

DER KOSMISCHE MIKROWELLENHINTERGRUND

MATTHIAS BARTELMANN
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ASTROPHYSIK

in: „Das junge Universum“, *Sterne & Weltraum Special 1/03*, 44

EINFACHE WELTMODELLE

Die Allgemeine Relativitätstheorie erlaubt, unter zwei Annahmen eine Familie einfacher Modelle für das Universum zu konstruieren, nämlich dass das Universum isotrop und homogen sei. Das bedeutet, dass die beobachtbaren Eigenschaften des Universums nicht von der Richtung abhängen, in die wir beobachten, und dass jeder Beobachter dieselben Eigenschaften des Universums sieht, egal wo er sich befindet.

Diese beiden Annahmen sind tatsächlich erfüllt, wenn man über geeignet große Ausschnitte aus dem Universum mittelt. Bisher gibt es keine Beobachtung, die diesen beiden Annahmen stichhaltig widerspricht. Dagegen beschreiben die Weltmodelle, die sich unter Annahme von Homogenität und Isotropie konstruieren lassen, eine Reihe kosmologischer Beobachtungen mit beeindruckender Genauigkeit. Sie werden nach ihren Entdeckern Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Modelle genannt, kurz auch oft Friedmann-Modelle.

Wir wissen seit den 30er Jahren des vergangenen Jahrhunderts, dass Galaxien sich mit wenigen Ausnahmen von uns weg bewegen, und dass sie das umso schneller tun, je weiter entfernt sie von uns sind. Das Universum dehnt sich also aus. Im Rahmen der Friedmann-Modelle lassen wenige weitere Beobachtungen darauf schließen, dass das Universum sich dann auch in der Vergangenheit stets ausgedehnt haben muss. Gehen wir in der Zeit rückwärts, müssen wir einen Zeitpunkt erreichen, zu dem das Universum in einem sehr stark komprimierten, dichten und damit auch heißen Anfangszustand gewesen sein muss, aus dem es im Urknall entstand.

DER MIKROWELLENHINTERGRUND

Es dehnte sich aus und kühlte sich ab. Elementarteilchen entstanden, darunter zunächst Protonen und Neutronen, später Elektronen, Positronen und alle anderen bekannten Teilchensorten. Dabei durchlief das Universum auch Temperaturen, wie sie heute im Inneren von Sternen herrschen. Wie dort, entstanden dabei durch Kernfusion aus Wasserstoff die leichtesten chemischen Elemente, wie etwa Deuterium, Helium und Lithium. Etwa drei Minuten nach dem Urknall war das Universum so weit abgekühlt, dass die Kernfusionen zum Stillstand kamen.

Elektronen und Atomkerne waren aber noch getrennt, denn die hohen Temperaturen erlaubten noch nicht, dass Atome entstehen konnten. Es gab also ein kosmisches Plasma, ein Gemisch aus positiv und negativ geladenen Teilchen, in dem sich das Licht nicht ungestört ausbreiten konnte. Die Photonen, die Teilchen des Lichts, wurden fortwährend an den geladenen Teilchen gestreut. Das Universum war undurchsichtig.

Es dauerte etwa 400000 Jahre, bis das Universum sich so weit abgekühlt hatte, dass Atome entstehen konnten. Elektronen und Atomkerne „rekombinierten“ zu ungeladenen Atomen, und die Photonen wurden nicht mehr gestreut. Das Universum wurde durchsichtig, und die Photonen konnten sich ungehindert

ausbreiten. Durch die Ausdehnung des Universums verloren sie Energie, blieben aber als ein Meer kosmischer Strahlung erhalten.

Bereits in den 1940er Jahren erkannte George Gamow, dass das Mischungsverhältnis der leichten Elemente im Universum, besonders die relative Häufigkeit des Deuteriums gegenüber dem Wasserstoff, die heutige Temperatur dieser Hintergrundstrahlung zu berechnen erlaubt. Er erhielt einen Wert von etwa 5 Grad über dem absoluten Nullpunkt. Demnach sollten wir aus allen Richtungen gleichmäßig Strahlung im Mikrowellenbereich empfangen können, denn Strahlung mit Temperaturen von wenigen Grad hat eine typische Wellenlänge von etwa einem Millimeter.

