

der Bose- oder Fermi-Statistik der Atome und deren Massen abhängen sollten. Damit könnten die schon lang existierenden Arbeiten von Thomas und Efimov die Physik der Wenigteilchen-Systeme für neue Experimente mit kalten Gasen erschließen.

THORSTEN KÖHLER

- [1] *L. H. Thomas*, Phys. Rev. **47**, 903 (1935)
- [2] *V. Efimov*, Phys. Lett. **33B**, 563 (1970)
- [3] *J. Hecker-Denschlag, H.-C. Nägerl* und *R. Grimm*, Physik Journal, März 2004, S. 33
- [4] *T. Kraemer, M. Mark, P. Waldburger, J. G. Danzl, C. Chin, B. Engesser, A. D. Lange, K. Pilch, A. Jaakkola, H.-C. Nägerl* und *R. Grimm*, Nature **440**, 315 (2006)
- [5] *E. Nielsen* und *J. H. Macek*, Phys. Rev. Lett. **83**, 1566 (1999)
- [6] *B. D. Esry, C. H. Greene* und *J. P. Burke*, Phys. Rev. Lett. **83**, 1751 (1999)
- [7] *E. Braaten* und *H. W. Hammer*, cond-mat/0410417
- [8] *M. Stoll* und *T. Köhler*, Phys. Rev. **A 72**, 022714 (2005)

Präzision dank Polarisierung

Die präzisen Daten des WMAP-Satelliten zur Polarisierung der Hintergrundstrahlung ermöglichen neue Einsichten in die Entwicklung des Universums und die Strukturentstehung darin.

Das heutige Universum ist erfüllt von der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMB) [1], deren Temperatur sich durch die Expansion des Raumes im Laufe der Zeit auf 2,7 K verringert hat. Als das Photonengas aber noch 3000 K und heißer war, bildete es mit den Elektronen und Wasserstoffkernen ein sehr homogenes Plasma, dessen kleine Dichteschwankungen aus der Inflationsphase des Universums unmittelbar nach dem Urknall herrührten. Während nun die Wasserstoffkerne aufgrund der Gravitation von dichteren Regionen angezogen wurden, arbeiteten die Photonen mit ihrem Druck der Gravitation entgegen. Dies führte zu akustischen Schwingungen, die sich mit halber Lichtgeschwindigkeit ausbreiteten. In Gebieten, die durch die Schwingungen dichter waren, erhöhte sich die Temperatur des Photonengases leicht, in weniger dichten Gebieten war es ein wenig kälter. Mit der weiteren Abkühlung der Photonen rekombinierten die Elektronen und Protonen zu Wasserstoff, sodass das Universum durchsichtig wurde.

Dadurch wurden die Schwingungen und somit die geringen Temperaturunterschiede gleichsam konserviert. Da sich aus den anfänglichen (primordialen) Dichteschwankungen die heute sichtbaren Strukturen wie Galaxien oder Galaxienhaufen entwickelt haben, erlauben die Temperaturunterschiede wichtige Rückschlüsse auf die Strukturentstehung im Universum.

Mit geeigneten Detektoren werden diese leicht unterschiedlichen Temperaturen beim Blick in verschiedene Himmelsrichtungen sichtbar. Aus dem im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie berechneten Verhalten des Plasmas und des Photonengases sowie der gemessenen Verteilung der „kalten“ und „heißen“ Gebiete am heutigen Himmel lassen sich Rückschlüsse auf wichtige kosmologische Parameter ziehen. Dabei kann man zwar nicht vorhersagen, welcher Punkt am Himmel kalt oder heiß ist, wohl aber, wie kalte und heiße Punkte am Himmel in Abhängigkeit vom Winkel zwischen ihnen korreliert sind. Beispielsweise gibt es ein erstes Maximum in der Winkelkorrelation bei ungefähr einem Grad. Da dieser Winkel von den kosmologischen Parametern abhängt, zeigt der gemessene Wert u. a., dass das Universum annähernd räumlich flach ist.

