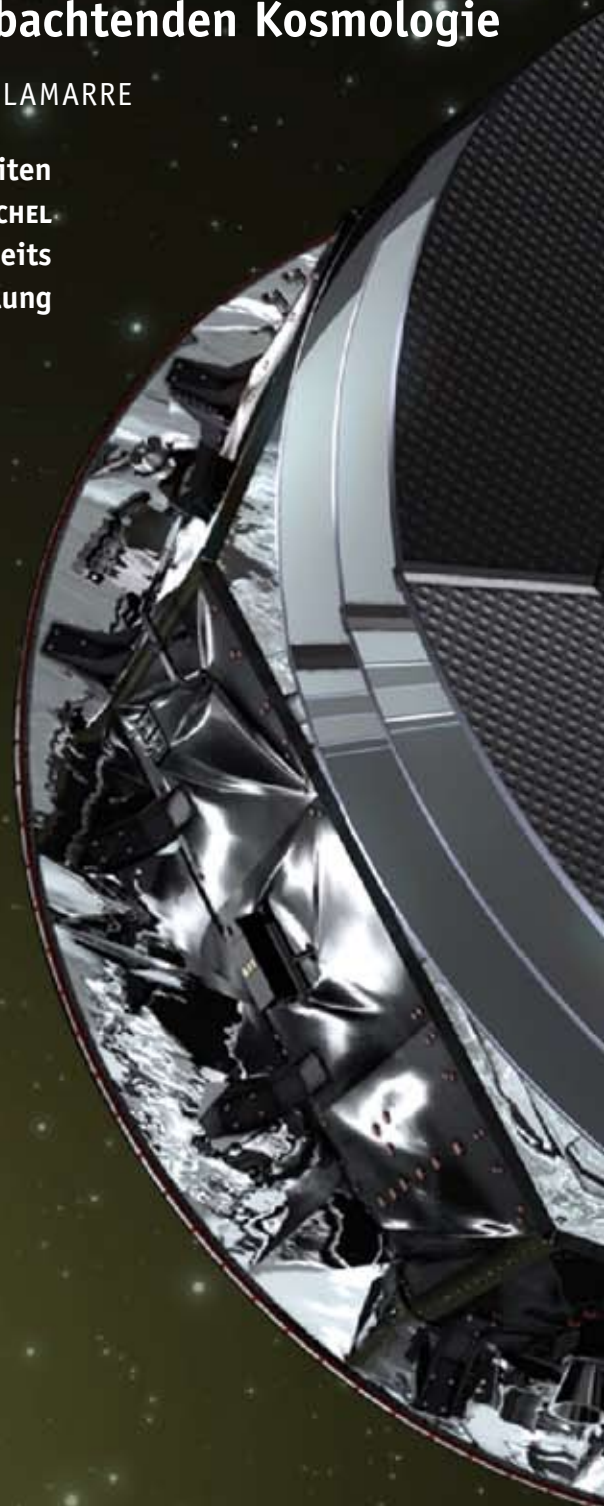



Die PLANCK-Mission

Vorstoß in neue Dimensionen der beobachtenden Kosmologie

VON JAN TAUBER, MARCO BERSANELLI UND JEAN-MICHEL LAMARRE

In wenigen Monaten wird eine ARIANE-5-Rakete den Satelliten PLANCK der ESA gemeinsam mit dem Weltraumteleskop HERSCHEL auf den Weg zum Librationspunkt L_2 bringen. Dort, weit jenseits des Mondes, wird PLANCK die kosmische Hintergrundstrahlung mit bisher unerreichter Präzision kartieren.





Anderthalb Jahre lang wird das 1,5-Meter-Teleskop der PLANCK-Mission die Strahlung des gesamten Himmels im Mikrowellenbereich mehrmals in insgesamt neun Frequenzbändern kartieren. Das primäre Ziel der Mission: Aus der Flut der gesammelten Daten sollen ein Dutzend kosmologischer Parameter zur Charakterisierung unseres Weltmodells mit hoher Genauigkeit abgeleitet werden.

Zusätzlich werden sich aus dieser Datenflut aber auch ganz neuartige Informationen über die kalte interstellare Materie in unserer Milchstraße sowie in nahen und fernen Galaxien ergeben. So versprechen sich die Astronomen neue Einsichten in die Anfänge und die Entwicklung des gesamten Kosmos, aber auch in die Struktur und den Lebenslauf der Galaxien.

Seine überragende Leistungsfähigkeit verdankt das komplexe Instrument einer raffinierten Kombination aus neuartigen Technologien.

Wissenschaftliche Ziele, Instrumentierung und Messtechniken



► Abb. 1: HERSCHEL und PLANCK sind hier startbereit in einer ARIANE-5-Rakete untergebracht. Bald nach dem Start werden sie ihre Reise getrennt fortsetzen.

Seit den neunziger Jahren hat es mehrere sehr erfolgreiche Missionen zur Untersuchung der kosmischen Hintergrundstrahlung im Mikrowellenbereich gegeben, die unser Weltmodell sehr viel glaubwürdiger gemacht haben. Welche Fortschritte versprechen wir uns nun von der noch viel aufwendigeren PLANCK-Mission?

Noch vor drei Jahrzehnten ließ sich der Zustand der Kosmologie recht einfach zusammenfassen: »viele Ideen, wenige Daten«. Seither hat sich die Situation dramatisch verändert, insbesondere dank einer Fülle von Experimenten, die der Messung der Eigenschaften des kosmischen Mikrowellenhintergrunds (Cosmic Background Radiation, CMB) gewidmet sind. Der CMB ist die früheste direkt beobachtbare Signatur der Geburt des Universums – seine Existenz und seine beobachteten Eigenschaften bilden eine der wesentlichen Stützen unseres gegenwärtigen kosmologischen Weltbilds.

Nach der zufälligen Entdeckung des CMB und der ersten Messung seiner Strahlungstemperatur durch Arno Penzias und Robert Wilson 1965 bestand der nächste Schritt darin, die Temperatur des CMB am Himmel zu kartieren. Ihre Schwankungen stellten sich als winzig heraus. Frühe Versuche, sie zu messen, wurden durch die geringe Empfindlichkeit der damals verfügbaren Instrumente ebenso vereitelt wie durch die Tatsache, dass erdgebundene Messungen durch zahlreiche Störquellen beeinträchtigt

werden. Nach Verbesserungen der instrumentellen Empfindlichkeit führten Messungen an Bord eines Flugzeugs in den 1970er Jahren zur Entdeckung einer dipolförmigen Komponente des CMB, deren Amplitude etwa ein Tausendstel der mittleren Temperatur beträgt. In den frühen 1990er Jahren folgten mit dem NASA-Satelliten COBE zum einen die genaue Vermessung des CMB-Spektrums und zum anderen die Entdeckung der schwachen Anisotropien auf dem Niveau von einem Hunderttausendstel der mittleren CMB-Temperatur. Beide Durchbrüche erforderten die Messung von Signalen, die zwei bis drei Größenordnungen schwächer waren als bei ihren Vorgängerexperimenten. Sowohl die Entdeckung des CMB als auch die mit COBE erzielten Erfolge wurden zu Recht im Jahr 2006 mit dem Nobelpreis gewürdigt.

Nach COBE blieb auf diesem Forschungsgebiet die technische Entwicklung ein wesentlicher Antrieb. In Dutzenden von erdgebundenen oder ballongetragenen Experimenten wurden alle Aspekte der Messungen, insbesondere die Empfindlichkeit, die Winkelauflö-

sung und die Kontrolle systematischer Effekte, verbessert. Trotzdem spielen Weltraumexperimente eine herausragende Rolle. Beobachtungen aus dem Weltraum werden weder durch atmosphärische Effekte noch durch die Emission der Erdoberfläche beeinträchtigt, bieten eine hervorragende thermische Stabilität und erlauben bei hinreichend langer Lebensdauer der Mission eine Überdeckung des gesamten Himmels. Darüber hinaus wirken Weltraumprojekte wegen ihrer Komplexität und hoher Kosten fokussierend, weil die wissenschaftliche Gemeinschaft ihre stärksten Anstrengungen darauf verwendet und von ihnen die besten Ergebnisse erwartet. Der NASA-Satellit WMAP, dessen Ergebnisse seit 2003 laufend veröffentlicht werden, setzt als jüngstes Beispiel dieser Entwicklung den Maßstab, mit dem alle weiteren CMB-Experimente zu messen sind.

Die PLANCK-Mission wurde kurz nach Erscheinen der Ergebnisse von COBE entworfen – gemeinsam von der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA, der US-amerikanischen NASA und vielen Agenturen und wissenschaftlichen Einrichtungen in Europa und Nordamerika. Als Nachfolger von COBE und WMAP stellt PLANCK eine neue Generation der Weltraumexperimente auf diesem Gebiet dar und zieht damit die hohen Erwartungen eines Pionierexperimentes in einem reifen, aber nach wie vor in schneller Entwicklung befindlichen Forschungszeitpunkt auf sich.

Die Mission ist nach dem Physiker Max Planck (1858–1957) benannt, dem erstmals eine Deutung des Spektrums der thermischen Strahlung gelang, und der damit die Quantenphysik begründete. Das Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung ist ein nahezu perfektes Beispiel für das plancksche Strahlungsgesetz.

»Sterne und Weltraum« im Physik-Unterricht



Zu diesem Beitrag stehen Ihnen und Ihren Schülern unter www.wissenschaft-schulen.de kostenlos didaktische Materialien zur Verfügung.

Durch welche Prozesse entsteht die Hintergrundstrahlung? Was lernt man aus den winzigen Schwankungen dieser Strahlung über die Frühgeschichte unseres Universums? Lässt sich die Temperatur der Hintergrundstrahlung auf einfache Weise abschätzen? Um diese und

andere Fragen zu beantworten, kann man einfache Berechnungen und Gedankenexperimente durchführen. Wie diese aussehen, können Sie auf der Seite www.wissenschaft-schulen.de nachlesen.

Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Bad Wildbad durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig gefördert.

In diesem ersten Teil des Artikels beschreiben wir, welche Messungen PLANCK durchführen soll, welche Bedeutung sie für die Kosmologie und die Astrophysik haben werden und welche technologischen Fortschritte und Entwicklungen sowohl bei der Hardware als auch bei der Datenverarbeitung notwendig sind, um die gesetzten Ziele zu erreichen.

Was wird PLANCK messen?

Unser heutiges Verständnis des Universums beruht auf Edwin Hubbles grundlegender astronomischer Entdeckung von 1929, dass sich ferne Galaxien mit einer Geschwindigkeit voneinander entfernen, die ihrem gegenseitigen Abstand proportional ist. Zunehmend präzise und empfindliche Beobachtungen, die während Jahrzehnten durchgeführt wurden, haben dieses Ergebnis bestätigt. Das Universum als Ganzes dehnt sich aus, es expandiert. Demzufolge muss in der fernen Vergangenheit alle seine Materie in einem sehr viel heißeren und dichteren Zustand komprimiert gewesen sein, als es heute in unserer Umgebung der Fall ist.

Eine bemerkenswerte Folge dieser Tatsache ist, dass es möglich sein sollte, ein Bild des Universums in seinem heißen Anfangszustand zu sehen (Abb. 2). Das liegt daran, dass die Lichtgeschwindigkeit endlich ist: Wir empfangen Photonen aus der Vergangenheit, wenn wir ferne Objekte beobachten. Sie wurden vor acht Minuten emittiert, wenn sie von

PLANCK - ein internationales Projekt

PLANCK ist ein zu großes Projekt als dass einzelne Beiträge richtig gewürdigt werden könnten. Die folgenden Institutionen sind wesentlich an der Mission beteiligt: Die Europäische Raumfahrtbehörde ESA organisiert das Projekt und finanziert die Entwicklung des Satelliten, seinen Start und seinen Betrieb. Der Hauptvertragsnehmer der ESA für PLANCK ist Thales Alenia Space in Cannes. Industrieunternehmen quer durch Europa haben sich an der Entwicklung von PLANCK beteiligt. Besonders wichtig waren die Beiträge von EADS-Astrium in Friedrichshafen zu den Teleskopspiegeln und von Contraves Space in Zürich zur Struktur des Satelliten. Ein großer Teil der schwierigsten kryogenen und optischen Tests wurden am Centre Spatial de Liège in Belgien und in den Anlagen von Thales in Cannes durchgeführt.

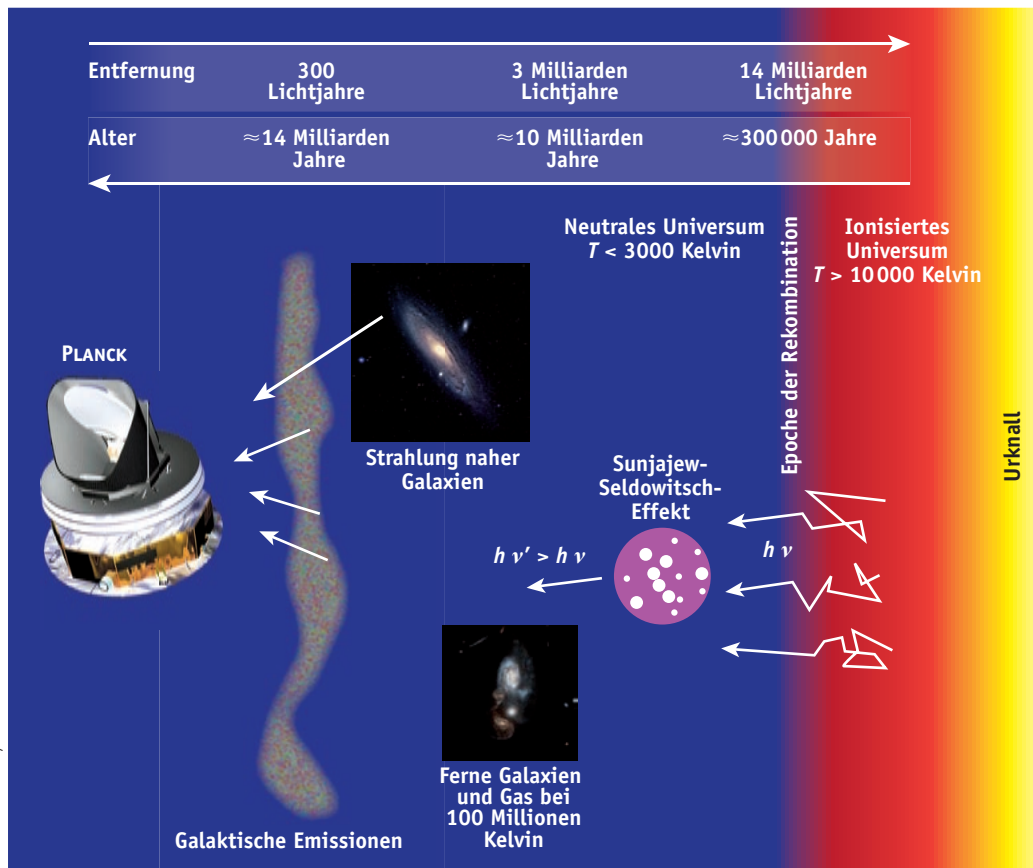
Zwei Konsortien, von denen jedes mehr als zwanzig wissenschaftliche Institute in Europa und den USA umfasst und die von den Raumfahrtbehörden der beteiligten Länder unterstützt werden, haben die wissenschaftlichen Instrumente LFI und HFI entwickelt und an die ESA geliefert. Die Konsortien sind für den wissenschaftlichen Betrieb ihrer jeweiligen Instrumente und für die Analyse ihrer Daten verantwortlich. Jean-Loup Puget (Frank-