SUCHE NACH STRUKTUREN

Gefunden wurde diese Strahlung 1965 von zwei Angestellten der Bell-Telefongesellschaft, die eine Antenne testeten und feststellten, dass sie trotz aller Bemühungen ein gewisses Grundrauschen nicht beseitigen konnten: Sie hatten die Strahlung entdeckt, die 400000 Jahre nach dem Urknall freigesetzt worden war. Die Temperatur der Mikrowellenstrahlung betrug etwa 3 Kelvin, in guter Übereinstimmung mit Gamows Vorhersage.

Der Mikrowellenhintergrund sollte nicht ideal isotrop sein, denn auch das Universum ist nicht ideal homogen und isotrop. Wir sehen in unserer kosmischen Nachbarschaft Galaxien, Galaxienhaufen und noch größere Strukturen, die bereits im jungen Universum angelegt gewesen sein mussten. Die Vorläufer der heute das Universum durchziehenden Strukturen sollten sich dem Mikrowellenhintergrund aufgeprägt haben.

Aus der Dichte der heutigen Strukturen kann man berechnen, wie groß die Amplitude der Temperaturschwankungen sein sollte. Wären sie zu klein gewesen, hätten ausgeprägte Strukturen nicht entstehen können; wären sie zu groß gewesen, hätten die heutigen Strukturen eine größere Dichte, als sie beobachtet wird. Nimmt man an, dass alle Strukturen im Universum aus der baryonischen Materie zusammengesetzt sind, die aus Protonen, Neutronen und Elektronen besteht, ergeben sich Temperaturschwankungen im Bereich einiger Tausendstel Grad.

Als man in der Lage war, Temperaturschwankungen von Tausendstel Kelvin zu messen, erwies sich der Mikrowellenhintergrund aber nach wie vor als isotrop: Die vorhergesagten Schwankungen wurden nicht gefunden. Inzwischen hatte man aber aus der Beobachtung von Galaxien und Galaxienhaufen eine Ahnung davon bekommen, dass die Materie im Universum etwa zu 80 Prozent aus einer Materieform besteht, die nicht sichtbar in Erscheinung tritt, weil sie offenbar nicht mit Licht wechselwirkt.

Solche Dunkle Materie ändert das erwartete Erscheinungsbild des Mikrowellenhintergrunds erheblich. Da sie nicht mit Licht wechselwirkt, konnte sie bereits anfangen, Strukturen zu bilden, während die baryonische Materie noch fest an die Photonen gekoppelt war. Als diese Kopplung 400000 Jahre nach dem

Urknall aufgehoben wurde, wurde die baryonische Materie von den Strukturen angezogen, die die Dunkle Materie bereits hatte bilden können. In diesem Bild genügen Temperaturschwankungen von einigen Hunderttausendstel Kelvin, um die kosmische Strukturbildung zu verstehen.

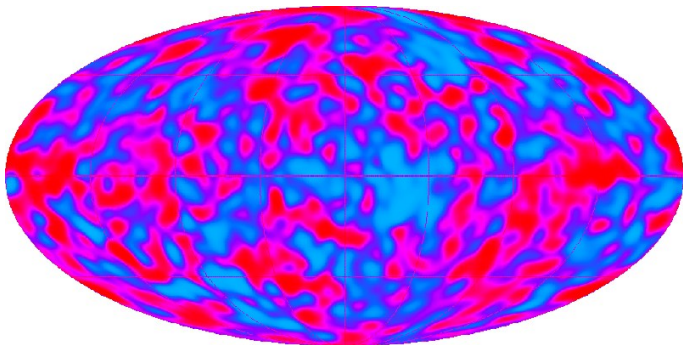


ABBILDUNG 1.—Himmelskarte der Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund, die der Cobe-Satellit nach vier Jahren Beobachtungszeit lieferte. Die Karte zeigt die Abweichung der Temperatur vom Mittelwert von 2,726 Kelvin. Die Amplitude der Schwankungen beträgt etwa ein Hunderttausendstel Kelvin.

