße, die von dem Experiment noch erkannt und vermessen werden kann. Aus den Abbildungen 2 und 3 geht hervor, dass eine Winkelauflösung von einigen Bogenminuten ausreicht, den gesamten Bereich der akustischen Maxima und Minima zu überdecken. Zu noch kleineren Winkelskalen hin unterdrückt die Silk-Dämpfung die Strukturen.

Winkelauflösungen im Bereich einiger Bogenminuten erscheinen überraschend groß gegenüber der Auflösung typischer optischer Teleskope. Die Sehschärfe von erdgebundenen Teleskopen wird durch die Unruhe der Atmosphäre begrenzt und liegt in sehr guten Fällen bei einigen Zehntel Bogensekunden. Das weltraumgestützte *Hubble*-Teleskop unterliegt dieser Beschränkung nicht und erreicht eine Winkelauflösung von etwa 0,1 Bogensekunde. Die Sehschärfe eines Teleskops ist bestimmt durch das Verhältnis zwischen der Wellenlänge der empfangenen Strahlung und dem Durchmesser des Teleskopobjektivs oder -spiegels. Mikrowellen haben Wellenlängen im Millimeterbereich, während sichtbares Licht im Bereich einiger Zehntel Mikrometer liegt. Mikrowellen sind also um das Tausend- bis Zehntausendfache länger als die Wellen sichtbaren Lichts, und dementsprechend bräuchte man Teleskope mit mindestens einigen Kilometern Objektivöffnung, um ähnliche Auflösungen zu erreichen. Eine Auflösung von wenigen Bogenminuten im Mikrowellenbereich ist phantastisch gut. COBE, wie erwähnt, hatte eine Winkelauflösung von sieben Grad!

Eine hohe Winkelauflösung allerdings reicht nicht aus. Gleichzeitig sollte ein möglichst großer Teil des Himmels beobachtet werden, um möglichst viele Ausschnitte vorgegebener Größe vermessen zu können: Um die Unsicherheit zu verringern, die sich aus der Auswertung einer Stichprobe ergibt, sollte man die Stichprobe vergrößern. Hohe Winkelauflösung

und die Überdeckung eines möglichst großen Teils des Himmels sind daher ein wesentliches Ziel gegenwärtiger und zukünftiger Experimente. Aus zahlreichen Experimenten vom Erdboden und Ballons aus wissen wir bereits, dass das erste (höchste) Maximum im Leistungsspektrum des Mikrowellenhintergrunds tatsächlich auftritt, und dass von dort zu kleineren Winkelgrößen hin eine deutliche Absenkung folgt.

## MIKROWELLEN-VORDERGRÜNDE

Der kosmische Mikrowellenhintergrund ist die älteste und am weitesten entfernte Quelle am Himmel, die überhaupt beobachtet werden kann. Dementsprechend musste sein Licht das gesamte beobachtbare Universum durchqueren, bevor es uns erreichen konnte. Auf diesem langen Weg konnte den Photonen des Mikrowellenhintergrunds allerlei zustoßen, und Photonen anderer Arten von Quellen konnten sich mit ihnen vermischen.

Ein Beispiel für solche Quellen „sekundärer“ Mikrowellenstrahlung sind weit entfernte Galaxien, die einen Großteil ihres Lichts im infraroten Spektralbereich aussenden. Aufgrund der Ausdehnung des Universums wird die Wellenlänge der Infrarotstrahlung in den Mikrowellenbereich hinein gedehnt, bis sie bei uns ankommt. Die weit entfernten Galaxien überlagern sich als punktförmige Quellen dem kosmischen Mikrowellenhintergrund.

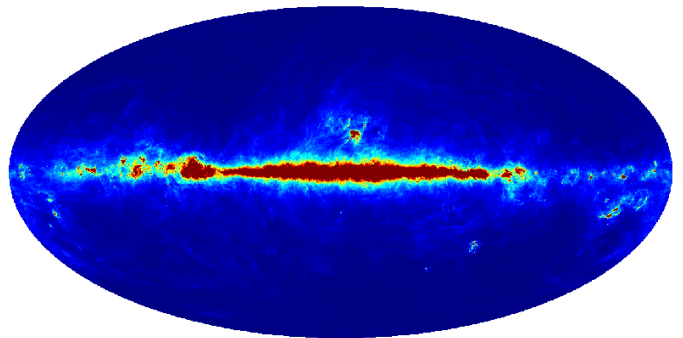


ABBILDUNG 4.—Infrarot-Emission durch warmen Staub in der Milchstraße. Der Großteil der Emission kommt aus der Ebene der galaktischen Scheibe, aber Staub wird auch bei relativ großen galaktischen Breiten beobachtet.