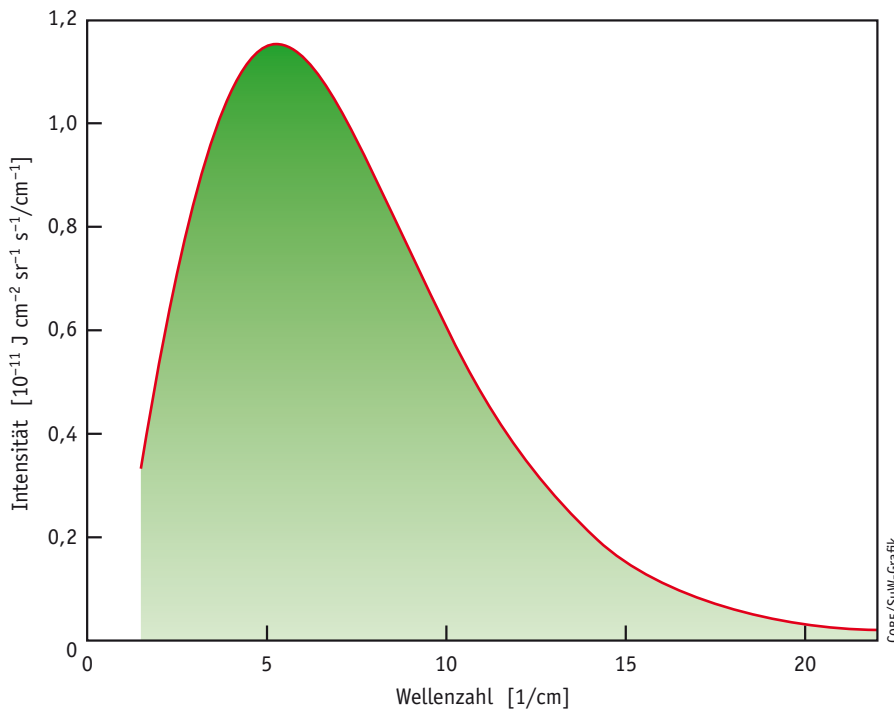
reich) ist der für das (hauptsächlich durch CNES finanzierte) HFI-Konsortium verantwortliche Wissenschaftler, in Italien leitet Nazareno Mandolesi das im Wesentlichen durch ASI finanzierte LFI-Konsortium. Die NASA hat das US-amerikanische PLANCK-Projekt gefördert, das am JPL angesiedelt ist, Wissenschaftler an vielen US-Instituten einschließt und sehr wesentlich zu den Anstrengungen der beiden Konsortien beigetragen hat. Ein Konsortium dänischer Institute, die vom dänischen Nationalen Forschungsrat unterstützt werden, hat mit der ESA an der Entwicklung der beiden Teleskopspiegel von PLANCK teilgenommen.

Die Autoren dieses Artikels sind Mitglieder des PLANCK Science Teams, einer Gruppe von Wissenschaftlern, welche die Hauptpartner vertritt, die am Projekt beteiligt sind, und für die Leitung der wissenschaftlichen Aspekte der Mission verantwortlich ist. Die Autoren bedanken sich besonders bei J. Aumont, M. Bartelmann, M. Bucher, H. Dole, M. Giard, B. Partridge, J.-L. Puget und M. White für Beiträge und Diskussionen zu einzelnen in diesem Artikel angesprochenen Themen. C. Lawrence und F. R. Bouchet haben die Arbeiten für wesentliche Teile dieses Artikels koordiniert und maßgebliche eigene Beiträge dazu geleistet. M. Bartelmann hat auch die deutsche Übersetzung besorgt.

► Abb. 2: Kurz nach seiner Entstehung im Urknall vor etwa 14 Milliarden Jahren war das Universum undurchsichtig, da die Photonen ständig an freien Elektronen gestreut wurden. Erst nach rund 300 000 Jahren war das Universum so weit abgekühlt, dass sich die Elektronen mit den Protonen zu neutralen Wasserstoffatomen verbanden (Epoche der Rekombination), und die Photonen sich ungestört ausbreiten konnten. Durch Wechselwirkung mit hochenergetischen Teilchen wurde die spektrale Verteilung der Photonen geringfügig modifiziert (Sunjajew-Seldowitsch-Effekt, siehe auch S. 50). Der PLANCK-Satellit wird diese kosmische Hintergrundstrahlung – gewissermaßen das »Echo des Urknalls« – kartieren, doch die Signale müssen mühsam aus der ebenfalls registrierten Strahlung herausgefiltert werden, die von fernen und nahen Galaxien sowie aus unserem Milchstraßensystem stammen.

J. M. Lamyre 2007/SuW-Grafik





◀ Abb. 3: Die Messungen des COBE-Satelliten zeigten, dass das Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung mit hoher Genauigkeit dem Spektrum eines Schwarzen Körpers entspricht.

der Sonne kommen, vor Jahren von nahen Sternen und vor Milliarden Jahren von entfernten Quasaren. Jenseits der am weitesten entfernten Objekte sollten wir aus allen Richtungen des Himmels Photonen empfangen, die im dichten und warmen urzeitlichen Universum emittiert wurden, bevor irgendwelche Sterne, Galaxien oder andere kosmische Strukturen entstanden. Sie bildeten den Strom primordialer Photonen, den Arno Penzias und Robert W. Wilson 1964 erstmals als die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung beobachteten. Zusammen mit der Expansion des Universums und der primordialen Elementhäufigkeit bildet er eine der drei wichtigsten experimentellen Stützen der Urknalltheorie.

Bis etwa 380 000 Jahre nach Beginn der kosmischen Expansion war die Temperatur überall im Universum so hoch, dass Elektronen sich nicht dauerhaft an Protonen binden konnten, um Wasserstoffatome zu bilden. Innerhalb dieses ionisierten Gases oder »Plasmas« konnten sich die Photonen nicht frei ausbreiten, weil sie, ähnlich wie Licht im Nebel, permanent von Elektronen in alle Richtungen gestreut wurden. Während sich das Universum ausdehnte, kühlte sich das Plasma ab. Unterhalb von etwa 10 000 Kelvin konnten die Elektronen beginnen, sich mit Protonen zu Atomen zu vereinigen. Diese »Rekombination« war beinahe abgeschlossen, als die Temperatur auf 3000 Kelvin fiel. Neutrales Wasserstoffgas ist so lichtdurchlässig, dass etwa 90 Prozent der primordialen Photonen uns ohne jede weitere Wechselwirkung erreichen, obwohl sie nahezu 14 Milliarden Jahre zu uns unterwegs waren.

Vor der Rekombination jedoch waren die Photonen so eng an die Materie gekoppelt, dass ihre Energieverteilung die Eigenschaften der Materie zu jener Zeit direkt widerspiegelt: Sie entspricht genau dem Spektrum eines »Schwarzen Körpers«, dessen Form allein von der Temperatur abhängt: Sie spiegelt die lokale Temperatur und Dichte der Materie zum Zeitpunkt der »letzten Streuung« wider. Eine Messung der Temperatur des CMB verrät uns also charakteristische Eigenschaften der Materie zu jener Zeit.

Während das Universum expandiert, nehmen auch die Wellenlängen der Photonen zu und die charakteristische Temperatur des Schwarzkörper-Spektrums nimmt ab. Der Faktor, um den die Wellenlänge seit der Zeit zugenommen hat, als das Photon emittiert wurde, entspricht genau dem Faktor, um den sich das Universum seither ausgedehnt hat. Und um diesen Faktor ist auch die Temperatur gefallen, die das Schwarzkörper-Spektrum charakterisiert. Daher wurden die Photonen, die von dem primordialen Schwarzen Körper bei 3000 Kelvin ausgestrahlt wurden, zu Wellenlängen verschoben, die um einen Faktor 1100 größer sind, und die wir als Strahlung eines Schwarzen Körpers bei 2,7 Kelvin wahrnehmen. Die Messung ihres Spektrums durch COBE zeigte, dass es um weniger als 0,01 Prozent von einem idealen Schwarzkörper-Spektrum abweicht (Abb. 3).

Die kosmische Hintergrundstrahlung erscheint also extrem gleichförmig (Abb. 4a). Nur wenn man den Kontrast des CMB-Bildes tausendfach verstärkt, kann man erkennen, dass die eine Seite des Himmels etwas heller ist als die andere (Abb. 4b). Diese Asymme-

trie (CMB-Dipol genannt) entsteht durch die Bewegung der Erde und der Sonne relativ zum CMB, (wobei ein kleiner Teil davon noch primordialen Ursprungs sein könnte). Wenige hundert Kilometer pro Sekunde reichen aus, um durch den Dopplereffekt die gemessene Temperatur des Schwarzkörpers in der einen Richtung um einige Tausendstel Kelvin zu erhöhen, in der anderen abzusenken. Ziehen wir die Dipolkomponente von der gemessenen Verteilung ab und steigern den Kontrast noch weiter, so beginnen wir, auf allen Winkelskalen, von den größten bis zu den kleinsten, räumliche Strukturen zu erkennen (Abb. 4c). Diese Muster spiegeln sowohl den Zustand des Universums 380 000 Jahre nach dem Urknall wider als auch die Auswirkungen der 14 Milliarden Jahre währenden Reise, welche die Photonen seit ihrer letzten Streuung an Elektronen im primordialen Plasma hinter sich haben.

Um diese Reise nachzuvollziehen, stellen wir uns eine Gruppe von Photonen vor, die frei durch den Raum fliegen, nachdem sie aus dem primordialen Plasma entkamen. Anfänglich sind sie Photonen des sichtbaren Lichts bei einer Wellenlänge von ungefähr 0,5 Mikrometern. Im Laufe der Zeit dehnt die kosmische Expansion ihre Wellenlänge und sie verlieren Energie. Wenn sie einen Galaxienhaufen passieren, stoßen einige lokal emittierte Photonen ähnlicher Wellenlänge zu ihnen und erhöhen ihre Anzahl um einen winzigen Betrag. Gelegentlich gehen einige der Photonen durch Wechselwirkung mit Teilchen verloren, denen sie begegnen. Insgesamt aber geschieht auf ihrer langen Reise nicht viel: Das Universum ist bemerkenswert leer und durchsichtig, und sogar Milliarden von Jahren später tragen sie immer noch die physikalische Information mit sich, die ihnen bei ihrer letzten Streuung im heißen, primordialen Plasma mitgegeben wurde. Wenn ihre Wellenlängen auf einige Millimeter angewachsen sind, treten die Photonen in die Peripherie einer großen Spiralgalaxie ein, der Milchstraße, wo noch einige Photonen der lokalen Mikrowellenstrahlung zu der Gruppe hinzutreten.

Wenn die Photonen nach beinahe 14 Milliarden Jahren fast ereignisloser Reise unsere Position in der Milchstraße erreichen, treffen sie plötzlich mit einem höchst unerwarteten Objekt zusammen: der glatten metallischen Oberfläche des

Primärspiegels von PLANCK. Ihr Leben endet dann auf dramatische Weise, indem sie vom PLANCK-Teleskop gesammelt und in Geräte eingespeist werden, in denen sie absorbiert werden.

Die Photonen haben jetzt das Herz von PLANCK erreicht: die Detektoren – also Geräte, in denen sie mit Materie in Wechselwirkung treten und elektrische Spannungen oder Ströme erzeugen, die elektronisch verstärkt und zu Signalen verarbeitet werden. Diese Signale werden verschlüsselt und zur Erde gefunkt, wo sie uns die Information über den Ursprung der Photonen preisgeben. Einige Photonen gehen im Laufe dieses Messprozesses verloren. Indem das PLANCK-Experiment den Himmel abstreicht, sammelt es aus allen Richtungen der Himmelskugel eine enorme Anzahl kosmischer Photonen auf.

Nach sechs Monaten wird der Himmel in jeder Richtung einmal beobachtet worden sein, sodass für jeden Detektor eine Karte des gesamten Himmels erzeugt werden kann. Diese Karten stellen das wesentliche Beobachtungsergebnis von PLANCK dar. Auf dieser Grundlage sollen die Strukturen im Mikrowellenhintergrund mit niemals zuvor erreichter Empfindlichkeit und Winkelauflösung bestimmt werden.

Die auffälligsten unter diesen Strukturen sind die kleinen Flecken mit einer charakteristischen Größe von etwa einem Grad (etwa doppelt so groß wie der von der Erde aus gesehene Vollmond), die kleinen Abweichungen der CMB-Temperatur von ihrem Mittelwert entsprechen. Das erste Ziel der PLANCK-Mission ist es, diese winzigen räumlichen Strukturen zu vermessen, um aus ihnen kosmologische Information zu gewinnen (siehe den Kasten »Das Winkelleistungsspektrum« auf den Seiten 44/45). Darüber hinaus wird PLANCK viele weitere Gebiete der Astrophysik berühren.

Was können wir aus den Anisotropien im CMB lernen?

Die heute allgemein akzeptierte Theorie des Urknalls besagt, dass unser Universum von einem primordialen Feld »aufgeblasen« wurde, und dass Quantenfluktuationen in diesem Feld der Ursprung der großräumigen Inhomogenitäten sind, die wir heute beobachten. Diesem Modell zufolge ist die heutige großräumige Struktur des CMB ein verformtes Abbild der Temperaturschwankungen, die in den ersten 10^{-35} Sekunden nach dem Urknall infolge zufälliger Quantenprozesse auftraten.

Kleine Strukturen haben sich jedoch seit dem Urknall erheblich verändert. Anfänglich verhinderte die kräftige Wechselwirkung zwischen Licht und (elektrisch

geladener) Materie den Kollaps der Materie in dichten Gebieten unter dem Einfluss der eigenen Schwerkraft, und die Ereignisse wurden durch die Ausbreitung von Schallwellen im primordialen Plasma bestimmt. Der Übergang von einem geladenen zu einem neutralen Medium änderte die Situation jedoch dramatisch (s. Abb. 2). Die Energie (beziehungsweise die Temperatur des Spektrums) der Photonen, die nach ihrer »letzten Streuung« freigesetzt wurden, hängt davon ab, ob sie aus heißen und dichten oder aus kühleren, verdünnten Gebieten kamen. Daher wurde das Muster heißer und kalter Flecken, das durch die Schallwellen erzeugt wurde, im CMB eingefroren.

Zugleich wurde die Materie bei der Rekombination vom Strahlungsdruck befreit, der bisher der Kontraktion dichter Klumpen aufgrund der eigenen Schwerkraft widerstanden hatte. Unter der anziehenden Wirkung der Gravitation kollabierten die dichteren Gebiete zu Sternen und Galaxien. Tatsächlich haben die Temperaturschwankungen im CMB um etwa ein Hunderttausendstel die richtige Amplitude, um die Entstehung der heute zu beobachtenden großräumigen Strukturen im Kosmos zu erklären.

