

## SCHALL AUS DEM FRÜHEN UNIVERSUM

MATTHIAS BARTELMANN  
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ASTROPHYSIK, GARCHING

*Physikalische Blätter 55/9, 5 (2000)*

Der Urknall-Theorie zufolge entstand das Universum in einem sehr heißen und dichten Zustand, expandierte und kühlte sich ab. Etwa 300000 Jahre später war es kühl genug geworden, dass das anfängliche Plasma zu Atomen rekombinieren konnte. Photonen konnten sich von da an fast ungehindert ausbreiten, wurden aber wegen der kosmischen Expansion rotverschoben. Heute bilden sie einen fast vollständig isotropen Strahlungshintergrund, der ein Planck-Spektrum mit einer Temperatur von 2,726 K aufweist. Das Maximum dieser Planck-Kurve liegt im Mikrowellenbereich bei einer Frequenz von 283 GHz, weshalb man vom kosmischen Mikrowellenhintergrund (*Cosmic Microwave Background*, CMB) spricht.

Die Photonen des CMB tragen Informationen über die frühe Jugend des Universums mit sich. Die gängige Theorie der Strukturentstehung im Universum besagt, dass sie sehr früh durch Quantenfluktuationen angelegt, dann durch eine Phase exponentieller Ausdehnung, der sog. Inflation, vergrößert wurden und anschließend durch gravitative Instabilität anwuchsen. Der CMB sollte demnach nicht perfekt isotrop sein, sondern Strukturen mit Amplituden von einigen  $10\mu\text{K}$  aufweisen, die die Saatfluktuationen der heutigen Strukturen widerspiegeln. Obwohl der CMB 1965 entdeckt worden war, gelang es erst 1992 mit dem COBE-Satelliten, die Fluktuationen nachzuweisen. COBE konnte nur Strukturen sehen, die mindestens sieben Grad groß waren, 14-mal größer als der Vollmond. Das Hauptinteresse der Kosmologie richtet sich aber auf wesentlich kleinere Strukturen.

Wenn man die Temperaturschwankungen des CMB am Himmel in Kugelflächenfunktionen entwickelt, kann man ihre Amplitude als Funktion der Multipolordnung in Form eines Leistungsspektrums darstellen. Die inflationäre Theorie sagt für dieses Leistungsspektrum einen ganz charakteristischen Verlauf vorher, der durch drei verschiedene physikalische Mechanismen bestimmt wird.

Große Strukturen mit einem Durchmesser von mehr als etwa einem Grad wurden allein dadurch erzeugt, dass Photonen beim Verlassen der Saatfluktuationen Energie verloren oder gewannen. Die Wechselwirkung zwischen Druck und Gravitation regte akustische Schwingungen an, die kleinere Strukturen im CMB erzeugten und damit zu charakteristischen Maxima und Minima im Leistungsspektrum des CMB führten. Der Schallhorizont ist dabei durch die Strecke bestimmt, die ein Schallsignal in den 300000 Jahren zwischen dem Urknall und der Freisetzung des CMB zurücklegen konnte. Die Diffusion der CMB-Photonen schließlich dämpfte die akustischen Schwingungen und löschte Strukturen auf Winkelskalen von weniger als einigen Bogenminuten aus.

Das Leistungsspektrum des CMB ist deswegen sehr interessant, weil sich aus den Positionen und Amplituden seiner akustischen Schwingungen zurückgehenden Maxima und Minima zahlreiche kosmologische Parameter mit großer Genauigkeit bestimmen lassen werden, zum Beispiel die gesamte kosmische Materiedichte, die kosmologische Konstante, die Dichte baryonischer Materie, die Expansionsrate des Universums und etliche mehr.



ABBILDUNG 1.—BOOMERanG vor dem Start nahe des Mt. Erebus.