Dem 1989 gestarteten COBE-Satelliten gelang es erstmals, die Temperaturfluktuationen des CMB zu bestimmen. Da seine Winkel-

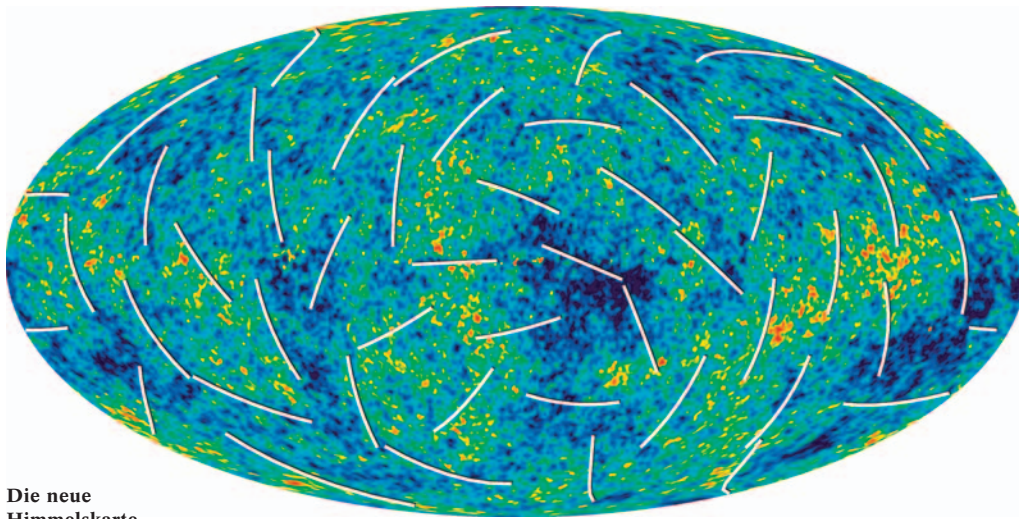
auflösung recht beschränkt war, konnte er mehr oder weniger nur die Amplitude der Dichteschwankungen, nicht aber die Form der Winkelkorrelationsfunktion bestimmen. In den Folgejahren ermöglichten es erd- und ballongebundene

Temperaturschwankungen, ist also per se schwieriger zu messen. Daher waren auch die Analyse und insbesondere die Extraktion des eigentlichen Signals aus dem von „Verschmutzungen“ im Vordergrund dominierten Messsignal sehr

existiert, lässt sich damit auch der Hubble-Parameter H_0 zu 74 ± 3 km/(s Mpc) bestimmen. Umgekehrt folgt aus der Annahme, dass H_0 größer als 40 km/(s Mpc) ist – worauf alle bisherigen Messungen beispielsweise des Hubble Space Telescopes hindeuten – damit bereits aus den WMAP-Daten allein, dass eine Form von dunkler Energie existieren muss. Über deren Natur lässt sich jedoch noch immer wenig sagen. Die von Einstein eingeführte und einer räumlich und zeitlich konstanten Energiedichte entsprechenden kosmologische Konstante beschreibt die Daten exzellent. Kompliziertere Modelle der dunklen Energie, wie zum Beispiel Quintessenz [4], verbessern die Güte der Vorhersagen nicht weiter.

Das Warten auf die neuen Ergebnisse hat sich gelohnt, denn die Fortschritte in der Bestimmung der kosmologischen Parameter sind deutlich. Bislang fügen sich sämtliche Ergebnisse in das kosmologische „Standardmodell“ mit einer kosmologischen Konstante ein. Aber die Vorhersagen zur Struktur im Universum, die sich aus WMAP ergeben, lassen sich durch andere Beobachtungen, zum Beispiel durch den Gravitationslinseneffekt, immer besser prüfen, sodass mögliche Abweichungen von diesem Modell künftig sichtbar werden könnten. Und WMAP sammelt bis zum Jahr 2009 fleißig weiter Daten. Bis dahin werden auch die ersten Ergebnisse des Planck-Satelliten der ESA erwartet. Mit seiner größeren Empfindlichkeit und aufgrund seiner Beobachtungsfrequenzen wird Planck beispielsweise einen direkten Test der Strukturentstehung ermöglichen.