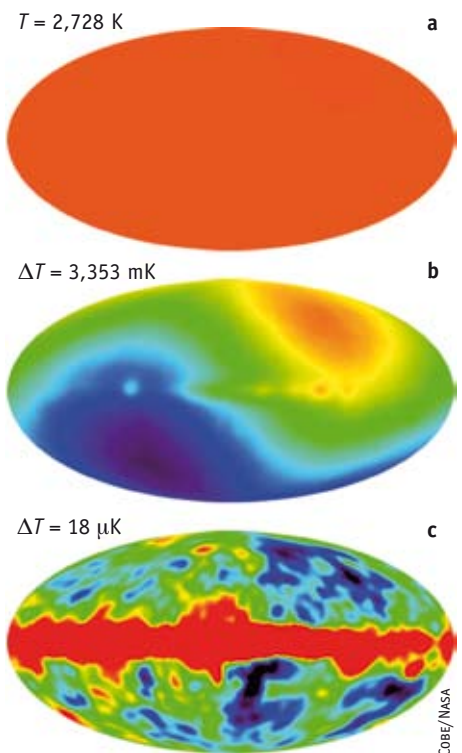
Die Physik des primordialen Schalls:

Die kleinen Schwankungen im CMB spiegeln daher die Physik des Schalls im primordialen Plasma kurz vor der Rekombination wider. Sie zeigen ein charakteristisches Muster, das durch die theoretische Kosmologie vorhergesagt wird: Die warmen und kalten Flecken haben charakteristische Größen und genügen bestimmten Verhältnissen zueinander. Diese Anisotropien im CMB können dazu verwendet werden, das Alter, die Zusammensetzung und die Geometrie des Universums präzise zu bestimmen, Theorien über seinen Ursprung zu überprüfen und Licht auf die mysteriöse Dunkle Energie zu werfen, von der wir glauben, dass sie die beschleunigte Expansion des Universums verursacht, die vor etwa zehn Jahren entdeckt wurde. Dieser Prozess ist analog dazu, den Aufbau eines Musikinstruments zu rekonstruieren, indem man seinen Klängen sorgfältig lauscht, wenngleich sich das Universum als ein höchst merkwürdiges Instrument erweist, dessen Musik von einigen sonderbaren Zufälligkeiten begleitet wird, die nach einer Erklärung schreien.

Indem sie die Amplitude der Obertöne mit der des Grundtons verglichen, haben Kosmologen herausgefunden, dass die Schallwellen im frühen Universum in einem einzigen kurzen Ausbruch verursacht wurden, und nicht während einer längeren Zeit. Die Frequenzen der Wel-

len, die wir heute beobachten, sehen eher so aus wie die einer Stimmgabel, die einmal heftig angeschlagen wurde, als wie die Kakophonie, die dadurch entsteht, dass man immer wieder auf einen Topfdeckel schlägt. Dies verlagert den Ursprung der Schwankungen zweifellos in das sehr frühe Universum, das von den Gesetzen der subatomaren Physik beherrscht wurde.

Aber was hat diese Schwankungen verursacht? Wir wissen es nicht wirklich, teils deswegen, weil es viele Modelle gibt, die mit den gegenwärtigen Daten in Einklang zu bringen sind. Diese Modelle sagen Schwankungen voraus, deren Amplituden und Frequenzen sich auf subtile Weise unterscheiden; einige bevorzugen tiefe, andere hohe Töne. Durch Messung der höheren Obertöne mit dramatisch erhöhter Präzision wird es PLANCK möglich sein, die Menge der jetzt noch erlaubten Modelle einzuschränken und uns Hinweise darauf zu geben, welche Physik im



▲ Abb. 4: (a) Die Messungen des COBE-Satelliten zeigten, dass die allgegenwärtige kosmische Hintergrundstrahlung extrem gleichmäßig (isotrop) am Himmel verteilt ist. (b) Erst nach tausendfacher Verstärkung des Kontrasts lässt sich die Dipolkomponente erkennen, welche die Bewegung des Beobachters (der Sonne) durch das kosmische Strahlungsfeld widerspiegelt. (c) Noch weitere Kontrastverstärkung lässt erkennen, dass es winzige, aber signifikante Abweichungen von der Homogenität gibt.

ersten Milliardstel einer Sekunde nach dem Urknall am Werk war.

Aus dem Spektrum des CMB können Kosmologen auch die Gestalt und die Zusammensetzung des Universums berechnen. Weil wir die räumlichen Frequenzen der Anisotropien theoretisch vorhersagen und ihre Winkelgröße am Himmel beobachten können, können wir abschätzen, welche Entfernung der CMB zurücklegt, bevor er die Erde erreicht. Da wir das Dreieck genau kennen, das durch ein Eck bei uns und zwei Ecken an aufeinanderfolgenden Bergen einer Schallwelle gebildet wird, können wir überprüfen, ob seine Winkel sich zu 180 Grad ergänzen, und damit die klassische Messung der Raumkrümmung durchführen, die Friedrich Gauß vor zwei Jahrhunderten vorschlug. Solche Messungen zeigten in den späten 1990er Jahren, dass der Raum die Gesetze der Euklidischen Geometrie erfüllt. Da Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie vorhersagt, dass die Geometrie des Universums von der Dichte der in ihm enthaltenen Materie abhängt, schließen wir, dass die mittlere Energiedichte nahe bei ihrem so genannten kritischen Wert von 10^{-29} Gramm pro Kubikzentimeter liegt, für den der Raum flach ist, und der positiv von negativ gekrümmten Räumen trennt. Aber wie verteilt sich diese gesamte Energiedichte auf ihre Bestandteile?

Die Güte des Klangkörpers, das heißt wie lange er klingt, nachdem er angeschlagen wurde, oder welche Verteilung von Frequenzen er enthält, informiert uns über die Expansion des Universums und über die Anzahl der Atome, die auf jedes Photon entfallen. PLANCK wird das erste Experiment sein, das diese Güte mit bestmöglicher Genauigkeit messen wird. Da wir die Anzahl der Photonen sehr genau kennen, werden sie uns eine Präzisionsmessung der gesamten Anzahl der Atome im Universum erlauben.

■ Dunkle Materie und Dunkle Energie:

Andererseits wissen die Astronomen seit vielen Jahrzehnten, dass es mehr Materie im Universum gibt, als durch die Atome beigetragen werden kann. Von der »fehlenden Masse« wird angenommen, dass sie aus einer noch unbekanntem Sorte subatomarer Teilchen zusammengesetzt ist, die Dunkle Materie genannt wird. Da diese Dunkle Materie durch die Schwerkraft wechselwirkt, beeinflusst ihre Menge die Schallwellen. Die hochpräzise Messung der Obertöne durch PLANCK wird es uns erlauben, die gesamte Materiedichte mit einer Genauigkeit im Prozentbereich zu bestimmen.

Eine solche Präzisionsmessung der Materiedichte erweist sich als entscheidend für ein großes, ungelöstes Problem

Das Winkelleistungsspektrum

PLANCK wird die Temperaturschwankungen des kosmischen Mikrowellenhintergrundes (CMB) über den gesamten Himmel kartieren. Die meiste Information wird sich aus den statistischen Eigenschaften dieses Gesamtbildes der Temperatur- und Polarisationsschwankungen des CMB extrahieren und im »Winkelleistungsspektrum« darstellen lassen.

Dieses Spektrum zeigt den Anteil der Fluktuationen im Gesamtbild in Abhängigkeit des Winkelabstands zwischen zwei zu vergleichenden Stellen am Himmel. Bei großen Winkelabständen enthält die Kurve Information über die physikalischen Prozesse, die in der allerfrühesten Zeit nach dem Urknall abliefen (»Physik des jungen Universums« in der Grafik rechts). Bei kleinen Winkelabständen wird ihr Ver-

lauf von der »Physik der Schallwellen« zur Zeit der Rekombination bestimmt.

Ausgehend von angenommenen Werten für einen Satz grundlegender Parameter, welche die Eigenschaften des Universums (Expansionsrate, Geometrie, Alter, Materie- und Energiedichte usw.) beschreiben, sagen kosmologische Modelle die Form des Winkelleistungsspektrums voraus. Die Grafik rechts zeigt das Ergebnis einer solchen Modellanpassung an die heute vorliegenden Daten. Umgekehrt lassen sich durch den Vergleich mit der gemessenen Form dieses Spektrums die Modelle prüfen und die wahren Werte der Parameter ableiten. Deshalb ist seine genaue Bestimmung eines der Hauptziele der PLANCK-Mission. PLANCK wird es mit einer 15-fach höheren Genauigkeit bestimmen als WMAP.

der Kosmologie: die Natur der »Dunklen Energie«, die wegen unserer Unkenntnis ihres Wesens und ihrer Eigenschaften so genannt wird, und von der wir annehmen, dass sie die beschleunigte Expansion des Universums verursacht. Vor mehr als einem Jahrzehnt zeigte uns der CMB, dass die gesamte Energiedichte im Universum nahe ihrem kritischen Wert ist. Gegenwärtige Abschätzungen der Materiedichte, wenngleich ungenau, weisen jedoch darauf hin, dass 70 Prozent dieser Dichte nicht durch Materie beigetragen werden. Dieser Fehlbetrag stimmt mit unabhängigen Schätzungen der Dichte der Dunklen Energie überein, die benötigt wird, um die beschleunigte Expansion zu erklären, die aus Beobachtungen weit entfernter Supernovae abgeleitet wird. Aber genauere Messungen der Materiedichte sind entscheidend, wenn wir den Einfluss jedes Bestandteils auf die Expansionsrate des Universums herausfinden und der Natur dieser geheimnisvollen Dunklen Energie auf die Spur kommen wollen.

Für die Dunkle Energie sind einige Kandidaten vorgeschlagen worden, aber jeder dieser Vorschläge hat seine Schwächen. Der älteste geht auf Einstein zurück, der eine »kosmologische Konstante« Λ vorschlug, um seine kosmologischen Modelle an der Expansion zu hindern (sie war damals noch unbekannt). Als die Expansion des Universums später beobachtet wurde, gab Einstein diese Idee auf. Paradoxerweise scheinen aber die neuen, verbesserten Daten eine kosmologische Konstante zu erfordern, oder jedenfalls etwas ähnliches, das sie durch irgendeinen neuartigen physikalischen Mechanismus imitiert. Verschiedene Alternativen wurden vorgeschlagen. Bessere Da-

ten werden benötigt, um zwischen ihnen zu unterscheiden oder herauszufinden, welche Eigenschaften die richtige Theorie haben sollte.

PLANCK wird uns wertvolle Hinweise darauf liefern, wie wir die Dunkle Energie verstehen können, die sich auf zwei grundsätzliche Arten zeigt. Erstens beschleunigt sie die Expansion des Universums während der letzten wenigen Milliarden Jahre. Die beschleunigte Expansion unterdrückt das Wachstum kosmischer Dichteschwankungen. Dies prägt sich den Anisotropien im Mikrowellenhintergrund durch den »Integrierten Sachs-Wolfe-Effekt« auf. Wenn Mikrowellen-Photonen in Senken des Gravitationsfeldes fallen, wird ihre Energie aufgrund der so genannten Gravitationsblauverschiebung etwas größer. Falls sich das Gravitationsfeld mit der Zeit nicht ändert, wird diese Energieerhöhung genau ausgeglichen, wenn die Photonen später wieder aus der Senke heraus klettern. Falls sich das Gravitationsfeld aber mit der Zeit ändert, können sich die Energieerhöhung und der nachfolgende Energieverlust (Rotverschiebung) nicht mehr gegenseitig auslöschen, wodurch spät in der kosmischen Geschichte eine zusätzliche Anisotropie entsteht. Wegen der langen Zeitskalen, die den Zerfall des Gravitationsfeldes im expandierenden Universum kennzeichnen, ist dieser Effekt auf großen Winkelskalen besonders ausgeprägt. Solche späten Verzerrungen der Anisotropie in der CMB-Temperatur können dadurch von möglichen Änderungen in der Physik des frühen Universums unterschieden werden, dass sie mit gravitativ gebundenen Strukturen korreliert sind, deren Existenz aus anderen Beobachtungsdaten

Wie wird PLANCK die Strahlung des gesamten Himmels messen?

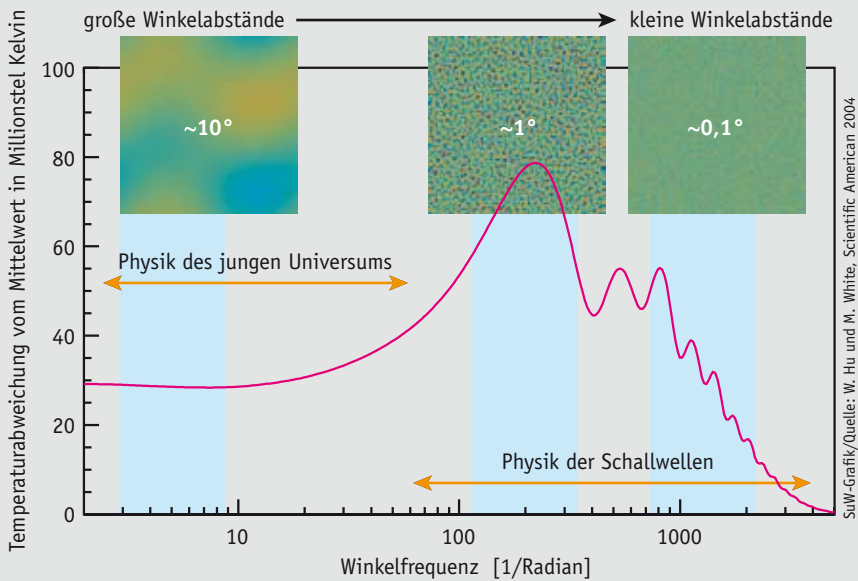
Dank eines glücklichen Zufalls der Natur liegt das Maximum des Schwarzkörperspektrums des CMB nahe einem Minimum der kombinierten Mikrowellenemission unserer Galaxis und extragalaktischer Quellen. Im Frequenzintervall zwischen 70 und 100 Gigahertz (Wellenlänge 3 bis 4 Millimeter) werden die Signale, die wir vom Mikrowellenhimmel abseits der galaktischen Ebene empfangen, von den alten CMB-Photonen dominiert. Aber selbst in diesem durchsichtigsten aller Fenster tragen galaktische und extragalaktische Quellen »Vordergrundstrahlung« auf dem Niveau einiger Prozent zu den kosmischen Photonen bei. Um diese astrophysikalische Verunreinigung zu erkennen und zu beseitigen, werden CMB-Experimente so ausgelegt, dass sie bei mehreren Wellenlängen messen, um nicht-kosmologische Komponenten anhand ihres abweichenden Energiespektrums aufzuspüren.

Im Falle von PLANCK erfordert die angestrebte Empfindlichkeit eine hochgenaue Vermessung der Vordergrundquellen, und dies wiederum erfordert, dass die Messungen innerhalb eines breiten Wellenlängenbereichs erfolgen. Simulationen haben gezeigt, dass die wissenschaftlichen Ziele der PLANCK-Mission mit neun Beobachtungsbändern erreicht werden können, die Wellenlängen im Bereich zwischen einem Zentimeter und einem Drittel Millimeter überdecken (entsprechend Frequenzen zwischen 30 und 850 GHz). Dies ist eine der wesentlichen Anforderungen an die Instrumente der Mission.

Um Anisotropien der Temperatur und Polarisation des CMB und ihre statistischen Eigenschaften mit einer Genauigkeit zu erfassen, welche die der früheren Experimente (insbesondere WMAP) erheblich übertrifft, waren für PLANCK große Fortschritte auf vielen technischen Gebieten notwendig. Die wichtigsten sind:

■ **Hohe Detektorempfindlichkeit:** Die Detektoren müssen auf sehr niedrige Temperaturen gekühlt werden, um die größtmögliche Empfindlichkeit zu erreichen, und das bestimmt die Konstruktion der Sonde bis ins Detail. Dank wichtiger Fortschritte in der Detektortechnologie und in der Ausleseelektronik wird PLANCK zehnmal so schwache Signale wie WMAP nachweisen können.

■ **Hohe Winkelauflösung:** PLANCK wird Signale unterscheiden können, deren Winkelabstand dreimal so klein ist wie bei WMAP. Dies wird durch ein größeres Teleskop erreicht, dessen reflektierende Oberfläche auch bei sehr niedrigen Temperaturen sehr genau ist.



erschlossen werden kann. PLANCK wird auch auf eine eher indirekte Weise dazu beitragen, die Eigenschaften der Dunklen Energie zu enthüllen, indem es andere spezielle Experimente ermöglichen wird, deren Ergebnisse mehrdeutig wären, wenn sie nicht zusammen mit den Ergebnissen von PLANCK analysiert würden.

