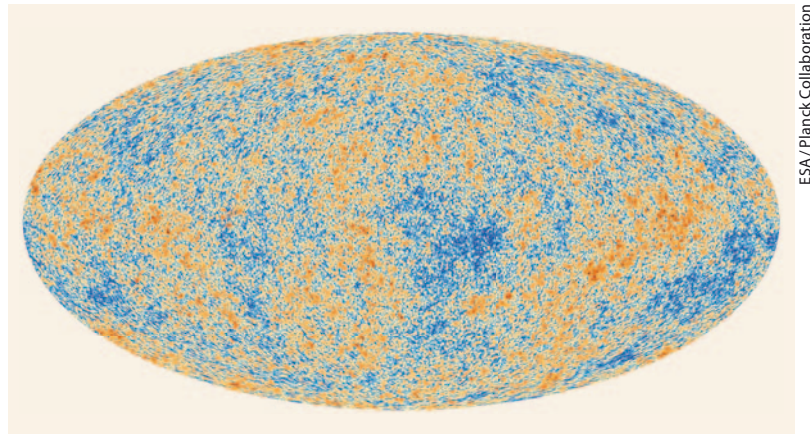


■ Plancks rätselhafter Hintergrund

Ergebnisse der europäischen Satellitenmission festigen das Standardmodell der Kosmologie, korrigieren jedoch einige seiner Parameter und zeigen rätselhafte Anomalien.

Die kosmische Mikrowellenstrahlung ist ein Relikt des heißen, frühen Universums, eine Momentaufnahme des Universums zum Zeitpunkt der Entstehung der ersten Atome. Bei grober Betrachtung sehen wir eine Schwarzkörperstrahlung mit einer Temperatur von 2,7 K. Bei feinerer Beobachtung variiert die Temperatur des Universums als Funktion der betrachteten Richtung um bis zu einigen 100 μK . Eine detaillierte Vermessung dieser Fluktuationen liefert uns Informationen zur Entwicklung, Zusammensetzung und Struktur des Universums [1].

Der Cosmic Background Explorer COBE der NASA entdeckte die winzigen Temperaturschwankungen des Universums 1992. Kurz danach entstanden sowohl in den USA als auch in Europa Pläne für wesentlich genauere Himmelsbeobachtungen. Während sich die NASA mit der Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) für eine schnell durchzuführende, kleinere Mission entschied – im Januar 2013 wurde sie mit der Veröffentlichung aller Daten aus neun Jahren Beobachtung abgeschlossen –, setzte die europäische Weltraumorganisation ESA auf die aufwändige und ambitionierte Planck-Mission. Der Satellit war



ESA / Planck Collaboration

Abb. 1 Temperaturschwankungen der kosmischen Mikrowellenstrahlung. Die Farbcodierung der Ganzhimmelskarte umfasst den Bereich von +500 (rot) bis $-500 \mu\text{K}$ (blau) um den Mittelwert von 2,725 Kelvin.

am 14. Mai 2009 zusammen mit dem Weltraumteleskop Herschel gestartet und hatte im August 2009 seine regulären Beobachtungen aufgenommen.

Planck vermisst den Himmel in neun Frequenzbändern zwischen 25 und 1000 GHz mit einer Winkelauflösung zwischen dreißig und fünf Bogenminuten. Die neun Himmelskarten dienen dazu, die verschiedenen Vordergrundkomponenten wie galaktische Synchrotronstrahlung, CO-Emissionslinien etc. sowie Galaxienhaufen und extragalaktische Punktquellen zu identifizieren. Dazu hatten die Planck-Wissenschaftler bereits 2011 und 2012 in einem „early“ und

„intermediate release“ Ergebnisse publiziert [3], die notwendig sind, um den kosmischen Mikrowellenhintergrund zu enthüllen. Am 21. März 2013 erschien nun die erste kosmologische Analyse der Planck-Beobachtungen, die auf den Daten der ersten 15,5 Monate basiert, entsprechend etwas mehr als zwei vollständigen Himmelsabdeckungen („surveys“) (Abb. 1) [2].

Das erstaunlichste Ergebnis von Planck ist, dass das Standardmodell der Kosmologie die Beobachtungen auf kleinen Winkelskalen hervorragend gut beschreibt (Abb. 2). Dieses Modell geht von der Existenz dunkler Materie und dunkler Energie sowie einer Epoche kosmischer Inflation aus. Die Idee kosmischer Inflation postuliert, das Universum habe im ersten Augenblick seiner Entstehung beschleunigt expandiert und dadurch sein Volumen in kürzester Zeit auf das mindestens e^{150} -fache aufgebläht [4].