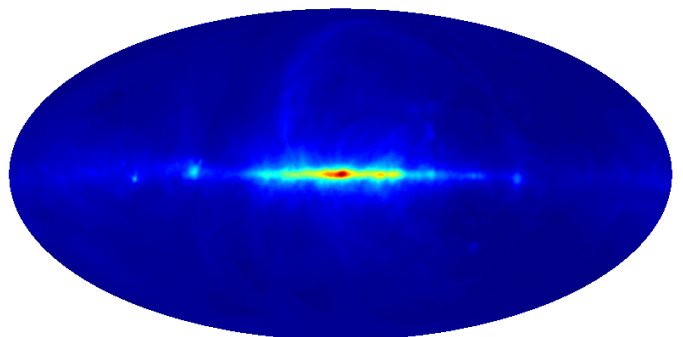


ABBILDUNG 5.—Radio-Emission durch Elektronen im galaktischen Magnetfeld.

Auch unsere Galaxis, die Milchstraße, emittiert Mikrowellenstrahlung. Dazu tragen drei physikalisch verschiedene Prozesse bei, so dass das Erscheinungsbild der Milchstraße im Mikrowellenbereich stark von der Frequenz oder Wellenlänge abhängt, in

der sie beobachtet wird. Einer der Prozesse hängt mit dem Magnetfeld der Milchstraße zusammen. Elektronen, die sich durch die Milchstraße bewegen, beschreiben Spiralbahnen im Magnetfeld, und dabei geben sie vorwiegend Radio-, aber auch Mikrowellenstrahlung ab. Die zweite Quelle von Mikrowellenstrahlung in der Milchstraße ist warmer Staub, der vor allem Infrarot-, aber auch Mikrowellenstrahlung emittiert. Ein dritter Prozess schließlich tritt in heißem Gas auf, in dem Elektronen von Atomkernen getrennt sind. Vorbeifliegende Elektronen werden von den Atomkernen aus ihrer Bahn abgelenkt und geben dabei unter anderem Mikrowellenstrahlung ab.

Ein Teil der galaktischen Mikrowellenstrahlung ist, ähnlich wie das leuchtende Band der Milchstraße selbst, auf einen schmalen Streifen begrenzt, der sich um den Himmel zieht. Die Strahlung jedoch, die auf das galaktische Magnetfeld zurückzuführen ist, tritt auch in recht großem Abstand von der galaktischen Scheibe noch auf.

Schließlich geben auch Körper im Sonnensystem Mikrowellenstrahlung ab, so z.B. die Sonne, der Mond und die großen Planeten. Das Sonnensystem enthält aber auch Staub, der vorwiegend in der Ebene der Planetenbahnen liegt und ähnlich dem Staub in der Milchstraße Infrarot- und Mikrowellenstrahlung emittiert. Die Ausläufer dieser diffusen Staubemission im sichtbaren Spektralbereich werden *Zodiakallicht* genannt. Es ist möglich, dass auch einige Kleinplaneten und sogar Kometen im Mikrowellenbereich sichtbar sein werden, die COBE wegen seiner niedrigeren Empfindlichkeit und seiner geringeren Winkelauflösung entgangen sind.

Auf ihrem Weg zu uns durchqueren die Photonen des Mikrowellenhintergrunds gelegentlich auch einen Galaxienhaufen. Sie wurden so genannt, weil sie im sichtbaren Licht als Ansammlungen einiger hundert bis tausend Galaxien erscheinen, die aber nur etwa zehn Prozent der Gesamtmasse der Galaxienhaufen ausmachen. Weitere zehn Prozent trägt ein heißes Gas bei, das in den Galaxienhaufen diffus verteilt ist und aufgrund seiner hohen Temperatur im Röntgenbereich strahlt. Der weit überwiegende Rest der Masse besteht aus Dunkler Materie.