■ **Polarisation des CMB und Gravitationswellen:** Über die Temperatur des CMB hinaus tragen uns die Photonen nützliche Information in Gestalt ihrer Polarisation zu, die auch mit den lokalen räumlichen Unregelmäßigkeiten im emittierenden Plasma korreliert sind. Die CMB-Photonen sind nur schwach polarisiert, sodass diese Eigenschaft schwer genau zu messen ist. Aber die übermittelte Information erlaubt es uns, einige der Schlüsse zu überprüfen, die aus der Temperatur allein gezogen wurden, und erhöht damit die Zuverlässigkeit unserer Interpretation. Darüber hinaus trägt die Polarisation noch unabhängige Information mit sich, die eine genauere Bestimmung einiger Parameter erlaubt, die allein anhand der Temperatur nur ungenau bestimmt sind. Insbesondere sind in der Polarisation sehr wichtige Spuren der Prozesse enthalten, die in den allerersten Augenblicken stattfanden, als die Energie im Universum so hoch war, wie kein vorstellbares Experiment sie erreichen kann.

Daher ist heute die Messung der Polarisation ein Ziel der meisten CMB-Experimente, PLANCK eingeschlossen. Indem wir die Polarisation des CMB untersuchen, könnten wir in die Lage kommen, die Energie zu bestimmen, bei der die Polarisation erzeugt wurde. Zum Beispiel waren die schwache Kernkraft und die

elektromagnetische Kraft verschiedene Aspekte derselben elektroschwachen Kraft, als das Universum heißer als 10^{15} Kelvin war. Wenn die Polarisation bei dieser Temperatur erzeugt wurde, wäre das ein Indiz dafür, dass die elektroschwache Vereinigung die Polarisation verursachte. Die Ursache könnte aber auch bei noch höheren Temperaturen oder zu noch früheren Zeiten aufgetreten sein, vielleicht als die elektroschwache Kraft mit der starken Kraft vereinigt war, wie es die so genannte Theorie der großen Vereinheitlichung vorhersagt.

Entscheidend für die Bestimmung der Energieskala ist, dass viele Modelle für den Ursprung des CMB nicht nur die Dichte- und Druckschwankungen vorhersagen, die sich als Schallwellen ausbreiten, sondern auch Wellen im Gefüge der Raumzeit selbst. Diese Gravitationswellen können sich über das gesamte beobachtbare Universum erstrecken, und ihre Amplitude ist proportional zum Quadrat der Energie, bei der sie erzeugt wurden. Indem sie die Oberfläche, von der wir die CMB-Photonen schließlich in unseren Detektoren empfangen, leicht verzerren, erzeugen diese Gravitationswellen sowohl Temperatur- als auch Polarisationschwankungen im CMB. PLANCK wird gut dafür geeignet sein, die großräumigen Polarisationsanisotropien zu messen und den Energiebereich einzuzugrenzen, in dem die Polarisation erzeugt wurde, oder ihn gar zu messen, wenn er hinreichend groß ist. Wenn PLANCK tatsächlich diese Spuren entdecken sollte, ließe sich damit die Expansionsrate des Universums seit der Inflation direkt bestimmen. Dies wäre eine wahrhaft bemerkenswerte Bestätigung der Inflation.

■ **Breiter Frequenzbereich:** PLANCK kann Wellenlängen empfangen, die um das zehnfache kürzer als bei WMAP sind. Dies wird durch zwei verschiedenen Typen von Detektoren ermöglicht, die für verschiedene Frequenzbereiche optimiert sind.

Die Kombination dieser Faktoren wird PLANCK dazu befähigen, aus dem Leistungsspektrum des CMB etwa das fünfzehnfache dessen an Information abzuleiten, was gegenwärtig durch WMAP bereitgestellt wird.

Natürlich wird ein derart empfindliches Instrument durch eine entsprechend hohe Zahl störender Signale beeinträchtigt. PLANCK ist dafür ausgelegt, solche systematischen Effekte zu kontrollieren und zu unterdrücken. Dazu tragen die Wahl einer Umlaufbahn fern der Erde, das thermische System des Instruments, seine Art, den Himmel abzufahren, große optische Abschirmbleche und vibrationsfreie Kühler bei, und darüber hinaus Myriaden weiterer Details, die dieses Experiment zu einer gewaltigen technischen Herausforderung gemacht haben.

Dass diese technische Herausforderung gemeistert werden konnte, wurde mittlerweile am Boden weitgehend bestätigt, und PLANCK ist auf seinem Weg zum Start im Sommer 2008 weit fortgeschritten. Im dritten Teil dieses Beitrags (ab S. 51) werden wir die wichtigsten Elemente der Instrumentierung von PLANCK und einige Aspekte der Entwicklung der letzten zehn Jahre schildern.

Konzept und Betrieb der Raumsonde

Die Zusammenführung des Teleskops und der Instrumente von PLANCK zu einem abgeschlossenen System innerhalb der vielfachen Beschränkungen einer Raumsonde war eine große Herausforderung, die über viele Jahre hinweg eine kontinuierliche Verfeinerung erlebt hat. Im Hinblick auf die angestrebte, zuvor unerreichte Empfindlichkeit war das Hauptziel die Minimierung der systemati-

schen Effekte, die derart kontrolliert werden müssen, dass ihre Auswirkungen auf die Detektoren unterhalb des Mikrokelvin-Niveaus bleiben. Neben thermischen Effekten betrifft dies optische Verunreinigungen und Streulicht, elektrische Interferenz, Ungenauigkeiten bei der Ausrichtung, Detektorkopplungen usw.

Die erste Maßnahme zur Kontrolle systematischer Effekte war, PLANCK fern der Erde und des Mondes, die intensive Quellen störender Wärmestrahlung sind, zu betreiben. PLANCK wird den Himmel aus der Nähe des äußeren Lagrangepunkts des Erde-Sonne-Systems beobachten, der beinahe viermal so weit von uns entfernt ist wie der Mond (vgl. SuW 1/2007, S. 48). Von diesem Aussichtspunkt aus kann PLANCK gleichzeitig nicht nur der Erde und dem Mond den Rücken zukehren, sondern auch der Sonne, und damit die empfindlichen Elemente seiner Instrumentierung immer im Schatten halten. Die Rückseite von PLANCK, auf der die Solarzellen angebracht sind, wird immer bestrahlt und heiß sein, während das gegenüber liegende Teleskop und die Detektoren immer im Dunkeln liegen und gekühlt sein werden.

Um die Temperatur am kalten Ende noch zu verringern und dadurch störende thermische Strahlung von den Instrumenten abzuhalten, isoliert ein neuartiges System aus drei ineinander geschachtelten kegelförmigen reflektierenden Oberflächen (»V-Profil«) das kalte vom warmen Ende (s. Abb. 10 und 11). Dank dieser Anordnung kühlt die Instrumentenbucht auf PLANCK passiv auf unter 50 Kelvin ab und erreicht damit die Vorkühlung, von der ausgehend die aktiven Kühlstufen die für die Detektoren in der Brennebene erforderlichen niedrigen Temperaturen erreichen können. Der Unterschied zwischen den warmen Teilen der Raumsonde (wo bei einer Temperatur von etwa 350 Kelvin etwa 200 Watt elektrischer Leistung erzeugt werden) und seinen kalten Teilen (wo ein Verdünnungskühler die letzten etwa 100 Nanowatt bei ungefähr 0,1 Kelvin entfernt)

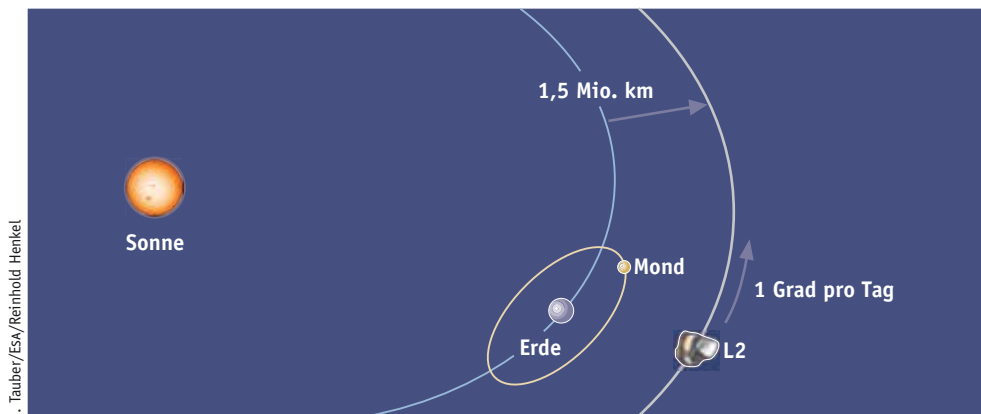
veranschaulicht die erstaunlich wirksame Isolierung des thermischen Aufbaus von PLANCK.

Anders als die meisten Observatorien, die eine große Zahl einzelner Quellen am Himmel beobachten, wird PLANCK ein einziges, alles umfassendes »Objekt« beobachten: den gesamten Himmel. Um die gesamte Himmelskugel abzubilden und dabei eine stabile thermische Umgebung zu gewährleisten, wird sich die Sonde einmal pro Minute um ihre zur Sonne gerichtete Achse drehen. Während einer Umdrehung überstreicht das Gesichtsfeld des Teleskops einen Ring mit 170 Grad Durchmesser (Abb. 5). Dieser Ring wird während etwa 45 Minuten von allen Detektoren wiederholt beobachtet. Während dieser Zeit wird die Umlaufbewegung des Satelliten um die Sonne dafür gesorgt haben, dass die Drehachse um etwa 2,5 Bogenminuten von der Sonne weg zeigt. Diese Verschiebung wird korrigiert, indem die Steuerdüsen der Raumsonde periodisch gezündet werden, wodurch auch der beobachtete Ring am Himmel um denselben Winkel verschoben wird.

Auf diese Weise wird der gesamte Himmel innerhalb von etwa sechs Monaten überstrichen. Tatsächlich ist das von PLANCK verwendete Verfahren etwas komplizierter: Es muss zusätzlich gewährleistet werden, dass PLANCK jederzeit mit Bodenstationen auf der Erde kommunizieren kann, und dass das Teleskop einige Teile des Himmels möglichst häufig beobachten kann. Die letzte Bedingung ist erforderlich, um zeitliche Veränderungen der Empfindlichkeit der Detektoren zu überwachen.

PLANCK wird zusammen mit dem Weltraumobservatorium HERSCHEL an Bord einer ARIANE-5-Rakete vom Weltraumbahnhof in Kourou, Französisch-Guayana, starten. Minuten nach dem Start werden sich die beiden Raumsonden von der Rakete trennen und jede für sich zu ihren endgültigen Umlaufbahnen um den äußeren Lagrangepunkt L_2 fliegen. PLANCK wird sein Ziel in etwa zwei

▶ Abb. 5: PLANCK rotiert einmal pro Minute um eine von der Sonne weg gerichtete Achse. Das Gesichtsfeld ist um 85 Grad gegen die Rotationsachse geneigt und überstreicht deshalb beim Rotieren ein Kreisband am Himmel. Während PLANCK seine Bahn um den L_2 und um die Sonne durchläuft, überdeckt dieses Kreisband den gesamten Himmel innerhalb von sechs bis sieben Monaten (ganz rechts).



Monaten erreichen. Sobald die Raumsonde dort eintrifft, wird sie ihre Instrumente etwa zwei Monate lang kalibrieren und abstimmen. Danach wird sie anfangen, den Himmel abzufahren, der mindestens zweimal vollständig überdeckt werden soll.

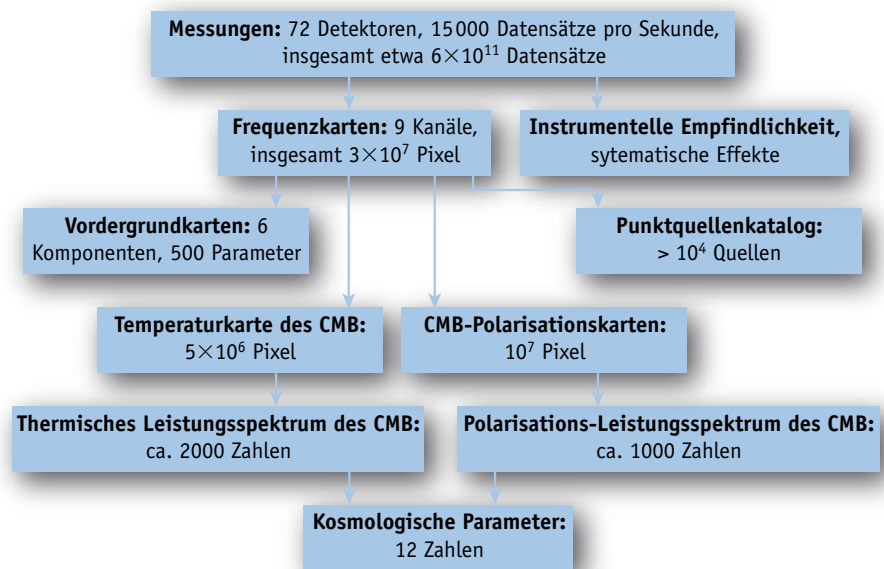
Aspekte der Datenreduktion

Die Analyse der von PLANCK gesammelten Daten wird eine extreme Übung in »Datenkompression« sein. PLANCKs Detektoren werden rund 10^{12} Messungen des Himmels sammeln, um etwa ein Dutzend Konstanten von kosmologischer Bedeutung zu bestimmen (Abb. 6). Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Daten um etwa das 10^{11} -Fache komprimiert werden! Das soll geschehen, ohne irgendwelche wahrnehmbaren systematischen Effekte in die endgültigen Ergebnisse einzuführen. Dabei sollen auch die Unsicherheiten der kosmologischen Konstanten zuverlässig bestimmt werden. Der Weg zur »Datenkompression« ist eng mit der Nutzlast der Raumsonde und mit ihrem Betrieb verwoben und davon abhängig. Alle diese Aspekte müssen gleichzeitig gestaltet und mit größtmöglicher Sorgfalt betrachtet werden.

Begrifflich lässt sich die Auswerteprozedur in fünf größere Schritte aufteilen, die aber in der Praxis alle eng miteinander zusammenhängen:

■ **Säuberung der Daten und Kalibration.** Die Daten werden von vielen durch den Messprozess bedingten Unzulänglichkeiten befreit und in physikalische Einheiten umgewandelt. Zur Kalibration der Daten wird der CMB-Dipol verwendet, dessen Amplitude und dessen Veränderung mit der Umlaufbewegung sehr genau bekannt sind.

■ **Herstellung der Karten.** Die Daten werden in Himmelskarten umgerechnet. Eine optimale Lösung existiert mathematisch, erfordert aber einen so hohen numerischen Aufwand, dass sie unmöglich umgesetzt werden kann. Daher müssen Näherungslösungen entwickelt werden, die daraus Nutzen ziehen, wie PLANCK



J. Tauber/ESA/SuWi-Grafik

den Himmel abtastet. Sie dürfen kaum von der optimalen Lösung unterscheidbar sein, aber sie müssen unvergleichlich viel schneller sein.

■ **Komponententrennung.** Unser Milchstraßensystem, wie auch eine Vielzahl anderer Galaxien und Galaxienhaufen, strahlt hell über einen großen Teil des Himmels hinweg (s. Teil 2 ab S. 48). Diese Signale werden gemessen und vom gesamten Signal abgezogen, um den darunterliegenden CMB zu enthüllen. Entscheidend dafür ist die spektrale Verteilung: Jede Quelle hat eine eigene spektrale Signatur, die sie vom CMB unterscheidet. Hauptsächlich aus diesem Grund wird PLANCK mit Detektoren ausgestattet, deren Kanäle in einem breiten Spektralbereich empfindlich sind. Damit lassen sich Vordergrundquellen identifizieren, abbilden und vom CMB trennen.