Diese Temperaturschwankungen wurden 1992 von dem amerikanischen Satelliten „Cosmic Background Explorer“, kurz Cobe, entdeckt. Er stellte nicht nur fest, dass das elektromagnetische Spektrum des Mikrowellenhintergrunds mit atemberaubender Präzision die im Urknallmodell erwartete Form hat, sondern er fand auch, dass die Temperatur des Mikrowellenhintergrunds von Ort zu Ort um einige Hunderttausendstel Kelvin schwankt (vgl. Abb. 1). Es war eine Sensation in der Kosmologie und ein beeindruckender Erfolg der Messtechnik. Es war gelungen, derart kleine Temperaturunterschiede zu messen, obwohl der Mikrowellenhintergrund nur wenig wärmer ist als der absolute Nullpunkt.

Schnell entstand der Wunsch, den Mikrowellenhintergrund noch viel genauer zu vermessen. Cobe konnte nur solche Strukturen am Himmel sehen, deren Durchmesser mindestens 7 Grad beträgt. Das entspricht dem 14-fachen Durchmesser des Vollmonds! Die Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund sollten aber viel detailreicher sein, und sie sollten eine Fülle kosmologischer Informationen enthalten.

URSPRUNG DER TEMPERATURSCHWANKUNGEN

Drei wesentlich physikalische Mechanismen konnten Strukturen im Mikrowellenhintergrund erzeugen, nämlich der Sachs-Wolfe-Effekt, akustische Schwingungen und die Silk-Dämpfung.

Der Sachs-Wolfe-Effekt kommt dadurch zustande, dass die Photonen des Mikrowellenhintergrunds gewissermaßen in hügeligem Gelände freigesetzt wurden, als sich das kosmische Plasma zu Atomen verband. Hügel und Täler wurden durch die damals schon angelegten Strukturen gebildet. Dort, wo sich die Materie zu verdichten begonnen hatte, mussten die Photonen gegen die erhöhte Anziehungskraft anlaufen, während sie Gebieten mit verringerter Dichte leichter entkommen konnten. Wo sie eine stärkere Anziehungskraft überwinden mussten, verloren sie einen Teil ihrer Energie und wurden dadurch etwas kälter, während sie dort etwas wärmer wurden, wo sie durch eine verringerte Anziehungskraft gewissermaßen abgestoßen wurden. Die Strahlung, die aus verdichteter Materie entkam, ist also etwas kühler als im Mittel und dort etwas heißer, wo die Materie verdünnt war.

Die akustischen Schwingungen kommen durch ein Wechselspiel von Druck und Schwerkraft zu Stande. Das kosmische Material bestand aus drei wesentlichen Komponenten, nämlich aus baryonischer Materie, Photonen und Dunkler Materie. Die Schwerkraft versucht, dieses Gemisch zu verdichten. Dadurch erhöht sich der Druck des Gemischs aus Baryonen und Photonen. Sobald der Druck überwiegt, treibt er die verdichtete Materiewolke wieder auseinander. Durch die Ausdehnung nimmt der Druck wieder ab. Sobald die Schwerkraft wieder überwiegt, beginnt die Verdichtung von Neuem. Das Materiegemisch gerät also in Schwingungen, die ebenso wie Schallwellen durch Druckschwankungen getrieben werden, weshalb man sie als akustische Schwingungen bezeichnet.

Akustische Schwingungen breiten sich mit der endlichen Schallgeschwindigkeit aus. Deshalb konnten nur solche Materiewolken schwingen, die klein genug waren, dass sie mit Schallgeschwindigkeit in den 400000 Jahren zwischen dem Urknall und der Rekombination durchlaufen werden konnten. Nach der Rekombination fiel der Druck im kosmischen Material erheblich ab, weil die Kopplung der Photonen an die Materie aufgehoben wurde, und damit entfiel die die akustischen Schwingungen treibende Kraft. Wegen des sehr hohen Photonenanteils im kosmischen Material war die Schallgeschwindigkeit sehr hoch; sie betrug fast 60 Prozent der Lichtgeschwindigkeit.

Es gibt also eine genau definierte Längenskala im Mikrowellenhintergrund, die sich ergibt, indem man die Schallgeschwindigkeit mit der Zeit zwischen dem Urknall und der Rekombination multipliziert: 60 Prozent der Lichtgeschwindigkeit mal 400000 Jahre, also etwa 240000 Lichtjahre. Nur solche Materiewolken, die kleiner als dieser „Schallhorizont“ waren, konnten akustische Schwingungen ausführen. Der Schallhorizont definiert den Grundton der Temperaturschwankungen im Universum.