Das Standardmodell ist erstaunlich einfach und kommt mit nur sechs freien Parametern aus: Anteile von Baryonen (Ω_B) und dunkler Materie (Ω_{DM}) im Universum, Hubblesche Expansionsrate H_0 , Amplitude A und spektraler Index n der Dichtefluktuationen sowie die optische Dichte τ als Maß für die Opazität des Universums. Der Anteil dunkler Energie Ω_Λ folgt aus $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_{DM} - \Omega_B$. Um das Stan-

KURZGEFASST

■ Überschuss durch Dunkle Materie?

Seit Mai 2011 detektiert das Alpha Magnetic Spectrometer AMS an Bord der Internationalen Raumstation kosmische Positronen mit Energien von 0,5 bis 350 GeV. Die ersten Ergebnisse bestätigen mit zuvor unerreichter Statistik den bereits bekannten Positronen-Überschuss bei höheren Energien, zeigen ein Spektrum ohne Feinstruktur und keinerlei Anisotropie. Allerdings ist es noch zu früh für eine Antwort auf die Frage, ob der Überschuss durch die Anihilation von Teilchen der dunklen Materie zustande kommt. Die geplante Messzeit beträgt zehn Jahre.

M. Aguilar et al. (AMS Coll.), Phys. Rev. Lett. **110**, 141102 (2013)

■ Quantenkryptographie „on air“

Wissenschaftlern der LMU München und des DLR ist es erstmals gelungen, einen Quantenschlüssel mit einem sich schnell bewegenden Objekt zu übertragen. Ein eigens zu diesem Zweck entwickelter Laser sendete schwache Laserpulse, in denen die Quanteneigenschaften einzelner Photonen erhalten bleiben, von einem Flugzeug zu einer Bodenstation. Die eingesetzte Optik blieb dabei auf ein Tausendstel Grad genau auf den Empfänger ausgerichtet – das ist vergleichbar mit Anforderungen für Anwendungen via Kommunikationssatelliten.

S. Nauerth et al., Nat. Photon., doi:10.1038/nphoton.2013.46

dardmodell mit den Planck-Daten zu vergleichen, zerlegt man die Himmelskarte in Multipolmomente und stellt deren Amplituden theoretischen Vorhersagen gegenüber. Alle Versuche, durch Hinzunahme neuer freier Parameter, zum Beispiel Neutrinomassen, eine signifikant noch bessere Übereinstimmung von Daten und Modell zu erreichen, schlugen fehl.

Die neuen Planck-Daten haben die Werte der sechs Parameter des Standardmodells signifikant verschoben. So scheint das Universum älter zu sein als bislang gedacht, da die Expansionsrate $H_0 = 67,3 \pm 1,2 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ nun deutlich kleiner ist, als der durch Beobachtungen naher Supernovae erhaltene Wert. Der Anteil sichtbarer und dunkler Materie im Universum ist in der Vergangenheit unterschätzt und jetzt auf 4,9 % bzw. 26,8 % korrigiert worden, der Anteil dunkler Energie ist entsprechend auf 68,3 % gesunken.

Nach der Theorie der kosmischen Inflation entstehen aus Quantenfluktuationen im frühen Universum kleine Schwankungen der Energiedichte – die heutigen Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund [4]. Sie lassen sich durch ihr Leistungsspektrum (die Fourier-Transformierte der Autokorrelationsfunktion) als Potenzgesetz schreiben: $P(k) = A k^{n-1}$. Für $n = 1$ ist die Leistung für alle Wellenzahlen k gleich. Dieses skaleninvariante Verhalten aus den 1970er Jahren war rein empirisch motiviert. Eine der zentralen Vorhersagen kosmischer Inflation ist eine kleine Verletzung der Skaleninvarianz [5]. Planck konnte diese nun zum ersten Mal messen: $(n - 1) = -0,0365 \pm 0,0094$.

Die Beobachtungen schließen zudem einige Modelle kosmologischer Inflation aus. Am besten schlägt sich das Modell der R^2 -Inflation (R steht für den Krümmungs-Skalar) aus dem Jahr 1979 [5], welches das Singularitätenproblem des „Hot Big Bang“-Modells umgeht. R^2 -Inflation ist praktisch nicht von Higgs-Inflation [6] zu unterscheiden, bei der das Higgs-