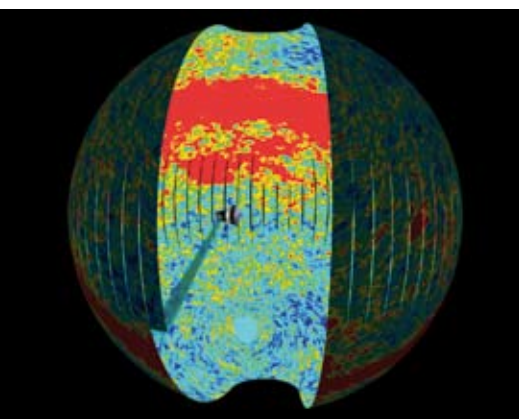
■ **Abschätzung des Leistungsspektrums des CMB.** Sobald eine Karte des CMB vorliegt, wird sie weiter zu einer Menge von etwa 2000 Zahlen komprimiert (das Leistungsspektrum), die ausdrückt, wie stark die Variation des Signals auf jeder in der Karte enthaltenen Winkelskala ist. Wenn die heute bevorzugten Modelle für die Entstehung des CMB richtig sind, enthält das Leistungsspektrum die gesamte Information, die in den CMB-Karten steckt. Es wäre aber höchst interessant, Abweichungen von diesen Annahmen zu finden, und man wird auch intensiv danach suchen. Die optimale Bestimmung des Leistungsspektrums aus den sehr großen und ungleichmäßig überdeckten Karten von PLANCK mit ihren mehr als zehn Millionen Bildpunkten erfordert eine hohe Computerleistung. Die Schwierigkeit besteht darin, das Spektrum und gleichzeitig eine verlässliche Abschätzung der Fehler anzugeben, die jedem seiner Datenpunkte anhaften. Wie auch bei der Herstellung der Karten werden hier neue

▲ Abb. 6: Bei jedem Schritt der Auswerteprozedur wird die Anzahl der Daten um mehrere Größenordnungen reduziert. Schließlich werden die etwa 10^{12} gemessenen Datensätze auf etwa ein Dutzend kosmologisch bedeutsamer Zahlen reduziert sein. Bei dieser Datenkompression darf nichts von der ursprünglichen Information verloren gehen und keine unechte Information vorgetauscht werden.

Methoden benötigt, und sie werden gegenwärtig entwickelt und getestet.

■ **Abschätzung der kosmologischen Parameter.** Jedes kosmologische Modell sagt eine spezifische Form des CMB-Leistungsspektrums vorher, die mit der gemessenen zu vergleichen ist. Die Vorhersagen der Modelle hängen von Annahmen und den Werten einer Menge »kosmologischer Parameter« ab, die daher aus den Daten abgeleitet werden können. Hier gehen wissenschaftliche Beurteilung und Neigung am deutlichsten in den gesamten Prozess ein, weil es einen weiten Bereich von Möglichkeiten zu erforschen gilt. Insbesondere bestimmt auch die Anzahl der Parameter eines Modells deren Unsicherheiten erheblich.

Die obigen Schritte hängen alle eng voneinander ab. So werden zum Beispiel manche instrumentelle Effekte nur dadurch sichtbar werden, dass man die Unterschiede zwischen Karten ähnlicher Detektoren untersucht, oder dass ein Leistungsspektrum verzerrt erscheint. Viele Iterationen werden durchlaufen werden müssen, bevor jeder Aspekt des Problems verstanden ist. Deswegen ist der Analyseprozess iterativ und gegenüber Rückwirkungen empfindlich, und die gesamte Prozesskette muss mehrfach durchlaufen



C. Carreau/ESA

werden, wobei jedesmal mehr Information Eingang findet. Entscheidend für den Erfolg wird es sein, dass vom Beginn bis zum Ende der Analyse die Unsicherheiten aller beteiligten Größen bestimmt werden. Vertrauen in diesen Prozess gewinnt man anhand vollständiger Simulationen, in denen alle Eingabegrößen der Analyse-kette bekannt sind und die es erlauben, den Einfluss spezifischer Effekte auf die Ergebnisse zu untersuchen. Solche Simulationen sind wiederum sehr aufwendig.

Das Prinzip der Analyse wird aber sein: Vertraue einem neuen oder überraschenden Ergebnis erst dann, wenn mehrere Teams es auf mehrere Weisen erschöpfend getestet haben! Es gibt keinen von vorneherein absehbaren Endpunkt der Datenauswertung. Vielmehr wird die gesamte Kette iteriert werden, bis keine großen offenen Fragen mehr bleiben und die Ergebnisse als solide und reif für die Veröffentlichung in der wissenschaftlichen Literatur gelten können.

Perspektiven

Mit ihrer um Größenordnungen höheren Beobachtungsleistung wird die PLANCK-Mission zu einem dramatischen, vielleicht revolutionären Fortschritt in unserem Verständnis des Universums führen. Darüber hinaus wird sie andere Gebiete der Astrophysik erheblich beeinflussen und ein lange überdauerndes Erbe hinterlassen. Die Instrumente und Auswerteverfahren, mit denen die PLANCK-Daten aufgenommen und bearbeitet werden sollen, sind entwickelt und getestet. Der Rest wird von der Natur abhängen, die zweifellos einige interessante Überraschungen bereithält, und vom Erfindungsreichtum der beteiligten Teams, der schon während des vergangenen Jahrzehnts der Vorbereitung ausführlich erprobt wurde.

Auf viele Arten wird PLANCK innerhalb der astrophysikalischen Gemeinschaft neues Gebiet erschließen. Nach der Anzahl der Wissenschaftler und wissenschaftlichen Institute, die daran beteiligt sind, ist PLANCK eines der größten jemals in der Astrophysik unternommenen Experimente und bringt sie sowohl thematisch als auch unter dem Aspekt der Arbeitsweise der Welt der Hochenergiephysik näher. Die Organisation dieses Experiments mit seiner vielfältigen Gemeinschaft, die viele verschiedene Institute, Länder, Behörden und Kulturen übergreift, ist eine ebenso große Herausforderung wie der Bau der Instrumente und die Auswertung der Daten.

Nach dem gegenwärtigen Plan werden PLANCK und HERSCHEL im Sommer 2008 starten, und wenn alles gut geht, werden die ersten kosmologischen Ergebnisse 2012 veröffentlicht werden können. □

Wie PLANCK den Himmel sieht

Bei seiner wiederholten, vollständigen Überdeckung des gesamten Himmels wird das PLANCK-Teleskop nicht nur die Mikrowellenstrahlung des kosmischen Hintergrunds, sondern auch vieler anderer Quellen erfassen. Im Folgenden werden die wichtigsten von ihnen beschrieben.

In Abb. 7 sind die Energiespektren aller Quellen aufgetragen, die Strahlung aus einer »typischen« Himmelsrichtung beitragen. Den Hintergrund im Sichtbaren und im nahen Infrarot bilden zahlreiche ferne Galaxien, die einzeln auf den tiefen Durchmusterungsaufnahmen der Weltraumteleskope HUBBLE und SPITZER zu erkennen sind. Aber im fernen Infrarot- und Millimeterwellenbereich konnte der Hintergrund – mit Ausnahme der allerhellsten Quellen – noch nicht in Einzelbeiträge aufgelöst werden. Die Hälfte der Sternentstehung in der Geschichte des Kosmos, die in den allerhellsten Infrarotgalaxien bei hoher Rotverschiebung erfolgte, ist den Astronomen im Wesentlichen noch verborgen geblieben! PLANCK ist die stärkste bisher gebaute Messmaschine zur Untersuchung der Strukturen in der Hintergrundstrahlung im Millimeter- und Submillimeterbereich, wo auch der langwellige (rotverschobene!) Teil der infraroten Hintergrundstrahlung liegt.

Die Milchstraße

Die Galaxie, in der sich unser Sonnensystem befindet, wird PLANCK eine reiche Mischung zu Beobachten geben. Von unserer Position nahe der Hauptebene des Milchstraßensystems aus erscheint die Galaxis als ein schmales Band, das als Großkreis über dem gesamten Himmel verläuft (Abb. 8). Durch den interstellaren Staub, der von späten Sterntypen und Supernovae erzeugt wurde, ist die Milchstraße in weiten Bereichen für sichtbares Licht undurchlässig. Dieser »dunkle« Staub wird jedoch im Infraroten und im Submillimeterbereich vollkommen durchlässig, und er emittiert in diesen Spektralbereichen selbst entsprechend seiner Temperatur. PLANCK wird daher die kräftige Emission von Gas, Staub und energiereichen Teilchen in der dünnen Scheibe unserer Milchstraße sehen.

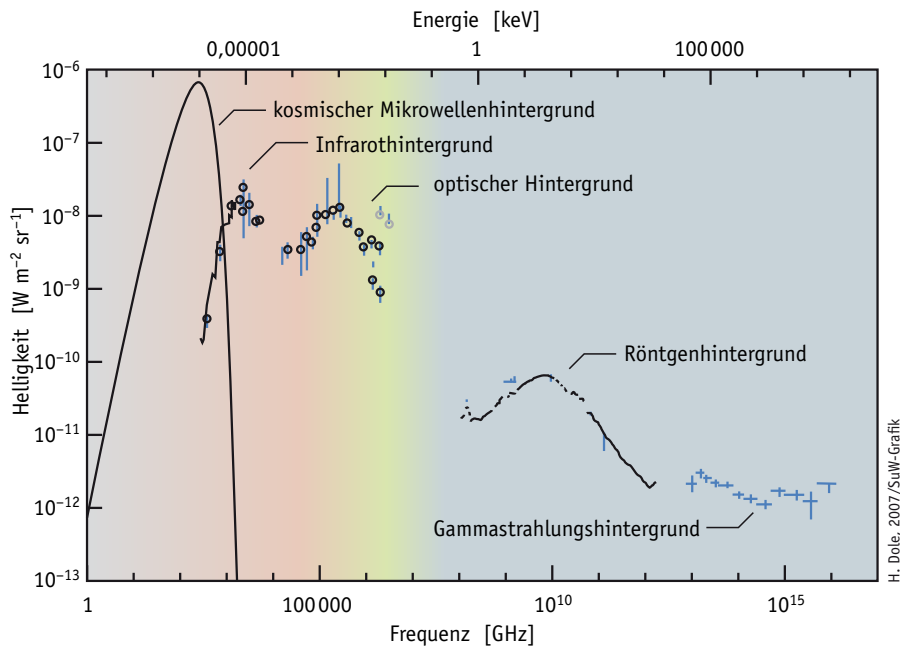
Die drei dominanten Quellen dieser diffusen Emission sind (vgl. Abb. 9):

(a) interstellarer Staub in der galaktischen Scheibe, der hauptsächlich thermische Strahlung aussendet; (b) Elektronen, die beinahe mit Lichtgeschwindigkeit um magnetische Feldlinien spiralen; und (c) Elektronen, die mit Materie wechselwirken und dabei so genannte Bremsstrahlung emittieren. PLANCK wird diese Quellen zum ersten Mal gleichzeitig abbilden. Zusätzlich wird PLANCK die Polarisation der galaktischen Emission kartieren und uns damit Zugang zu neuen physikalischen Phänomenen verschaffen. So wird es zum Beispiel zum ersten Mal möglich werden, die dreidimensionale Struktur des galaktischen Magnetfeldes abzubilden, das eine der wesentlichen polarisierenden Quellen der Milchstraße ist.

Neben der diffusen Emission wird PLANCK in der Milchstraße viele punktförmige Quellen sehen. Dazu gehören sehr junge Sternentstehungsgebiete, kompakte Gebiete aus ionisiertem Wasserstoff und Supernova-Überreste. Auch Objekte unseres Sonnensystems – Planeten, Asteroiden und Kometen – werden sich auf den PLANCK-Karten zeigen. Diese reiche Mischung diffuser und punktförmiger Quellen wird die Trennung der einzelnen Komponenten sehr erschweren, aber das Ergebnis wird die Gemeinschaft der Wissenschaftler für Jahrzehnte beschäftigen.

Andere Galaxien

Es gibt Milliarden anderer Galaxien im Universum, von denen viele unserem Milchstraßensystem ähneln, viele aber auch radikal von ihr verschieden sind. Viele dieser Galaxien leuchten (so wie unsere auch) im Synchrotronlicht und im Licht der thermischen Emission ihres warmen Staubes. PLANCKs langwellige Instrumente werden Tausende von Radioquellen entdecken (die größtenteils bei den Wellenlängen emittieren, die typisch für Synchrotronstrahlung sind), und PLANCKs kurzwellige Instrumente werden etwa zehntausend staubreiche Galaxien finden.



H. Dole, 2007/SuW-Grafik

Abb. 7: Diese Kurve zeigt ein typisches Frequenzspektrum von einem der »saubersten Fenster«, fern vom hellen Milchstraßenband und von interstellaren Wolken. Das Spektrum zeigt die mittlere elektromagnetische Strahlung im Universum in Abhängigkeit von der Frequenz; die verwendeten Daten stammen von einer Vielzahl von Observatorien, die meisten von ihnen im Weltraum. Von der gesamten Energie sind 95 Prozent im CMB enthalten. Die restlichen fünf Prozent stecken in der von allen Galaxien seit ihrer Entstehung emittierten Strahlung und verteilen sich etwa gleichmäßig auf das Sichtbare und nahe Infrarot (Maximum bei zwei Mikrometern Wellenlänge) und das ferne Infrarot (Maximum bei 200 Mikrometern). Röntgen- und Gammastrahlung tragen nur etwa ein Hundertstel Prozent, der Radiohintergrund nur ein Millionstel der Energie der gesamten elektromagnetischen Strahlung bei.

Die Radioquellen, die PLANCK entdecken wird, werden wahrscheinlich insofern besonders sein, weil sie flackern oder besonders jung sind und deswegen ein hochfrequentes Synchrotronspektrum haben. Die meisten dieser Radioquellen werden uns im kosmologischen Sinn relativ nahe sein: Wir erwarten sie bei Rotverschiebungen kleiner als etwa eins.

Dagegen können die staubreichen Galaxien, die PLANCK bei kürzeren Wellenlängen entdecken wird, sehr viel weiter entfernt sein. Wegen der Rotverschiebung gelangen wir bei gleicher Wellenlänge der Beobachtung mit zunehmender Entfernung zu immer kürzeren emittierten Wellenlängen, und deshalb ändert sich das beobachtete Spektrum der Quellen der thermischen Emission abrupt. Deswegen kann PLANCK staubreiche Galaxien bei sehr beträchtlichen Rotverschiebungen erkennen. Wir hoffen sogar, thermische Emission massereicher Galaxien zu finden, die bei Rotverschiebungen von 5 bis 10 gerade entstehen: Diese Objekte werden so beobachtet, wie sie weniger als 1,5 Milliarden Jahre nach dem Urknall waren, also nach einem Zehntel des heutigen Weltalters! Da die zuerst entstandenen Galaxien wahrscheinlich am stärksten zur Gruppenbildung neigen, hoffen wir, mit PLANCK Gruppen solcher »urzeitlicher Galaxien« zu finden.