Die Silk-Dämpfung schließlich kommt dadurch zustande, dass zu kleine Materiewolken zerstört werden, weil die darin enthaltenen Photonen schneller aus ihnen heraus strömen als die Wolken schwingen können. Die Wolken werden durch die Strömung der Photonen zerstört, bevor sie eine oder mehrere vollständige Schwingungsperioden durchlaufen können.

DAS LEISTUNGSSPEKTRUM

Um die Temperaturschwankungen am Mikrowellenhimmel zu analysieren, untersucht man ihr so genanntes Leistungsspektrum. Man erhält es auf folgende Weise. Man wählt ein Fenster vorgegebener Winkelgröße, zieht es über den Mikrowellenhimmel, misst an jeder Position die Temperatur innerhalb des Fensters und bestimmt schließlich, um wie viel die Messungen typischer Weise von der mittleren Temperatur des Mikrowellenhimmels abweichen. Daraus erhält man für die gewählte Fenstergröße eine charakteristische Temperaturschwankung. Schließlich wiederholt man den Vorgang für beliebige Fenstergrößen. Trägt man die typischen Temperaturschwankungen gegen die Fenstergröße auf, erhält man das Leistungsspektrum der Temperaturschwankungen. Sehr große Fenster entsprechen Materiewolken, die größer waren als der Schallhorizont. Auf sie wirkte nur der Sachs-Wolfe-Effekt. Bei einer Fenstergröße, die dem Schallhorizont entspricht, setzen die akustischen Schwingungen ein. Bei sehr viel kleineren Winkelskalen schließlich werden die akustischen Schwingungen von der Silk-Dämpfung unterdrückt.

Daraus ergibt sich die charakteristische Form des erwarteten Leistungsspektrums (vgl. Abb. 2). Seine wesentliche Bedeutung für die Kosmologie liegt darin, dass die Lage und Höhe seiner Maxima und Minima empfindlich von den kosmologischen Parametern abhängt, also den physikalischen Größen, die die

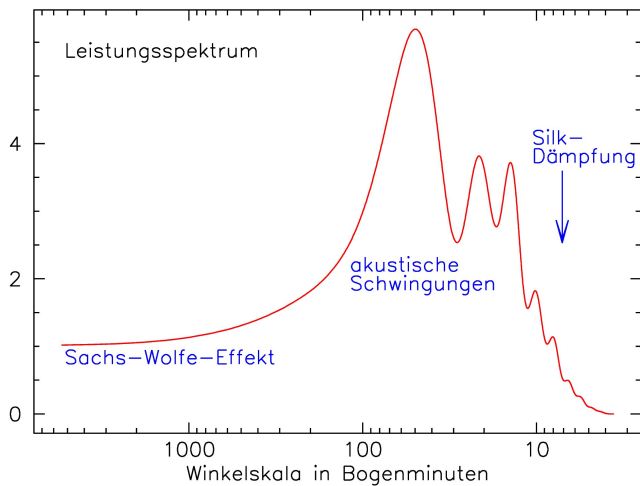


ABBILDUNG 2.—Das Leistungsspektrum des Mikrowellenhintergrunds hat eine charakteristische Form, die durch drei wesentliche physikalische Effekte bestimmt wird: den Sachs-Wolfe-Effekt, akustische Schwingungen und die Silk-Dämpfung. Die Größe der Strukturen nimmt von links nach rechts ab.

Eigenschaften des Universums im Großen beschreiben. Dazu gehören die Dichten der baryonischen und der Dunklen Materie, die heutige Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums, die kosmologische Konstante und einige mehr. Umgekehrt wird es möglich sein, diese Parameter aus dem Leistungsspektrum des mit einer Unsicherheit von weniger als einem Prozent abzulesen, die bis vor Kurzem utopisch erschien.