Galaxienhaufen vereinigen in Kugeln von einigen Millionen Lichtjahren Radius die Masse von bis zu etwa 10.000 Galaxien. Sie sind die größten Objekte im Universum, die von ihrer Schwerkraft noch zusammengehalten werden. Sie entwickeln sich spät in der kosmischen Geschichte auf eine Weise, die empfindlich davon abhängt, wie das Universum genau beschaffen ist, welche Werte also die kosmischen Parameter haben. Deshalb sind Galaxienhaufen für die Kosmologie sehr wichtig.

Durchqueren also Photonen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds auf ihrem Weg zu uns das heiße Gas in einem Galaxienhaufen, stoßen sie gelegentlich mit den Elektronen zusammen, die sich sehr schnell in dem Gas bewegen. Die Photonen haben eine relativ geringe, die Elektronen eine hohe Energie. Wenn sie zusammenstoßen, übertragen deshalb die Elektronen einen Teil ihrer Energie auf die Photonen. Photonen werden also durch die Elektronen in Galaxienhaufen von niedriger zu hoher Energie hin umverteilt, so dass bei niedriger Energie (großer Wellenlänge) Photonen fehlen, die bei höherer Energie (kleinerer Wellenlänge) wieder auftauchen. Die Grenze zwischen niedriger und hoher Energie liegt bei einer Frequenz von etwa 218 GHz.

Beobachtet man den Mikrowellenhintergrund bei einer kleineren Frequenz (größeren Wellenlänge), werfen die Galaxienhaufen einen Schatten auf den Hintergrund, während sie bei höherer Frequenz (kleinerer Wellenlänge) als Quellen in Erscheinung treten. Dieser Effekt der Umverteilung von Photonen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds durch das heiße Plasma in Galaxienhaufen heißt nach seinen Entdeckern *Sunyaev-Zel'dovich-Effekt*.

Der Sunyaev-Zel'dovich-Effekt erlaubt, Galaxienhaufen auch

in großer Entfernung zu entdecken. Es ist daher ein wichtiger Nebenaspekt vor allem der geplanten Satellitenbeobachtungen des Mikrowellenhimmels, Galaxienhaufen aufgrund dieses Effekts zu entdecken.

Die Überlagerung und Veränderung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds durch alle diese zusätzlichen Strahlungsquellen und Effekte ist insofern natürlich lästig, als sie den direkten Zugang zum kosmischen Mikrowellenhintergrund erschweren. Andererseits führen sie dazu, dass Beobachtungen des Mikrowellenhimmels nicht nur erlauben werden, kosmologische Parameter mit hoher Genauigkeit zu messen, sondern auch eine Fülle von Informationen über die „sekundären“ Quellen der Mikrowellenstrahlung liefern werden. Was für den einen Zweck der Experimente sehr störend ist, stellt anderen Zweigen der Astrophysik und Kosmologie eine große Menge höchst erwünschter Daten zur Verfügung.

Natürlich müssen die Mikrowellen-Vordergründe und der kosmische Mikrowellenhintergrund möglichst sauber voneinander getrennt werden, um die einzelnen Komponenten getrennt analysieren zu können. Dafür ist es sehr wichtig, dass sich die Spektren der einzelnen Komponenten wesentlich voneinander unterscheiden, so dass sich das Ergebnis ihrer Mischung stark mit der Frequenz ändert, in der die Beobachtung unternommen wird. Für gegenwärtige und zukünftige Beobachtungen des Mikrowellenhintergrunds ist es daher sehr wichtig, dass sie nicht nur mit hoher Winkelauflösung den Himmel möglichst vollständig überdecken, sondern auch einen möglichst breiten Spektralbereich überbrücken.

#### DER PLANCK-SATELLIT

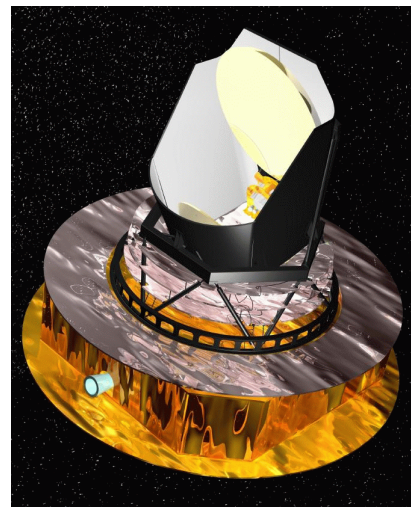


ABBILDUNG 6.—Schemazeichnung des *Planck*-Satelliten. Der Primärspiegel des Teleskops ist oben in der Mitte zu sehen, links unterhalb der Sekundärspiegel. Unterhalb des Primärspiegels liegt die Fokalebene, in der die beiden Instrumente angeordnet sind. Der gesamte Durchmesser des Satelliten beträgt knapp drei Meter.