Aber weitaus die meisten fernen Galaxien werden für PLANCK als individuelle Quellen unsichtbar bleiben. Stattdessen wird ihre überlagerte Emission zu einem diffusen Hintergrund beitragen, der sich nahezu isotrop über den gesamten Himmel erstreckt. Diese unaufgelöste Emission ferner Galaxien wird kosmischer Infrarothintergrund genannt. PLANCK wird die großräumige Verteilung der Sternent-

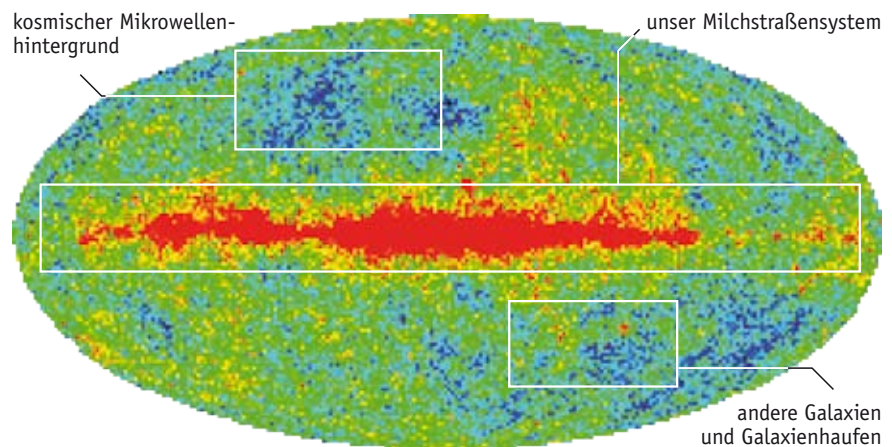
stehungsaktivität untersuchen können und wesentlich zu unserem Verständnis der Entstehung von Galaxienhaufen beitragen.

Galaxienhaufen

Auf ihrer langen Reise zu uns durchqueren die Photonen des CMB Inhomogenitäten in der Materieverteilung und kosmische Strukturen, die ihnen schwache, aber wichtige Informationen aufprägen. Unter den interessantesten Ereignissen, die einem CMB-Photon geschehen können, gehören Begegnungen mit heißen Elektronen und Ablenkungen durch Gravitationsfelder.

Die größten gravitativ gebundenen Strukturen im Universum sind die Galaxienhaufen. Sie enthalten einige hundert bis zu etwa tausend Galaxien, die von der Schwerkraft von bis zu 10^{15} Sonnenmassen zusammengehalten werden, zu der die Dunkle Materie den größten Beitrag liefert. Die Galaxienhaufen sind mit einem diffusen, zehn bis hundert Millionen Grad heißen Gas angefüllt – bei diesen Temperaturen können elektrisch neutrale Atome nicht existieren: Sie wer-

Abb. 8: Die winzigen Intensitätsschwankungen, die PLANCK messen soll (hier in einem Modell gezeigt), werden in den erstellten Karten erst nach Abzug der gemittelten Temperaturstrahlung des CMB und des »Dipols« sichtbar. Die verbleibende dominante Komponente ist die Emission unserer eigenen Milchstraße. Weiter entfernt von der galaktischen Ebene sind die meisten Strukturen, die größer als etwa ein Grad sind, Anisotropien des CMB. Allerdings verbirgt sich unter ihnen die Emission ferner Galaxien und Galaxienhaufen. Jede Art dieser Objekte besitzt ihr eigenes charakteristisches Spektrum, das sie von den anderen zu unterscheiden erlaubt.



HFI-Konsortium

den in ihre Elektronen und Kerne aufgespalten und bilden ein Plasma.

CMB-Photonen werden auf ihrem Weg durch einen Galaxienhaufen gelegentlich von einem dieser Elektronen getroffen, dessen Energie sehr viel höher als die des Photons ist. Das Photon wird dabei auf wesentlich höhere Energien gebracht. Dadurch nimmt die Anzahl der niederenergetischen Photonen ab und die der hochenergetischen Photonen zu. Bei niedrigen Energien oder Frequenzen schwächt der Galaxienhaufen den Mikrowellenhintergrund, er wirft sozusagen einen Schatten. Aber die gestreuten Photonen tauchen bei höheren Frequenzen wieder auf, wo derselbe Galaxienhaufen als Lichtquelle erscheint. Dies ist der so genannte (thermische) Sunjajew-Seldowitsch-Effekt. Für fast alle Arten von Galaxienhaufen bei

beliebigen Entfernungen liegt die Übergangsfrequenz zwischen Schatten und Licht bei 217 GHz (1,3 mm Wellenlänge), mitten im Frequenzbereich, den die Detektoren auf PLANCK überdecken.

Trotz ihrer enormen Größe erscheinen Galaxienhaufen als kleine Objekte am Himmel. PLANCK kann die meisten von ihnen nicht auflösen. Dennoch werden sie wegen ihrer einzigartigen, durch den Sunjajew-Seldowitsch-Effekt hervorgerufenen Signatur in den PLANCK-Daten leicht zu entdecken sein. Keine andere bekannte Quelle wirft unterhalb von 217 GHz Schatten und leuchtet oberhalb davon! Ein weiterer Vorteil des Sunjajew-Seldowitsch-Effekts ist, dass er nur schwach von der Entfernung der Galaxienhaufen abhängt. Selbst weit entfernte Galaxienhaufen lassen sich auf diese Weise finden, wenn es sie gibt. Fast 10000 Galaxienhaufen sollten in den PLANCK-Daten gefunden werden, von denen etwa hundert sehr weit entfernt sein werden.

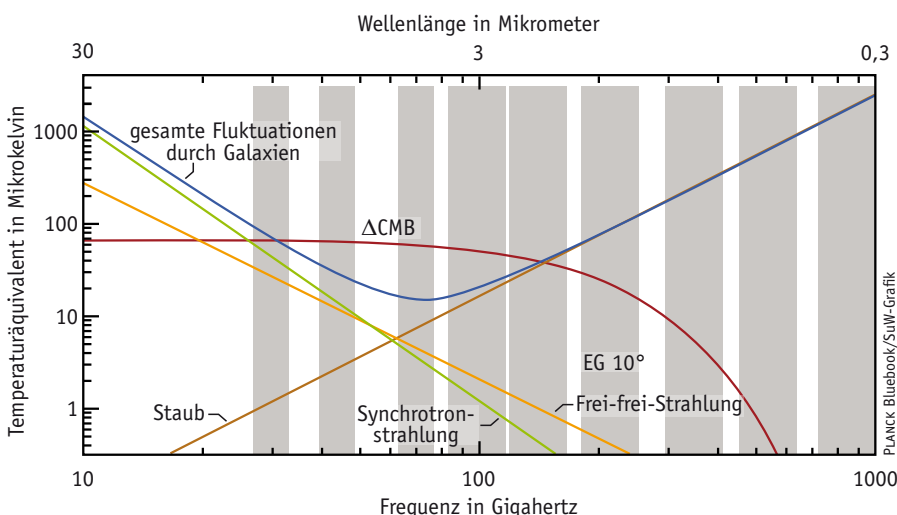
Das ist an sich schon sehr aufregend, weil Galaxienhaufen als Leitfossilien der Kosmologie angesehen werden können. Sie entwickeln sich spät in der kosmischen Geschichte, und die Epoche ihrer Entstehung und lebhaftesten Entwicklung hängt empfindlich von den kosmologischen Parametern ab. Auf diese Weise lassen sich die kosmologischen Parameter anhand der Population der Galaxienhaufen, die in den primären PLANCK-Daten gefunden werden, auf unabhängige Weise überprüfen. Aber die Population der Galaxienhaufen sollte auch die Eigenschaften der mysteriösen Dunklen Energie widerspiegeln, die für die beschleunigte Expansion des Weltalls verantwortlich ist. Damit werden die von PLANCK zu entdeckenden Galaxienhaufen eine ganz eigene kosmologische Informationsquelle darstellen, und das umso mehr, wenn die Messungen des Sunjajew-Seldowitsch-Effekts mit solchen im optischen, infraroten oder Röntgenbereich kombiniert werden.

Während einer für kosmologische Maßstäbe kurzen Zeit zu Beginn ihrer Reise breiteten sich die CMB-Photonen in neutralem Gas aus. Nachdem die ersten Sterne und andere astronomische Quellen entstanden waren, ionisierte deren energiereiche Strahlung das umgebende Gas wieder und trennte die Elektronen von ihren Kernen. In ionisiertem Material können sich Photonen nicht frei ausbreiten, weil sie ständig von den freien Elektronen gestreut werden, ähnlich wie beim Sunjajew-Seldowitsch-Effekt. Je nachdem, wann und wie diese Reionisation stattfand, muss sie das Erscheinungsbild des CMB verändert haben. Es ist gut möglich, dass anhand der PLANCK-Daten auch die Geschichte der Reionisation rekonstruiert werden kann.

Einstein fand, dass Massen Licht ablenken. Daher werden die CMB-Photonen, während sie sich durch das Universum ausbreiten, abgelenkt, wenn sie kosmische Strukturen passieren. Die Beobachtung des CMB durch die großräumigen Strukturen des Universums kann daher damit verglichen werden, dass man Lichter durch geriffeltes Glas betrachtet: Er wird verzerrt. Natürlich wissen wir nicht, wie der CMB ohne diesen Gravitationslinseneffekt aussähe. Aber die Muster, die ihm die Gravitationslinsen aufprägen, haben bestimmte charakteristische Eigenschaften, durch die sie in den Daten aufgespürt werden können. Einerseits stören sie und müssen von den CMB-Karten entfernt werden, bevor genaue Schlüsse über das Universum gezogen werden können. Andererseits geben sie uns höchst wertvolle Auskünfte über die Massenverteilung im Universum auf großen Skalen. Außer einer Glättung der CMB-Strukturen bewirken Gravitationslinsen auch zusätzliche Strukturen in der Polarisation des CMB, die er von sich aus nicht haben kann.

Ein weiterer Effekt, der eng mit dem Gravitationslinseneffekt zu tun hat, betrifft die Entwicklung der Strukturen, während die CMB-Photonen sie durchfliegen. Da zum Beispiel Galaxienhaufen Durchmesser von einigen Millionen Lichtjahren haben, können sie sich erheblich weiter entwickeln, während das Licht sie durchreist. Wenn die Photonen in Galaxienhaufen eintreten, gewinnen sie Energie, indem sie in das Gravitationspotential fallen, und sie verlieren Energie, wenn sie wieder austreten. Wenn das Gravitationspotential sich vertieft, während die Photonen sich darin aufhalten, verlieren sie mehr Energie beim Austritt, als sie beim Eintritt gewonnen haben. Dieser Effekt, der auch auf noch größeren Skalen als Galaxienhaufen auftritt, wird auch in den PLANCK-Daten enthalten sein. □

▣ Abb. 9: Räumliche Fluktuationen der Intensität des CMB (purpurne Linie) in Abhängigkeit von der Frequenz, verglichen mit den Fluktuationen der Intensität anderer Quellen von Mikrowellenstrahlung. Die Emission des galaktischen interstellaren Staubs, Synchrotronstrahlung freier Elektronen und Frei-frei-Strahlung sind nach Messungen der Raumsonde WMAP (Bennett et al. 2003) gezeigt. Die Stärke der Fluktuationen im CMB und in den galaktischen Emissionen hängt von dem betrachteten Winkelabstand ab, sie sind hier für ein Grad Abstand gezeigt. Bei kleinen Winkeln dominieren die extragalaktischen Quellen. Das Minimum der diffusen Vordergrundemission und damit das am wenigsten gestörte Fenster auf die Fluktuationen des CMB liegen bei 70 GHz. Die grauen Balken zeigen die Frequenzbereiche an, in denen PLANCK messen wird.



Wie PLANCK arbeitet

Die hohe Empfindlichkeit und Stabilität der Messinstrumente der PLANCK-Mission wird durch völlig neuartige technologische Entwicklungen erreicht. Hier schildern wir deren wesentliche Aspekte.

Das Teleskop

Um in dem kosmologischen Fenster nahe bei drei Millimeter Wellenlänge (entsprechend einer Frequenz von 100 Gigahertz) eine Winkelauflösung von etwa zehn Bogenminuten zu erreichen, muss die Öffnung des Teleskops (Abb. 10 und 11) etwa 1,5 Meter betragen. Das Teleskop ist optisch so gestaltet, dass es Störungen durch Quellen, die außerhalb des Gesichtsfelds liegen, minimiert. Der Primär- und der Sekundärspiegel sind elliptisch und so angebracht, dass die einfallende Strahlung nicht durch Spiegelränder und mechanische Teile abgeschattet wird. Ähnlich »schiefe« optische Anordnungen wurden bereits in früheren CMB-Experimenten verwendet.

Da es bei PLANCK notwendig war, viele Detektoren für einen breiten Frequenzbereich unterzubringen, musste die Konstruktion sehr sorgfältig geplant werden. Die Spiegel bestehen aus kohlefaserverstärktem Kunststoff in einer wabenartigen Schichtstruktur, die mit einer dünnen Aluminiumschicht überzogen ist. Diese Spiegel sind für die Weltraumumgebung von PLANCK geeignet, sie stellen eine hohe Reflektivität ($> 0,995$) sicher, sind leicht, haben geringe mechanische Oberflächenfehler (typischerweise im Bereich von fünf Mikrometern) und sind stabil gegen thermische Spannungen. Zum Beispiel wiegt der $2 \times 1,5$ Meter messende Hauptspiegel nur 28 Kilogramm, ist aber trotzdem steif genug, um die Belastung beim Start auszuhalten. Seine Form bleibt so gut wie unverändert, wenn die Temperatur von 300 Kelvin beim Start auf 40 Kelvin beim Betrieb verringert wird.

Bei den Wellenlängen, bei denen PLANCK beobachtet, sind Beugungseffekte wichtig. Sie erzeugen Beugungsmuster, die selbst bei großen Winkelabständen von der optischen Achse nicht ganz verschwinden. Streulicht, das die Detektoren aus Richtungen fern von der Sichtlinie erreicht, stellt für CMB-Experimente ein besonders gravierendes Problem dar. Der CMB hat im Mikrowellenbereich nur etwa ein Prozent der Leuchtkraft der Erde, sodass Experimente in erdnahen Umlaufbahnen für diese Störstrahlung besonders anfällig sind. Nur in erdfernen Umlaufbahnen kann dieser Effekt weitgehend abgeschwächt wer-

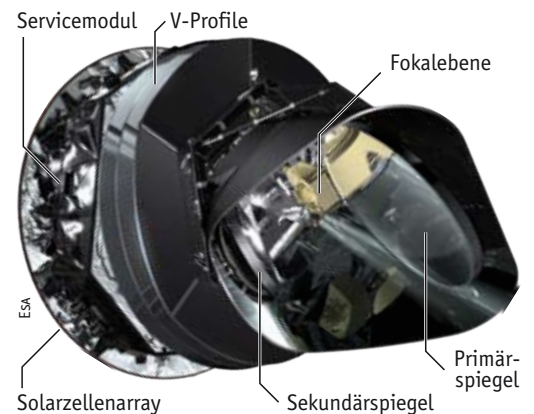
den, weil sich dort der Raumwinkel, unter dem die Erde erscheint, drastisch verkleinert. Das ist einer der wesentlichen Gründe, warum für WMAP und PLANCK Umlaufbahnen um den Librationspunkt L_2 gewählt wurden (vgl. SuW 1/2008, Seite 48).

Vom L_2 aus gesehen erscheint die Erde so groß wie von der Erde aus der Vollmond. Aber PLANCKs hohe Empfindlichkeit erfordert sogar am L_2 , dass Streulicht extrem wirksam abgeschirmt werden muss – die Toleranzgrenze liegt bei etwa einem Milliardstel, vor PLANCK wurde das niemals erreicht. Um das Streulicht so wirksam zu unterdrücken, überdeckt die Instrumentenoptik nur einen kleinen Teil des Teleskops, das zudem von großen Abschirmblechen umgeben ist. Eine umfassende Testserie (bei der nie zuvor erreichte Genauigkeiten erzielt wurden) stellte sicher, dass die notwendige Unterdrückung der Störstrahlung wirklich erreicht wird. Parallel dazu wurden mittels ausgefeilter Software, die alle Aspekte der Optik mit einbezieht, für alle Detektoren genaue Modelle des Strahlengangs berechnet und mit den Messungen verglichen. Diese präzise Überwachung der optischen Eigenschaften anhand von Rechnungen und Labordaten entspricht den am weitesten fortgeschrittenen Technologien auf dem Gebiet der Mikrowellenantennen.