GRUNDTON UND SCHALLHORIZONT

Dies lässt sich anschaulich an einem Beispiel erläutern. Der Schallhorizont zum Zeitpunkt der Rekombination definiert den Grundton des Mikrowellenhintergrunds. Seine Winkelgröße kann aus der Lage des ersten akustischen Maximums im Leistungsspektrum abgelesen werden. Wie nun die bekannte physikalische Länge des Schallhorizonts mit der Winkelgröße zusammenhängt, unter der er am Himmel erscheint, hängt davon ab, wie stark der Raum gekrümmt ist. Eine gegebene Länge in gegebener Entfernung erscheint in einem positiv gekrümmten Raum unter einem größeren Winkel als in einem negativ gekrümmten Raum (vgl. Abb. 3). Um festzustellen, wie der Raum gekrümmt ist, genügt es also, die Lage des ersten akustischen Maximums im Leistungsspektrum zu messen, denn dann kennt sie mit dem Schallhorizont vergleichen. Die Krümmung des Universums ist vor allem deswegen interessant, weil sie durch die gesamte Dichte aller Materie- und Energiekomponenten im Universum bestimmt wird, von denen die weitaus wichtigsten die Dunkle Materie und die kosmologische Konstante sind.

EXPERIMENTE

Im Hinblick darauf ist in den letzten Jahren durch die Ballonexperimente „Boomerang“ und „Maxima“ und das am Südpol stationierte Experiment „Dasi“ ein Durchbruch gelungen. Die drei Experimente beobachteten unabhängig voneinander Ausschnitte des Mikrowellenhimmels. Ihre Winkelauflösung und Empfindlichkeit erlaubte, das erste akustische Maximum im Leistungsspektrum genau und das zweite annähernd zu vermessen (vgl. Abb. 4). Die theoretisch vorhergesagten akustischen Maxima und Minima existieren also, und schon das ist eine bemerkenswerte Entdeckung. Zudem stellte sich heraus, dass das er-

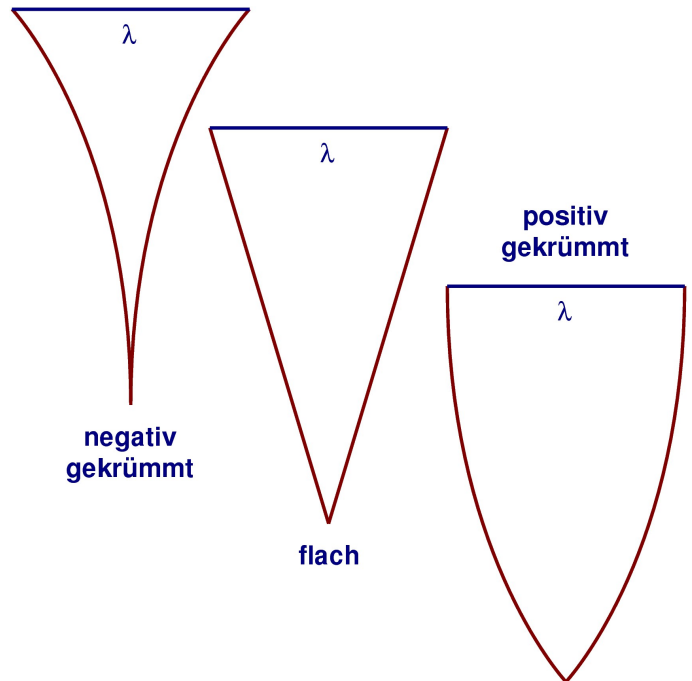


ABBILDUNG 3.—Die Winkelgröße einer gegebenen Länge hängt von der Raumkrümmung ab: Sie ist in einem negativ gekrümmten Raum am kleinsten und in einem positiv gekrümmten Raum am größten.

ste Maximum bei einer Winkelgröße von etwa einem Grad liegt. Vergleicht man das mit der physikalischen Größe des Schallhorizonts, folgt daraus, dass das Universum wenn überhaupt nur sehr leicht gekrümmt, mit großer Sicherheit aber räumlich flach ist. Dies unterstützt wesentlich das inflationäre Modell des frühen Universums.

Wohl zum ersten Mal in der Geschichte der modernen Kosmologie ergab sich damit ein konsistentes Bild des Universums und seiner Entwicklung. Es wird von drei experimentellen Säulen gestützt, nämlich von den Beobachtungen des Mikrowellenhintergrunds, weit entfernter Supernovae vom Typ Ia und der Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums. Interpretiert man diese Ergebnisse gemeinsam, ergibt sich, dass die Gesamtdichte des Universums zu etwa einem Drittel von Dunkler Materie und zu etwa zwei Dritteln von der kosmologischen Konstante beigetragen wird.