MICHAEL DORAN



Die neue Himmelskarte der WMAP-Mission zeigt neben den Temperaturschwankungen des Mikrowellenhintergrunds (rot: „warm“, blau: „kalt“) erstmals die Polarisation der Strahlung (weiße Striche). (Quelle: NASA/WMAP)

Missionen mit besserer Auflösung, die Form des Spektrums zumindest grob festzulegen. Aber erst die BOOMERANG-Mission wies 2001 schließlich ein Spektrum nach, das mehr als das erste Maximum enthielt. Damit war in Übereinstimmung mit einer Vorhersage der Inflation [2] gezeigt, dass das Spektrum der anfänglichen Fluktuationen praktisch nicht von der Winkelskala abhängt. Außerdem ließ sich das erste Maximum genau genug bestimmen, um die räumliche Krümmung des Universums auf ungefähr 10 % einzuschränken. Zwei Jahre später, im Februar 2003, präsentierte die WMAP-Kollaboration (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) die ersten Daten nach einem Jahr Messzeit. Beispielsweise war die mit einer Genauigkeit von 5 % gemessene Häufigkeit der Baryonen im Universum im Einklang mit den Vorhersagen der Nukleosynthese.

Mitte März präsentierte WMAP nun erstmals präzise Daten zur Polarisation des kosmischen Hintergrunds [3]. Diese Polarisation der CMB-Photonen entsteht durch die Streuung an freien Elektronen im Plasma, aber auch im späteren Universum. Dabei erzeugen skalare Fluktuationen wie Dichteschwankungen eine andere Polarisation („E-Typ“) als die Gravitationswellen der Inflation („B-Typ“). Die veröffentlichte Polarisation des E-Typs beträgt nur etwa 10 % der

aufwändig. Aus dem Polarisations-signal lässt sich die sog. optische Tiefe berechnen ($0,1 \pm 0,03$). Diese beschreibt gewissermaßen den Schleier, den die Photonen auf dem Weg zu uns durchqueren müssen. Mit der Kenntnis der optischen Tiefe ist es möglich, aus den präzise gemessenen CMB-Fluktuationen auf die Amplitude der primordialen Fluktuationen aus der Inflation zu schließen und damit wichtige Aussagen über die Strukturentstehung zu erhalten.

Damit lassen sich z. B. die Schwankungen σ_8 der Galaxienhäufigkeit auf Skalen von 8 Mpc (eine gut beobachtbare und gleichzeitig gut theoretisch behandelbare Skala) viel genauer vorhersagen oder der sog. Spektralindex n_s der Fluktuationen bestimmen. Dieser Index ist genau eins, wenn die Fluktuationen skaleninvariant sind. Die Inflationsszenarien sagen in der Regel einen Index nahe bei, aber etwas kleiner als eins vorher. Während die Daten von 2003 noch $n_s = 0,99 \pm 0,04$ ergaben, ist der aktuelle Wert mit $0,95 \pm 0,017$ weitaus präziser und erlaubt es, einige Inflationsmodelle auszuschließen. Auch die Materiedichte $\Omega_m h^2$ ist nun durch die genaueren Daten des dritten Maximums im CMB-Spektrum auf nunmehr $0,127 + 0,007 - 0,0128$ präziser bekannt. Unter der Annahme, dass das Universum räumlich flach ist und eine kosmologische Konstante

Priv.-Doz. Dr. Michael Doran, Institut für Theoretische Physik, Philosophenweg 16, 69120 Heidelberg

- [1] s. M. Bartelmann, Physik Journal, Dezember 2002, S. 18
- [2] M. Bartelmann, Phys. Blätter, September 2001, S. 41; V. Mukhanov, Physical Foundations of Cosmology, Cambridge University Press (2005)
- [3] <http://lambda.gsfc.nasa.gov/>, D. N. Spergel et al., astro-ph/0603449
- [4] Ch. Wetterich, Physik Journal, Dezember 2004, S. 43