Die Instrumente in der Brennebene

Das PLANCK-Teleskop lenkt Photonen aus einem kleinen Ausschnitt des Himmels auf die Brennebene. Die ersten Bauteile, auf die Photonen dort treffen, sind die Hornantennen (Abb. 14 b und c). Das sind resonante Antennen, welche die Mikrowellenstrahlung mit extrem genau bestimmter Winkelauflösung aufsammeln und es dadurch ermöglichen, Streulicht und Richtungsempfindlichkeit sehr genau zu kontrollieren. Nach Passieren der Hornantennen hängt das Schicksal der Photonen entscheidend davon ab, in welche Art von Detektor sie fallen.

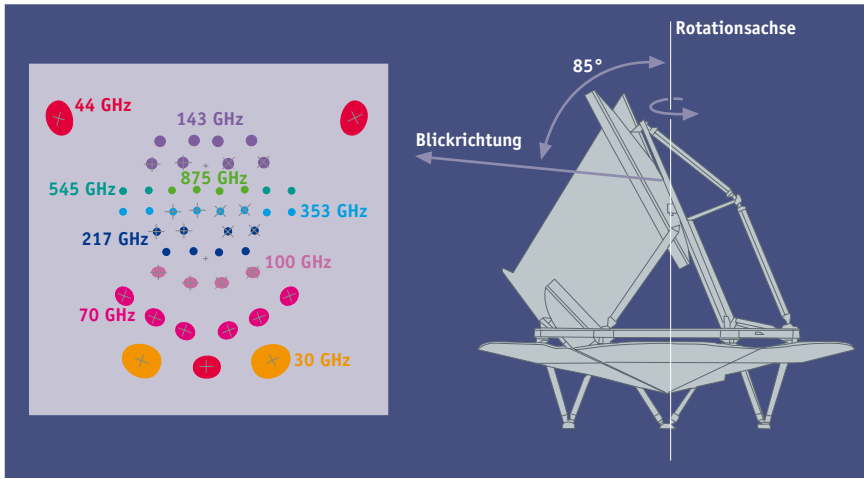
Im Millimeterwellenbereich gibt es hauptsächlich zwei Detektortechnologien. Eine beruht auf kohärenten Radioempfängern, deren Konzept dem ähnelt, das bei WMAP und COBE, aber auch schon von Penzias und Wilson bei ihrem Entde-



▲ Abb. 10: Die wissenschaftliche Nutzlast der PLANCK-Mission umfasst Primär- und Sekundärspiegel des Teleskops sowie zwei Messinstrumente. Der wesentliche Teil der Messinstrumente liegt nahe der Fokalebene des Teleskops, aber die meisten ihrer Komponenten sind auf die gesamte Sonde verteilt und auf diesem Bild nicht zu sehen. Zu den wichtigsten Teilen gehören die Kühlaggregate, welche die Detektoren auf ihre extrem niedrigen Temperaturen bringen.

▼ Abb. 11: Das PLANCK-Teleskop fängt die Strahlung vom Himmel auf und bündelt sie in der Fokalebene. Es ist insgesamt drei Meter hoch und drei Meter breit, seine beiden aluminiumbedampften Spiegel bestehen aus kohlefaserverstärktem Kunststoff.

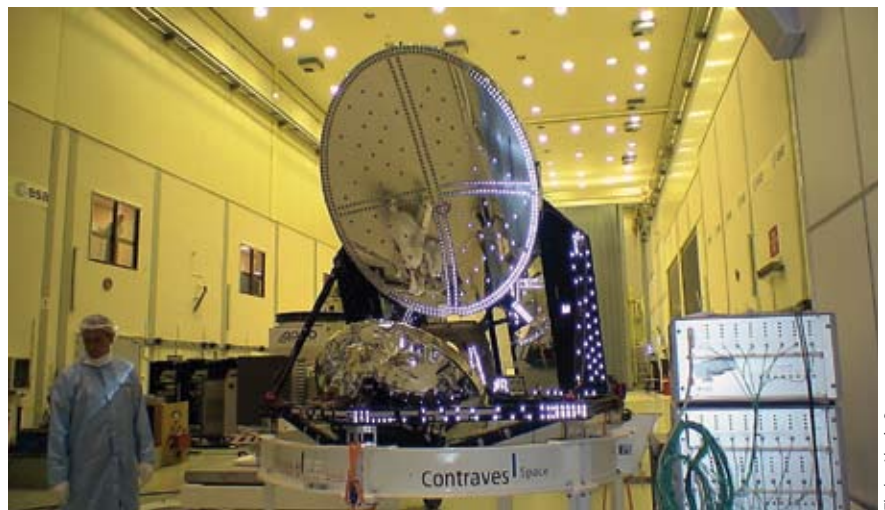




J. Tauber/ESA/Reinhold Henkel

◀ Abb. 12: Die von den Detektoren vermessenen Flächen bilden ein sehr lockeres Muster (links) und liegen am Himmel um 85 Grad gegen die Rotationsachse der Raumsonde versetzt.

▼ Abb. 13: PLANCKs Teleskop wird für Vermessungen im kalten Zustand vorbereitet.



Thales Alenia Space

ckungsexperiment Mitte der 1960er Jahre verwendet wurde. Die andere baut auf bolometrischen Detektoren mit Filtern auf, die auf extrem niedrige Temperaturen gekühlt werden und die denen ähneln, die in einer Reihe von Ballonexperimenten verwendet wurden. Keine der beiden Technologien hat bisher bewiesen, dass sie die innerhalb des gesamten von PLANCK überdeckten Spektralbereichs notwendige Messgenauigkeit erreichen kann. Deshalb werden bei PLANCK beide Technologien bei ihrem jeweiligen Betriebsoptimum verwendet. Das Niederfrequenzinstrument (LFI) ist eine Anordnung von Radiometern, die auf 20 Kelvin gekühlt wird und drei Frequenzbänder zwischen 30 und 70 Gigahertz überdeckt. Das Hochfrequenzinstrument (HFI) besteht aus Bolometern, die auf 0,1 Kelvin gekühlt werden und sechs Bänder zwischen 100 und 850 Gigahertz überdecken. Zusammen mit dem Teleskop stellen diese Detektoren eine bisher unerreichte Kombination von Empfindlichkeit, Winkelauflösung, breitem Spektralbereich und Himmelsüberdeckung dar.

■ Das Niederfrequenzinstrument LFI:

Strahlung mit größeren Wellenlängen als drei Millimeter wird in das LFI eingespeist (Abb. 15). Sie trifft auf geeignete Wellenleiter, welche die beiden orthogonalen linearen Polarisationsanteile voneinander trennen. Jeder Polarisationskanal ist mit einem eigenen Radiometer verbunden, sodass die vollständige Information über die Intensität und die lineare Polarisation der einfallenden Photonen erhalten bleibt. Ein großer Vorteil kohärenter Empfänger ist, dass sie die beiden Polarisationsrichtungen sehr genau voneinander trennen können, wobei eine Vermischung im Bereich von nur 0,01 Prozent übrig bleibt.

Die Radiometer beginnen mit mehrstufigen HEM-Transistoren (HEMT, high electron mobility transistor), die das Signal um etwa das Zehnmillionenfache verstärken. In einem HEMT sind die

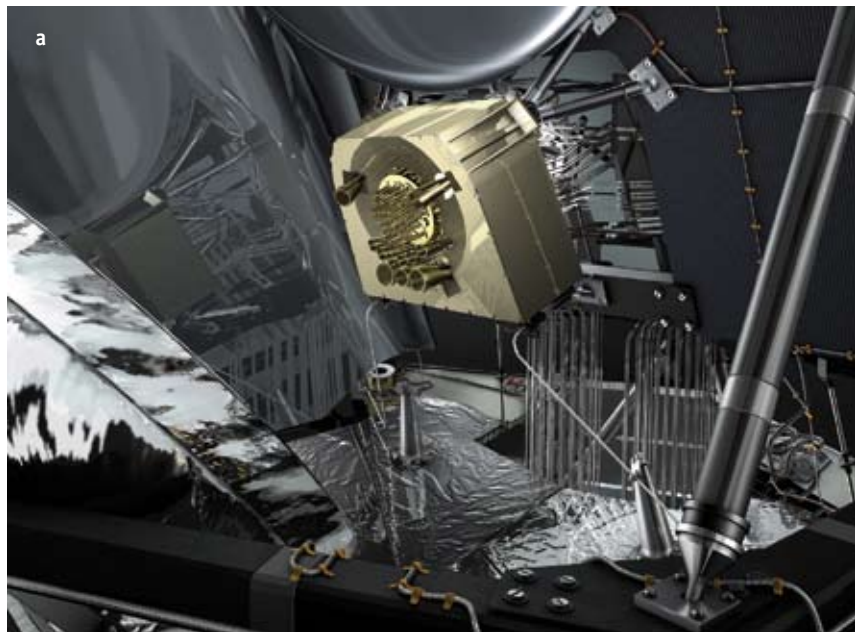
Leitungselektronen auf zweidimensionale Schichten beschränkt, wodurch die Streuung verringert, die Beweglichkeit der Elektronen erhöht und dadurch das Rauschen sehr niedrig wird. PLANCK benutzt Indiumphosphid-HEMTs der letzten Generation, die Gatterlängen von nur 50 Nanometern haben. Das intrinsische Rauschen eines HEMT wird erheblich verringert, wenn er bei sehr tiefen Temperaturen betrieben wird. Um seine Leistung zu optimieren, wird das gesamte Eintrittsende des LFI auf 20 Kelvin gekühlt. Ein weiterer Vorteil der Indiumphosphid-HEMTs ist ihr niedriger Stromverbrauch, was für den Betrieb kryogener Experimente im Weltraum eine wesentliche Bedingung ist. Die gesamte Anordnung von 44 Verstärkern im LFI verbraucht weniger als 0,5 Watt.

Der Nachteil der HEMT-Verstärker ist, dass sie eine zusätzliche Quelle niederfrequenten Rauschens (so genanntes $1/f$ -Rauschen) einführen. Um dessen Auswirkungen zu unterdrücken, wird das Himmelssignal ständig mit einer inneren Referenzquelle verglichen (einem Schwarzkörper bei vier Kelvin). Dies geschieht, indem man vor und hinter den Verstärkern Geräte einbaut, die das Himmelssignal mit dem der Referenzquelle zu

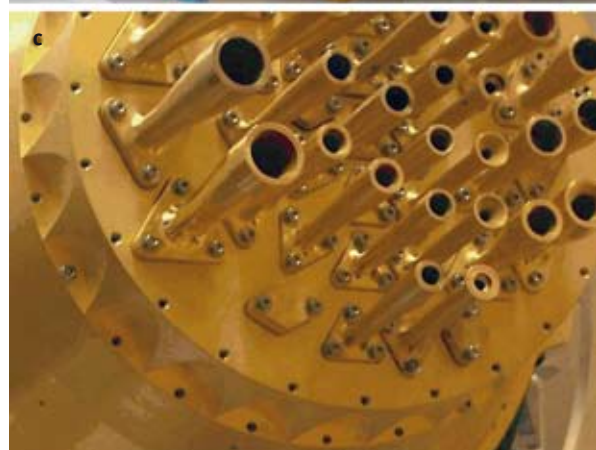
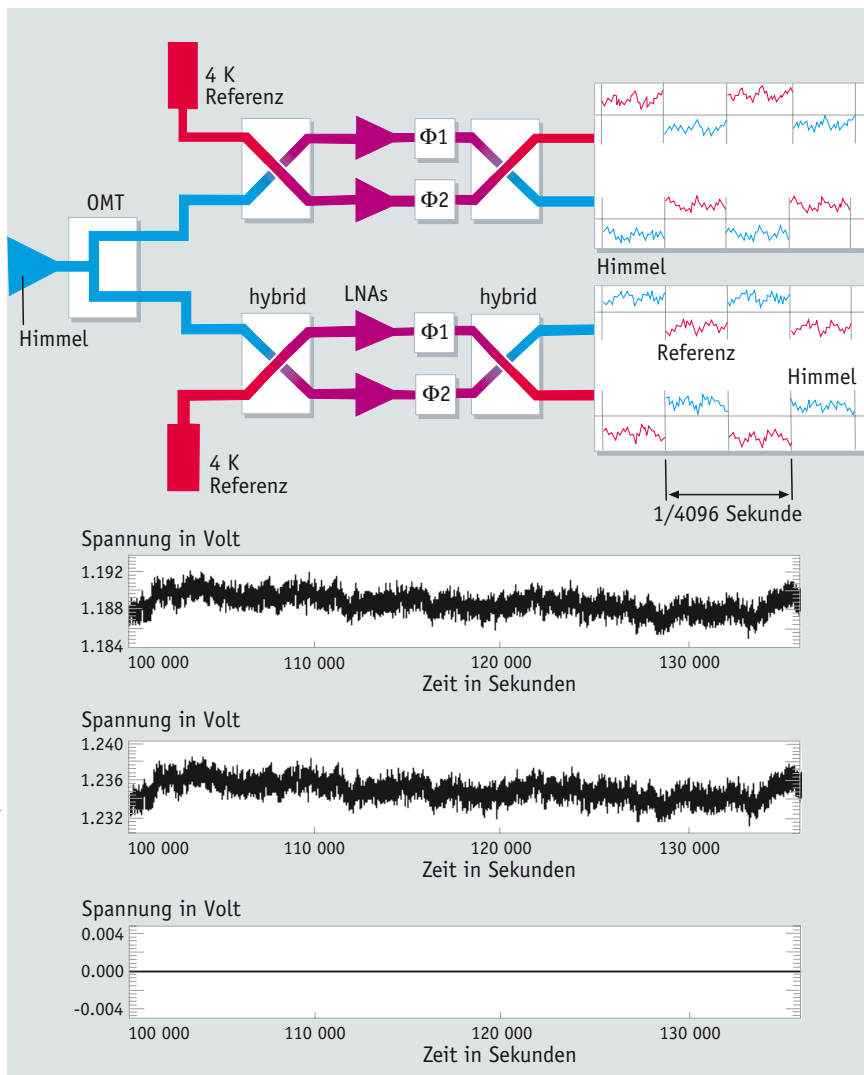
mischen erlauben. Auf diese Weise erfahren beide Signale dieselben Beeinträchtigungen durch die beiden parallelen Ketten von HEMTs. Wenn ihre Differenz gebildet wird (Abb. 15 unten), verschwinden diese Störungen, und das Signal wird etwa um das Zehntausendfache stabiler, als wenn nur eine Kette benutzt würde. Die verbleibenden Störungen im gemessenen Signal werden durch das Verfahren weiter verringert, mit dem die Raumsonde den Himmel abtastet, wodurch ein Vergleich von Messungen in Intervallen von einer Minute möglich wird.