Das ehrgeizigste derzeitige Projekt, den Mikrowellenhimmel zu vermessen, ist das europäische *Planck*-Projekt. Ziel ist es, im Jahr 2007 einen Satelliten zu starten, der im Verlauf zweier Jahre den gesamten Himmel zwei Mal beobachten soll. Dabei sollen Karten des Mikrowellenhimmels in neun verschiedenen Frequenzbändern zwischen 30 und 857 GHz entstehen, deren Winkelauflösung fünf Bogenminuten erreicht und die eine relative Genauigkeit von zwei Tausendstel Promille aufweisen. Damit werden die Himmelskarten, die *Planck* erzeugen wird, etwa 50-

fach detaillierter und etwa zehnfach genauer sein als die, die COBE liefern konnte. Auch die Winkelauflösung und die Empfindlichkeit des amerikanischen *MAP*-Satelliten werden durch *Planck* auf mindestens das Doppelte gesteigert werden. Zudem wird *MAP* nur im Frequenzbereich zwischen 22 und 90 GHz beobachten.

Der *Planck*-Satellit wird ein Spiegelteleskop von 1,5 m Durchmesser tragen. Um unerwünschte Effekte zu vermeiden, wird der Sekundärspiegel dieses Teleskops abseits der optischen Achse angebracht, ähnlich wie bei einem Schiefspiegler. Das Teleskop fokussiert die einfallende Mikrowellenstrahlung auf zwei Instrumente, das Nieder- und das Hochfrequenz-Instrument (*Low* und *High Frequency Instrument*; LFI und HFI). Das Niederfrequenz-Instrument deckt den Frequenzbereich zwischen 30 und 100 GHz ab, das Hochfrequenz-Instrument den zwischen 100 und 857 GHz. Beide Instrumente haben einen 100-GHz-Kanal, um die Instrumente gegeneinander testen und abgleichen zu können. Die Instrumente unterscheiden sich im wesentlichen durch die Technologie ihrer Detektoren. Vor allem das Hochfrequenz-Instrument muss stark gekühlt werden; seine Temperatur wird nur um ein Zehntel Grad über dem absoluten Nullpunkt liegen.

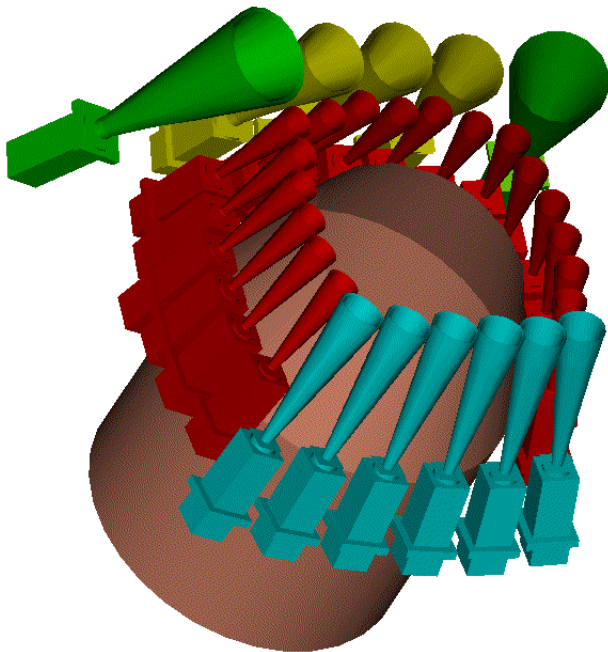


ABBILDUNG 7.—Das Niederfrequenz-Instrument. Die kegelförmigen Gebilde sind die Detektorhörner, die kranzförmig um das Hochfrequenz-Instrument angeordnet sind.