Viele weitere, unabhängige kosmologische Experimente liefern Ergebnisse, die sich völlig problemlos in dieses Bild einfügen lassen. Beispielsweise kann auch aus der Entwicklung der Galaxienhaufen geschlossen werden, dass die Dichte der Dunklen Materie etwa ein Drittel der Gesamtdichte beträgt. Die Häufigkeiten der leichten chemischen Elemente im Vergleich zum Wasserstoff erlauben, die Dichte der baryonischen Materie im Universum zu berechnen, die unabhängig davon auch aus dem Leistungsspektrum des Mikrowellenhintergrunds gewonnen werden kann. Beide stimmen sehr gut miteinander überein.

Das Überzeugendste daran ist, dass diese verschiedenen kosmologischen Experimente Eigenschaften des Universums zu ganz verschiedenen Zeiten prüfen. So war die kosmische Fusion der leichten chemischen Elemente bereits drei Minuten nach dem Urknall abgeschlossen, der Mikrowellenhintergrund wurde 400000 Jahre nach dem Urknall freigesetzt, und weit entfernte Supernovae explodierten, als das Universum etwa halb so alt war wie heute. Und obwohl diese verschiedenen Epochen zeitlich derart weit auseinander liegen, liefern sie Daten, die sich nahtlos in einem konsistenten kosmologischen Bild zusammenfügen

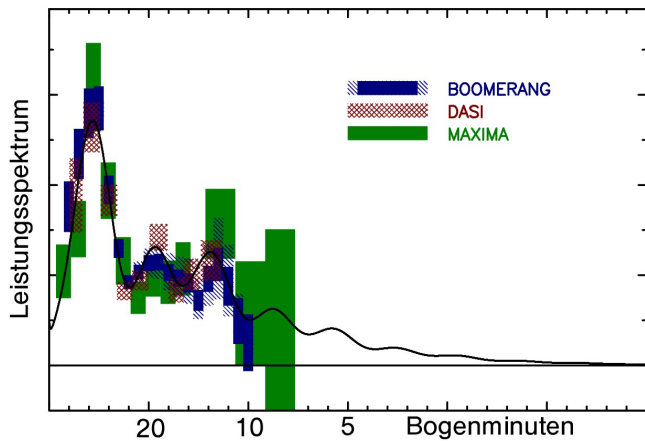


ABBILDUNG 4.—Die Messergebnisse der Experimente Boomerang, Maxima und Dasi haben zumindest das erste akustische Maximum im Leistungsspektrum bestätigt. Seine Lage lässt auf ein flaches Universum schließen.

lassen! Das war die kosmologische Sensation der letzten Jahre.

MAP UND PLANCK

Die Erforschung des Mikrowellenhintergrunds wird nun auf höherer Ebene fortgesetzt. Cobe konnte zwar den gesamten Himmel beobachten, hatte aber eine geringe Winkelauflösung und eine gerade ausreichende Empfindlichkeit. Die ballon- und erdgebundenen Experimente erreichen eine hohe Winkelauflösung und sind deutlich empfindlicher, können aber nur einen kleinen Ausschnitt des Himmels beobachten, weil ihre Flugdauer bzw. ihr Gesichtsfeld begrenzt sind. Der nächste Schritt geht also wieder ins All: Der amerikanische Satellit „Microwave Anisotropy Probe“, MAP, wurde im vergangenen Jahr gestartet und beobachtet den Mikrowellenhimmel seit Anfang dieses Jahres. Er hat eine Winkelauflösung von etwa 15 Bogenminuten und wird damit das dritte akustische Maximum im Leistungsspektrum gerade noch sehen können. Obwohl auch die Ballontelekope diese Winkelauflösung erreichen, hat MAP den Vorteil, dass er den gesamten Himmel beobachtet und deshalb eine erheblich genauere Messung des Leistungsspektrums erlauben wird. Erste Daten von MAP werden zu Beginn des nächsten Jahres erwartet.