Die Signale werden dann durch etwa anderthalb Meter lange Wellenleiter geschickt, welche die kalten (20 Kelvin) und die warmen (300 Kelvin) Teile des Instruments miteinander verbinden. Nach einer weiteren Verstärkung um das Tausendfache werden die Signale durch eine Detektordiode registriert. Um weitere Instabilitäten durch die warme Elektronik zu unterdrücken, wechselt ein Phasenschalter 4000-mal pro Sekunde zwischen dem Himmels- und dem Referenzsignal hin und her. Die Gleichspannung am Ausgang des Detektors wird verstärkt, integriert, digitalisiert, komprimiert, und an die Bodenstation geschickt. Alle diese Maßnahmen dienen dazu, die Stabilität

▶ Abb. 14: (a) Ein Modell der Fokalebenenkonfiguration. (b) Die Fokalebene des Niederfrequenzinstruments (LFI); die gesamte Einheit wird durch einen Sorptionskühler auf 20 Kelvin gekühlt. Erkennbar sind die Hornantennen bei 30, 44 und 70 Gigahertz (in abnehmender Folge) und einige der 70-Gigahertz-Module und Wellenleiter. Der zentrale Hohlraum wird das Hochfrequenzinstrument (HFI) aufnehmen. (c) In der Fokalebene des Hochfrequenzinstruments überdecken Hornantennen unterschiedlicher Größe sechs Frequenzbänder im Bereich von 100 bis 850 Gigahertz. Dieser Teil wird von einem Stirling-Kühler auf vier Kelvin gekühlt, als Vorstufe für die auf 0,1 Kelvin gekühlten Bolometer. (d) Die integrierten Nieder- und Hochfrequenzinstrumente nach Herstellung der Verbindung zur Raumsonde. Die Fokalebene liegt auf der nach unten weisenden Platte.



▼ Abb. 15: Oben – Schema des Signalweges durch eine LFI-Radiometerkette (Eingangsstufe). Unten – das gemessene Signal, das Referenzsignal, und deren Differenz. Die Stabilität des Differenzsignals ist 10 000-mal höher als die der einzelnen Komponenten. Das LFI enthält elf Hornantennen, verbunden mit insgesamt 44 Detektoren.



eines Instruments zu sichern, das Mikrokkelvin-Signale in einem Untergrund entdecken muss, der etwa eine Million mal heller ist.

Das LFI wurde in verschiedenen Stufen von seinen Einzelteilen bis zum Gesamtsystem im Labor getestet. Dabei ergaben sich Empfindlichkeitswerte, die den Erwartungen entsprechen, und eine Stabilität, welche die optimistischsten Vorhersagen übertrifft.

■ **Das Hochfrequenzinstrument HFI:**

Strahlung mit Wellenlängen kürzer als drei Millimeter wird in das HFI eingespeist. Der genaue Frequenzbereich wird durch Interferenzfilter bestimmt, die so aufgebaut sind, dass die Erwärmung aufgrund der Strahlung isoliert und nicht nach innen weitergegeben wird. Je nach dem Bolometertyp wird entweder eine gegebene Polarisationsrichtung ausgewählt oder nicht. Die ausgewählten Photonen werden dann im Bolometer absorbiert, weil die einfallende elektromagnetische Welle Elektronen in einem gedämpften Absorber anregt, wo die Bewegung der Elektronen aufgrund der Dämpfung in Wärme umgewandelt wird. Diese Wärme erhöht die Temperatur um winzige Beträge, im Bereich von 0,1 Mikrokkelvin, die von Festkörperthermometern aus dotiertem Silizium gemessen werden.

Unter den Detektoren des HFI sind zwanzig unpolarisiert. Sie absorbieren die Strahlung in einem ungerichteten Widerstandsgitter, das einem Spinnennetz ähnelt. 32 Bolometer sind nur für linear polarisiertes Licht empfindlich. Sie nehmen die Strahlung in zwei rechtwinklig zueinander ausgerichteten Gittern auf parallelen Widerstandsdrähten auf, von denen jeder nur die parallel zu den Dräh-

ten polarisierte Komponente des elektrischen Feldes wahrnimmt.

Die extreme Empfindlichkeit des HFI kann nur erreicht werden, wenn die gesamten Bolometer und ihre Umgebung auf Temperaturen um 0,1 Kelvin gekühlt werden. Im Test haben die HFI-Bolometer eine Empfindlichkeit gezeigt, die nahe an der Grenze liegt, die durch die Quantenphysik im absorbierenden Material gesetzt wird. PLANCK ist das erste Weltraumexperiment, in dem Detektoren auf solch tiefe Temperaturen gekühlt werden.

Um dies zu erreichen, ist der Teil des HFI, der in der Brennebene liegt, wie eine russische Puppe aufgebaut (Abb. 16). Er besteht aus ineinander gestellten, zunehmend kälteren Schichten, von denen jede die jeweils nächste vor der Strahlung und der Wärmeleitung aus wärmeren Bauteilen schützt. Jede dieser Schichten wird von einer anderen Maschine gekühlt. Dadurch wird sichergestellt, dass die letzte Stufe auf 0,1 Kelvin gekühlt werden kann: Das Abschirmungssystem ist so wirksam, dass die letzte Kühlerstufe eine Kühlleistung von weniger als einem Mikrowatt benötigt. Die Temperatur der Platte, auf der die Bolometer angebracht sind, muss ebenfalls sehr niedrig und sehr stabil sein, weil Temperaturschwankungen der Bolometer für echte Signale vom Himmel gehalten werden könnten. Höchst empfindliche Thermometer und ein origineller Aufbau wurden entwickelt, um eine Temperaturstabilität zu erreichen, die in Nanokelvin auszudrücken ist.

Wie auch das LFI verwendet das HFI ein modulares Ausleseschema, um die notwendige Stabilität zu erreichen. Die Ausleselektronik des HFI baut auf Verstärker mit moduliertem Dunkelstrom

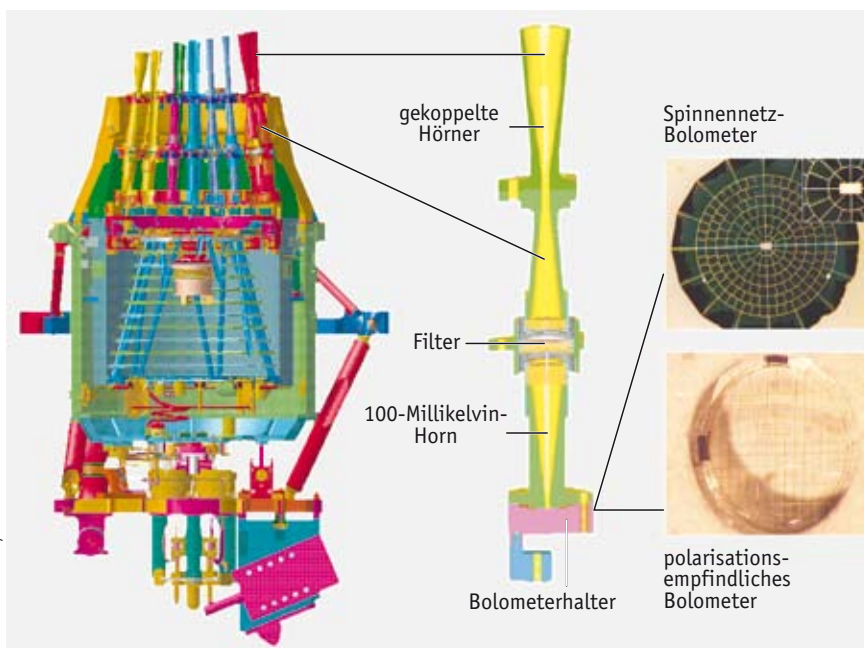
und niedrigem Rauschen auf, die speziell für dieses Projekt entwickelt wurden.

Kein arbeitendes Instrument ähnelt dem HFI, für das neue Bauteile, neue Grundlagen und eine vollkommen neue Architektur entwickelt wurden. Die Leistung des HFI, wie sie jetzt im Labor gemessen wurde, trifft die optimistischsten Erwartungen. Dies bedeutet auch, dass die Messgenauigkeit im Weltraum vor allem durch die Informationsmenge bestimmt sein wird, die in der Strahlung selbst enthalten ist.

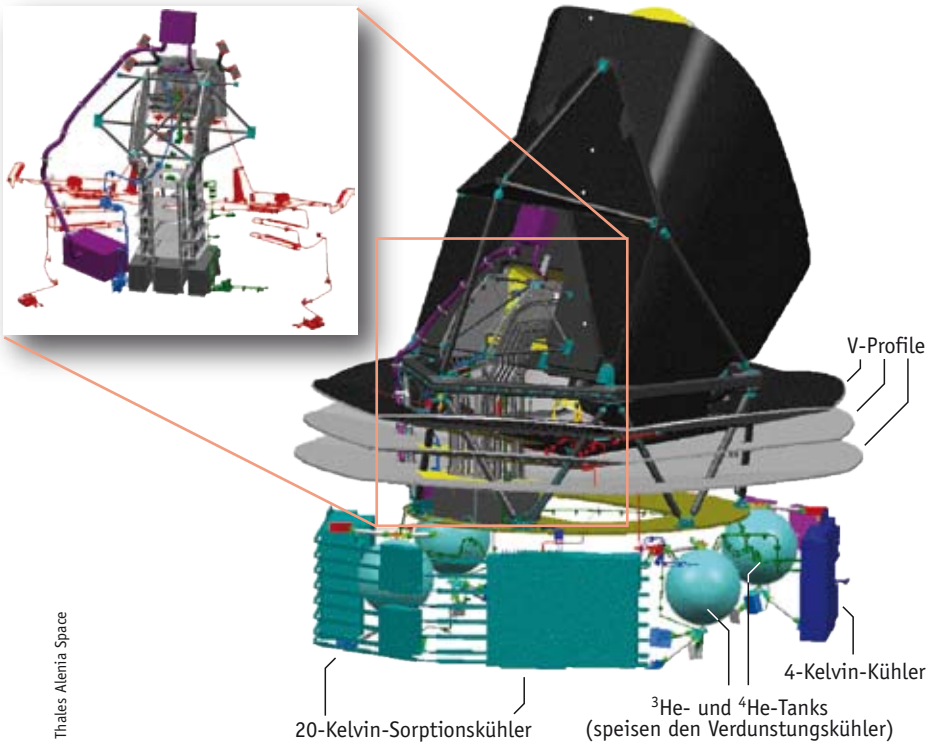
■ **Das Kühlsystem:** Eine enorme Herausforderung für PLANCK war die komplexe thermische Gestaltung, die für den Betrieb der beiden Instrumente nötig ist: Die LFI-Radiometer sind für eine Betriebstemperatur von 20 Kelvin optimiert, und die HFI-Bolometer benötigen eine noch anspruchsvollere Kühlung auf 0,1 Kelvin.

So hohe kryogene Leistung gab es im Weltraum bisher noch nie. Sie wird dadurch erreicht, dass PLANCK effiziente passive Kühlung mit einer aktiven, dreistufigen Kühlerkette kombiniert. Die Raumsonde enthält drei thermische Abschirmungen (»V-Profile«), welche die warme Versorgungseinheit bei 300 Kelvin vom kalten Teleskop und der Instrumentenbucht trennen, die immer im Dunklen gehalten wird. Thermische Tests am kryogenen Modell von PLANCK haben gezeigt, dass die Temperatur in der Instrumentenbucht unter 50 Kelvin liegen wird. Die aktive Kette setzt die Kühlung bis zu den extremen Werten fort, die von den Detektoren benötigt werden. Es werden drei verschiedene aktive Kühler verwendet, die als ein einziges, integriertes System arbeiten: Ein Wasserstoff-Sorptionskühler, der 20 Kelvin für das LFI und 18 Kelvin für das HFI bereitstellt, ein Joule-Thomson Kühler, der 4 Kelvin für das HFI und die Referenzquellen des LFI liefert, und ein Heliumverdünnungskühler mit offenem Kreislauf, der in einer letzten Stufe 0,1 Kelvin für die HFI-Bolometer liefert.

Vibrationen der aktiven Kühler stellen eine möglicherweise kritische Quelle un-



◀ Abb. 16: Links – Dieser Schnitt durch das Kühlsystem und die Detektoranordnung des HFI zeigt die verschiedenen thermischen Komponenten der »russischen Puppe«. Mitte – schematischer Querschnitt durch eine Detektoreinheit; oben die auf 4 K gekühlte Eingangs-Hornantenne; die Strahlung passiert die Filter (bei 1,6 K) und erreicht das Bolometer (0,1 K). Rechts ein Spinnennetz-Bolometer und zwei polarisationsempfindliche Bolometer.



Thales Alenia Space

▲ Abb. 17: Dieses Modell zeigt, wie sehr das Kühlsystem die gesamte Architektur des Satelliten bestimmt. Die drei V-Profile besorgen eine passive Kühlung auf 50 Kelvin, mit den Sorptionskühlern werden 18 bis 20 Kelvin, mit dem Joule-Thomson-Kühler werden 4 Kelvin erreicht. Die ^3He - und ^4He -Tanks dienen zur Kühlung der Bolometer auf 0,1 Kelvin. Das Inset zeigt die Leitungen zum Transport der Kühlflüssigkeiten zur Fokalebene.

gewollter Effekte dar. Deswegen wurde die 18-20-Kelvin-Stufe durch einen neu entwickelten Wasserstoff-Sorptionskühler mit geschlossenem Kreislauf erreicht, der keine mechanisch beweglichen Teile enthält. Der Kühler arbeitet mit einem thermischen Kreislauf durch sechs Kompressoren, die mit Metallhydrid gefüllt sind. Je nach seiner Temperatur absorbiert dieses Material Wasserstoff oder gibt ihn wieder frei. Der Wasserstoff ist die Arbeitsflüssigkeit in einem Joule-Thomson-Kühler. Zu jedem Zeitpunkt ist einer der Kompressoren warm und gibt Wasserstoffgas unter hohem Druck frei, ein Kompressor kühlt herunter, einer erwärmt sich, und drei sind kalt und absorbieren das Gas. Ein zusätzliches Sorptionsbett dient dazu, Druckschwankungen im Niederdruckgas auszugleichen. Diese Betriebsart gewährleistet, dass keine Vibrationen an die Detektoren weitergegeben werden, was eine einmalige Eigenschaft dieser Art von Kühler ist.

Die 4-Kelvin-Stufe besteht aus einem Joule-Thomson-Kühler, der durch mechanische Kompressoren getrieben wird, die vom Sorptionskühler auf 18 Kelvin

vorgekühlt werden. Diese Kompressoren sind in einer »Kopf an Kopf«-Anordnung aufgebaut, die den Impuls kompensiert. Vibrationen werden durch aktive elektronische Kompensation der Kompressorstöße weiter verringert. Die vibrationsfreie 0,1-Kelvin-Stufe schließlich benutzt ein neues Verdünnungsprinzip, das auf Reibung basiert und zum Betrieb die Schwerkraft nicht braucht – erst dadurch wird es für Anwendungen im Weltraum einsetzbar.

Nicht allein die erreichten tiefen Temperaturen, sondern auch deren Stabilität ist für den Erfolg von PLANCK unverzichtbar. Passive Kontrollelemente für die Dämpfung und aktive für die Temperatur gewährleisten, dass die Temperaturschwankungen der verschiedenen Stufen nicht das innere Rauschniveau der Detektoren verschlechtern. Einige Zahlen illustrieren die thermischen Herausforderungen, denen sich das Team der Instrumentenentwickler stellen musste: Die Versorgungseinheit der Raumsonde verbraucht etwa 1800 Watt, während die Detektoren auf 10^{-17} Watt empfindlich sind (also zehn Milliardstel eines Milliardstels eines Watts!) und Spannungen im Bereich einiger Nanovolt messen. PLANCKs Empfänger nehmen alle Arten von Energie wahr, elektrische, thermische oder mechanische. Das bedeutet, dass alle Arten störender Energiequellen um das 10^{20} -fache unterdrückt werden müssen, was eine extreme Kombination von Wissen, Erfahrung, Kreativität bei der Gestaltung, Simulationen und experimentellen Überprüfungen erfordert! □

(Deutsche Fassung: Matthias Bartelmann)

Interessante Weblinks zur PLANCK-Mission stehen bei www.suw-online.de/artikel/936596.

Bei uns sind Sie umfassend und aktuell informiert. Der Internetservice für Astronomie und Raumfahrt.