Der *Planck*-Satellit selbst wird nicht die Erde umkreisen. Statt dessen wird er zu einem der vier so genannten Lagrange-Punkte des Systems aus Erde und Mond einerseits und Sonne andererseits geschickt. In diesen Lagrange-Punkten heben sich Schwerkraft und Fliehkräfte gegenseitig auf. *Planck* wird zum äußeren Lagrange-Punkt reisen, der in etwa 1,5 Millionen Kilometer Entfernung auf der sonnenabgewandten Seite der Erde liegt. Dieser Lagrange-Punkt ist instabil. Das bedeutet, dass der Satellit sich von ihm immer weiter entfernen würde, wenn man ihn auch nur wenig aus dem exakten Lagrange-Punkt heraus bewegt. Deswegen kann *Planck* nicht einfach in seinem Lagrange-Punkt ruhen, sondern muss ihn auf einer recht komplizierten Bahn umlaufen.

Der Satellit wird sich ein Mal pro Minute um sich selbst drehen, wobei die Drehachse stets möglichst genau von der Son-

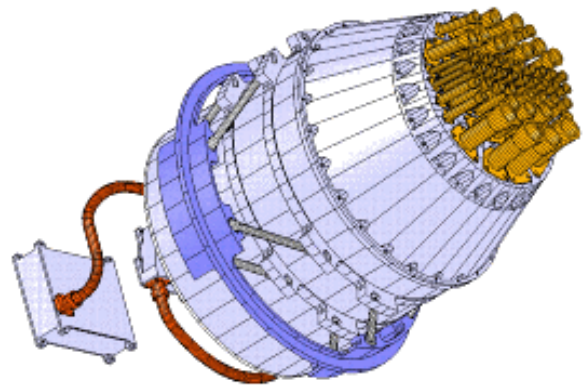


ABBILDUNG 8.—Das Hochfrequenz-Instrument. Hier sind die Detektorhörner kleiner als im Niederfrequenz-Instrument, wie es der geringeren Wellenlänge der zu messenden Strahlung entspricht. Das Hochfrequenz-Instrument wird zentral in das Niederfrequenz-Instrument eingesetzt.

ne weg gerichtet sein wird. Die optische Achse des Teleskops an Bord von *Planck* steht etwa senkrecht auf der Drehachse, so dass sie bei jeder Umdrehung des Satelliten einen Kreis am Himmel beschreibt. Jeweils für sechzig Umdrehungen des Satelliten, also jeweils eine Stunde lang, zeigt die Drehachse in dieselbe Richtung am Himmel, so dass derselbe Kreis sechzig mal beobachtet wird. Danach wird die Drehachse leicht verschoben, und der nächste Kreis wird beobachtet. Der Betrag der Verschiebung wird so gewählt, dass die Sonne möglichst genau im „Rücken“ des Satelliten bleibt. Im Lauf eines halben Jahres wird dergestalt der gesamte Himmel beobachtet, und dies wird danach noch einmal wiederholt. Weitere Beobachtungen werden voraussichtlich nicht möglich sein, weil das Kühlmittel für die Detektoren nur für eine begrenzte Zeit reicht.

#### DER DATENFLUSS

Einmal am Tag wird *Planck* jeweils zwei Stunden lang mit der Bodenstation in Perth (Australien) in Verbindung treten, um die gemessenen Daten zu übermitteln und mögliche Steuersignale zu empfangen. Von Perth aus werden die Daten an das *European Space Operations Centre* (ESOC) in Darmstadt weitergegeben. Gegenwärtigen Planungen zufolge werden sie dort entpackt, dekomprimiert und einer ersten Kontrolle unterzogen, um frühzeitig erkennen zu können, ob alle Detektoren an Bord von *Planck* ordnungsgemäß arbeiten und der Zustand des gesamten Satelliten den Erwartungen entspricht. Danach werden die Daten kalibriert, und Himmelskarten in den einzelnen Frequenzbändern werden erzeugt. Mit Hilfe aufwendiger Verfahren werden diese Frequenzkarten dann umgerechnet in Himmelskarten der physikalischen Komponenten, aus denen sich der Mikrowellenhimmel zusammensetzt. Insbesondere wird dabei die Mikrowellenemission der Milchstraße herausgerechnet, und punktförmige Quellen werden entfernt und in Katalogen zusammengestellt. Auf diese Weise wird Stück für Stück der Mikrowellenhimmel wieder freigelegt wie er war, als das Licht nach der Rekombination auf seine kosmische Reise ging.