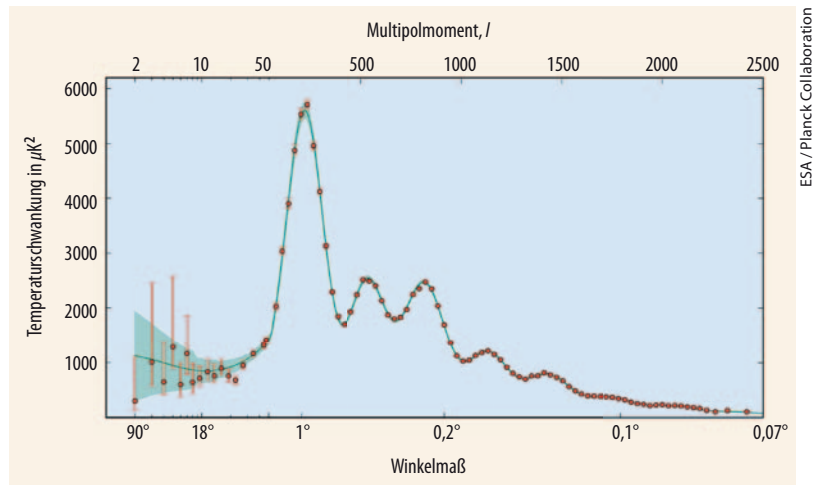


Abb. 2 Die von Planck beobachteten Temperaturschwankungen (rote Punkte) bestätigen auf kleinen Skalen (kleiner als drei Grad) die theoretischen Vorhersagen sehr gut, bei 5° gibt es allerdings eine signifikante Diskrepanz. Die Anomalien bei noch größeren Skalen werden im hier gezeigten Winkelleistungsspektrum nur teilweise sichtbar.²⁾

Teilchen auch für die kosmische Inflation verantwortlich sein könnte.¹⁾

Die bislang beschriebenen Ergebnisse von Planck auf kleinen Winkelskalen von weniger als drei Grad stehen in Konflikt zum beobachteten Verhalten des kosmischen Mikrowellenhintergrunds bei großen Winkelskalen. Bereits in der Analyse der WMAP-Daten traten Ungereimtheiten auf [6, 7], vor allem ein Leistungsdefizit der großen Skalen, verglichen mit dem optimal angepassten Modell. Auffällig sind auch eine Korrelation der Orientierung von Quadrupol und Oktopol, eine Präferenz für Moden ungerader Parität, eine Asymmetrie zwischen nördlicher und südlicher ekliptischer Hemisphäre, um einige Beispiele zu nennen. Diese „WMAP-Anomalien“ hat Planck bestätigt. Durch die breitere Frequenzabdeckung von Planck ist es auch unwahrscheinlicher geworden, dass sie durch eine falsche Analyse des galaktischen Vordergrundes zu erklären sind. Die Ursachen der Anomalien bleiben rätselhaft. Ansätze für Erklärungen reichen von der Topologie des Universums, über unerwartete großräumige Verteilungen der Materie in der Umgebung unserer Galaxie, bis hin zu unbekanntem Vordergrundeffekten des Sonnensystems.

Planck hat bislang fünf Surveys mit beiden Instrumenten abgeschlossen. Seit dem 14. Januar 2012 beobachtet nur noch das passiv ge-

kühlte Low Frequency Instrument (LFI) den Himmel, da das für die Kühlung des High Frequency Instruments benötigte Helium aufgebraucht ist. Die LFI-Beobachtungen sollen insgesamt noch drei weitere Durchmusterungen liefern und im August 2013 enden. Auch steht die Veröffentlichung der Polarisationsmessungen von Planck noch aus. Diese könnten erste Hinweise auf einen durch kosmologische Inflation verursachten Gravitationswellenhintergrund liefern, die Geschichte der ersten UV-Strahler wie Sterne und Quasare im Universum offenbaren oder Hinweise zur Erklärung der Anomalien auf großen Skalen geben. Die Polarisationsdaten sollen gemeinsam mit den noch unveröffentlichten Surveys 2014 publiziert werden.

Dominik Schwarz

- [1] T. A. Enßlin, Physik Journal, Oktober 2006, S. 24
- [2] „Published Papers“ auf der Planck-Webseite: www.rssd.esa.int/planck
- [3] D. Schwarz, Physik Journal, Oktober 2011, S. 20
- [4] J. Niemeyer, Physik Journal, Oktober 2011, S. 27
- [5] V. F. Mukhanov und G. V. Chibisov, JETP Lett. **33**, 532 (1981)
- [6] A. A. Starobinsky, Phys. Lett. **B91**, 99 (1980)
- [7] F. L. Bezrukov und M. E. Shaposhnikov, Phys. Lett. **B659**, 703 (2008)
- [8] C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz und G. D. Starkman, Advances in Astronomy **2010**, 78 (2010)
- [9] C. L. Bennett et al., Astrophys. J. Suppl. **192**, 17 (2011)

1) Dabei koppelt der Higgs-Sektor des Standardmodells der Teilchenphysik nicht-minimal an die Schwerkraft.

2) Das Winkelleistungsspektrum ist eine Faltung des Leistungsspektrums $P(k)$ mit einer sog. Transferfunktion, die die zeitliche Entwicklung der Fluktuationen beschreibt.

Prof. Dr. Dominik Schwarz, Fakultät für Physik, Universität Bielefeld, Postfach 100131, 33501 Bielefeld