Das internationale CMB-Experiment BOOMERanG konnte vor kurzem über einen spektakulären Erfolg dieser Bemühung berichten [P. de Bernardis et al., *Nature* **404**, 955 (2000)]. Etwa zehn Tage lang trug ein Ballon Bolometer-Instrumente in 35 km Höhe um den Südpol, die den CMB in den vier Frequenzen 90, 150, 240 und 400 GHz in einem Gebiet von einigen hundert Quadratgrad beobachteten. Die jetzt veröffentlichten Himmelskarten (siehe Abbildung 2) sind von bestechender Qualität: Die Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen bei 90, 150 und 240 GHz ist exzellent. Die 400-GHz-Karte wird im wesentlichen durch Mikrowellenemission des Staubes in der Milchstraße dominiert. Hier stimmen die BOOMERanG-Ergebnisse mit früheren Messungen der Satelliten COBE und IRAS ausgezeichnet überein.

Bisher wurde das Leistungsspektrum aus einem Ausschnitt der 150-GHz-Karte bestimmt, dessen Fläche einem Prozent des gesamten Himmels entspricht. Hierzu wird die Strahlungsleistung gemessen und so in eine Temperatur umgerechnet, dass ein schwarzer Strahler dieser Temperatur bei der gegebenen Frequenz die gemessene Strahlungsleistung hätte. Es zeigt das erste akustische Maximum bei einer Multipolordnung von etwa 200, woraus sich für den Schallhorizont eine Winkelgröße von etwa einem Grad ergibt. Die Größe des Schallhorizonts wiederum hängt fast ausschließlich von der Krümmung des Universums ab und damit von seiner gesamten Energiedichte. Die BOOMERanG-Ergebnisse legen nahe, dass die gesamte Energiedichte gerade so groß ist, dass das Universum räumlich flach wird.

Für Überraschung könnte ein weiteres Ergebnis des BOOMERanG-Experiments sorgen, wenn es bestehen bleibt: Das Leistungsspektrum hat an der Stelle des zweiten akustischen Maximums bei weitem nicht die erwartete Amplitude. Das könnte etwa darauf hindeuten, dass die Dichte baryonischer Mate-

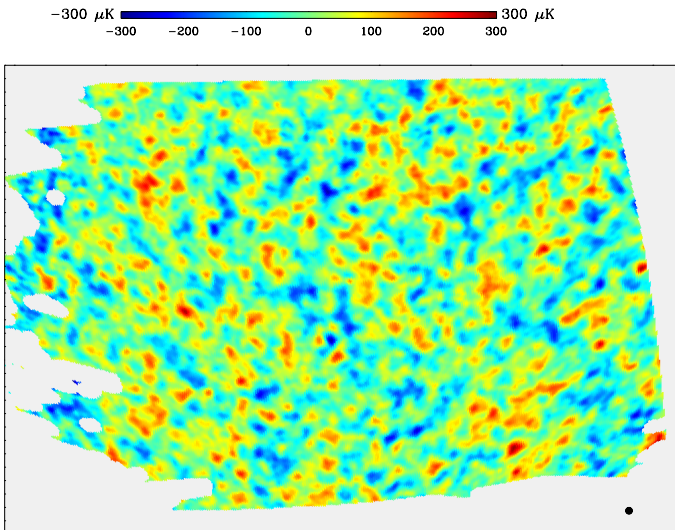


ABBILDUNG 2.—Das BOOMERanG-Experiment hat erstmals Temperaturschwankungen in der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung von wenigen Mikrokkelvin nachgewiesen. Diese sind eng mit der Entstehung von großräumigen Strukturen verknüpft. Der gezeigte Ausschnitt entspricht einer Fläche von etwa 1800 Quadratgrad, der schwarze Punkt unten rechts dem Durchmesser einer Gaußfunktion, mit der die Karte geglättet wurde, nämlich 10 Bogenminuten. Zum Vergleich: Der Vollmond hat 30 Bogenminuten Durchmesser.

rie höher ist als bisher angenommen, oder dass die kosmologische Konstante kleiner ist, als andere Beobachtungen dies nahelegen. Gegenwärtig sind die Ergebnisse allerdings noch zu unsicher für eine definitive Schlussfolgerung. Die bisherige Analyse der BOOMERanG-Daten zeigt aber, dass die detaillierten CMB-Beobachtungen die Kosmologie endgültig auf solide experimentelle Grundlagen stellen werden.