*Planck* ist ein europäisches Projekt, an dem Gruppen aus vielen Ländern beteiligt sind. Dementsprechend wird die Auswertung der Daten an einigen verschiedenen Instituten in der Schweiz, Italien, Frankreich und Großbritannien durchgeführt

werden. Am Ende fließen die Daten am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching bei München zusammen, wo sie in eine einheitliche Form gebracht, dokumentiert, archiviert und zunächst beteiligten Wissenschaftlern, dann der wissenschaftlichen Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) unterstützt den Aufbau des Datenzentrums in Garching in erheblichem Umfang.

Umwälzung der Kosmologie und der extragalaktischen Astrophysik führen.

#### ERWARTUNGEN

Besonders die beiden Satellitenexperimente *MAP* und *Planck* sehen sich weitreichenden Erwartungen gegenüber. *MAP* soll voraussichtlich im November 2000 starten und wird vor allen Dingen messen, wie sich das Leistungsspektrum des kosmischen Mikrowellenhintergrunds zwischen dem ersten und dem zweiten Maximum verhält. Die relative Lage dieser beiden Maxima wird unter anderem Aufschluss darüber geben, ob die so genannte Inflationäre Kosmologie richtig ist.

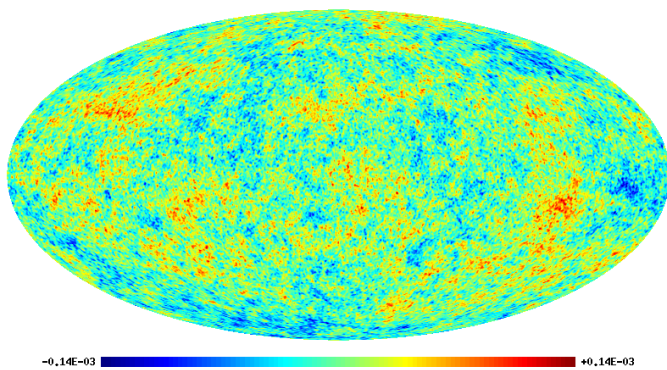


ABBILDUNG 9.—Simulierte Himmelskarte der Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund bei einer Winkelauflösung von 30 Bogenminuten.

*Planck* wird dank seiner hohen Winkelauflösung in der Lage sein, das gesamte Leistungsspektrum des Mikrowellenhintergrunds bis dorthin zu überdecken, wo es von der Silk-Dämpfung unterdrückt wird. Es wird dann möglich sein, alle wesentlichen kosmologischen Parameter mit Genauigkeiten im Promille-Bereich zu messen, was im Vergleich mit heutigen Kenntnissen ein kaum vorstellbarer Fortschritt sein wird.

Darüber hinaus wird *Planck* einige zehntausend Galaxienhaufen entdecken und etwa die gleiche Anzahl aktiver Galaxien in großen Entfernungen, also im noch recht jungen Universum. *Planck* wird genaue Karten des Staubes, des Magnetfeldes und des heißen Gases in der Milchstraße liefern, die Mikrowellenstrahlung aus dem Sonnensystem vermessen und möglicher Weise sogar Kleinplaneten und Kometen anhand ihres Mikrowellensignals entdecken. Im gesamten elektromagnetischen Spektrum zwischen Gammastrahlen und Radiowellen gibt es heute noch eine große Lücke, und *Planck* wird sie schließen.

Neben genauen kosmologischen Messungen wird *Planck* also eine Fülle von Informationen liefern, die auf beinahe alle Zweige der extragalaktischen Forschung großen Einfluss nehmen werden. Gerade weil *Planck* die letzte große Lücke im beobachteten elektromagnetischen Spektrum schließen wird, wird es dabei viele Überraschungen und neue große Rätsel geben. Es kann natürlich auch sein, dass das Leistungsspektrum des kosmischen Mikrowellenhintergrunds sich als ganz anders herausstellen wird, als wir heute erwarten. Umso interessanter: Dann müsste unsere gesamte Vorstellung von der Entwicklung der Strukturen im Universum neu überdacht werden. Was auch immer *Planck* uns enthüllen wird, wird zu einer tiefgreifenden