Ein weiteres Satellitenexperiment, Planck, wird in Europa vorbereitet. Planck soll Anfang 2007 starten und den gesamten Mikrowellenhimmel mit einer Winkelauflösung von bis zu 5 Bogenminuten beobachten. Die Empfindlichkeit seiner Messinstrumente wird es erlauben, Temperaturschwankungen im Bereich von Millionstel Kelvin zu messen. Damit wird Planck in der Lage sein, das gesamte Leistungsspektrum bis weit in den Bereich der Silk-Dämpfung hinein zu beobachten und damit zu so kleinen Winkelskalen vorzudringen, bei denen der Mikrowellenhintergrund keine Strukturen mehr zeigen kann.

Neben der besseren Winkelauflösung wird Planck gegenüber MAP den großen Vorteil haben, dass er einen wesentlich breiteren Teil des elektromagnetischen Spektrums überdecken wird. Während MAP zwischen 1 cm und 3 mm Wellenlänge beobachtet, wird Planck bis zu einer Wellenlänge von 0.3 mm vordringen. Das ist deswegen sehr wichtig, weil der Mikrowellenhintergrund das gesamte sichtbare Universum durchqueren muss, um zu uns zu gelangen, und dabei durch eine Vielzahl von Mikrowellen-Vordergründen überlagert wird. Unsere Fähigkeit, den Mikrowellenhintergrund von diesen Vordergründen zu befreien,

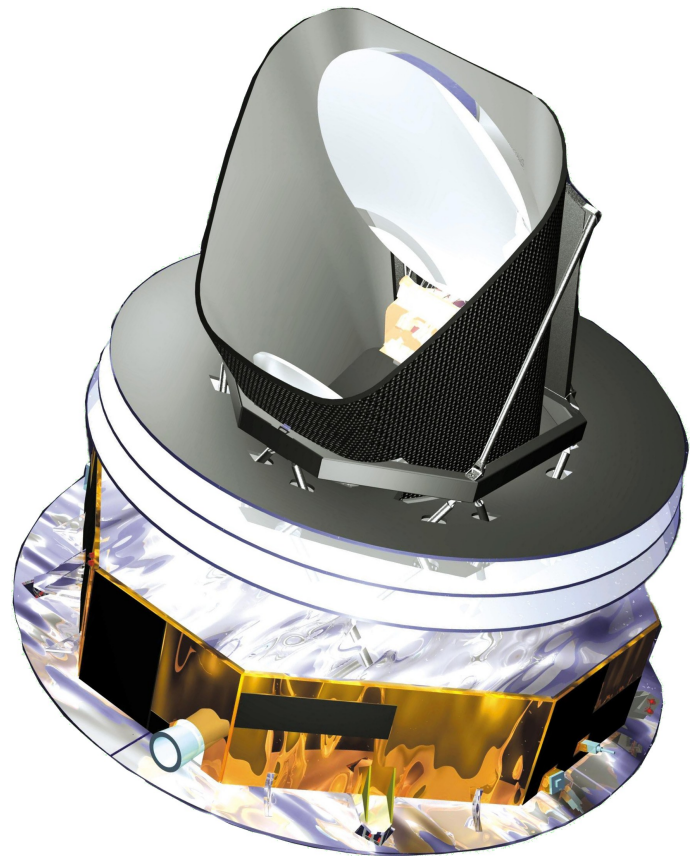


ABBILDUNG 5.—Modell des Planck-Satelliten: Oben zu sehen ist der Hauptspiegel, direkt darunter die Fokalebene mit den Detektoren. Abgeschirmt durch den dreifachen „Kragen“ befindet sich darunter die Elektronik und die Steuereinheiten. Die Solarzellen befinden sich auf der Unterseite des „Tellers“ am Boden des Satelliten. Er wird sich einmal pro Minute um seine Hochachse drehen.

wird durch Plancks wesentlich breiteren Wellenlängenbereich entscheidend verbessert, wodurch die Ergebnisse abermals zuverlässiger werden.

Die Messungen des Mikrowellenhintergrunds haben wesentlich dazu beigetragen, die Kosmologie zu einer präzisen Disziplin der Astrophysik zu machen. In wenigen Jahren wird das kosmologische Rahmenmodell entweder fixiert sein, oder wir werden mit Überraschungen konfrontiert werden, die uns zwingen werden, unsere Vorstellung von der Entwicklung des Universums und der Entstehung seiner Strukturen neu zu formulieren.