

Neues vom Urknall: Plancks Himmelskarte

Daten des Weltraumteleskops Planck liefern Forschern die bisher genaueste Karte der kosmischen Hintergrundstrahlung. Die Ergebnisse stimmen gut mit dem Standardmodell der Kosmologie überein, sorgen aber auch für Überraschungen.

VON GEORG WOLSCHIN

Trifft unsere heutige Vorstellung von der Entwicklung des Universums zu? Gespannt warteten die Kosmologen in den vergangenen Jahren auf die Ergebnisse der 2009 gestarteten Planck-Mission der Europäischen Weltraumorganisation ESA. Im März 2013 war es so weit: Planck lieferte neue Daten zur kosmischen Hintergrundstrahlung. Nun stehen die Wissenschaftler vor der anspruchsvollen Aufgabe, sie zu interpretieren.

Die Hintergrundstrahlung stammt aus der Zeit kurz nach dem Urknall und liefert das älteste Bild des Universums, das wir noch heute betrachten können. Damals, als das Weltall 380 000 Jahre

nach seiner Entstehung so weit abgekühlt war, dass sich Elektronen und Wasserstoffkerne zu neutralen Atomen vereinigten, trat ein neuartiges Phänomen auf: Die elektromagnetische Strahlung wurde nicht mehr unablässig von den geladenen Teilchen gestreut – insbesondere von den freien Elektronen –, sondern konnte sich erstmals relativ ungehindert ausbreiten.

Weil der Raum expandiert, vergrößerte sich die Wellenlänge dieser Strahlung bis heute um das 1000-Fache und liegt nun im Mikrowellenbereich. Dieses »Rauschen« des Urknalls, das praktisch gleichförmig aus allen Richtungen des Himmels zu kommen scheint,

fanden Arno Penzias und Robert Wilson bereits 1965 eher zufällig mit einem irdischen Mikrowellenempfänger. Sie registrierten zwar nur eine einzige Wellenlänge, doch das reichte bereits für einen Nobelpreis. In den 1990er Jahren maß der COBE-Satellit dann erstmals präzise das ganze Strahlungsspektrum. Dieses so genannte Planck-Spektrum – benannt nach Max Planck, der es 1900 erstmals theoretisch abgeleitet hatte – entsprach der Temperaturstrahlung eines auf 2,73 Kelvin (rund –270 Grad Celsius) abgekühlten Körpers.

Damals stellten die Kosmologen auch fest, dass die Hintergrundstrahlung leicht um den durch das Planck-

Spektrum gegebenen Mittelwert variierte. Zog man den Effekt ab, der aus der Bewegung der Erde relativ zum Strahlungshintergrund resultierte, betrug die Größe der Fluktuationen zwar lediglich wenige tausendstel Prozent. Doch rasch wurde ihre fundamentale Bedeutung klar: Die Temperaturschwankungen sind der »Fingerabdruck« der ursprünglichen Dichtefluktuationen im frühen Universum, welche im Zusammenspiel mit der Gravitation die Materie allmählich zu filamentartigen Strukturen kondensieren ließen. Hunderte Millionen Jahre nach dem Urknall waren diese in einigen Regionen so dicht, dass Druck und Temperatur für die Fusion von Atomkernen ausreichten und die ersten Sterne zündeten. Längs der Filamente bildeten sich dann nach und nach die Galaxien und Galaxienhaufen des jetzigen Universums.

Mehr noch als aus der Karte der Fluktuationen lernen die Kosmologen aus deren Spektrum. Dazu stellen sie die Temperaturschwankungen durch eine Multipolentwicklung dar (Grafik unten). Ein solcher Satz mathematischer Funktionen wird durch einen bestimmten Parameter charakterisiert. Je größer dieser so genannte Multipol, desto feinere Strukturen beschreibt die Entwicklung. Das Verfahren funktioniert analog der Fourier-Entwicklung, bei der Signale in ihre Frequenzen zerlegt werden.

Im Fluktuationsspektrum der Hintergrundstrahlung, so zeigte sich im Lauf der letzten zwei Jahrzehnte bei im-

mer genaueren Messungen mit Balloons, bodengebundenen Teleskopen und Satelliten, treten bei bestimmten Winkeln Maximalwerte auf. Sind zwei Regionen am Mikrowellenhimmel um einen solchen Winkel voneinander entfernt, unterscheiden sich ihre Temperaturen also besonders stark.

Ein flaches Weltall, etwas älter als gedacht

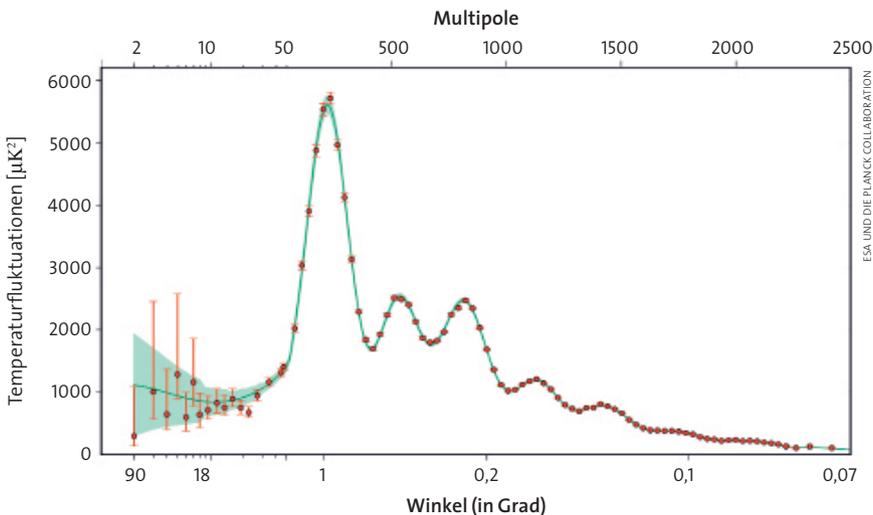
Der erste Maximalwert tritt bei einem Winkel von etwa 0,9 Grad auf, ein zweiter bei 0,3 Grad. Zum Vergleich: Der Vollmond durchmisst etwa 0,5 Grad am Himmel. Ursprung dieser Maxima sind Dichteschwingungen, die durch das frühe Universum wanderten – eine Art Schallwellen, die sich der Hintergrundstrahlung aufgeprägt haben. Die Abstände zwischen den Maxima entsprechen demzufolge einzelnen Frequenzen und ihren »Obertönen«.

Aus dem ersten Maximum lassen sich die so genannte Hubble-Konstante und daraus das Alter des Universums berechnen. Die Planck-Daten liefern den Wert von 13,82 Milliarden Jahren, ungefähr 80 Millionen Jahre mehr als bisher gedacht. Die Position des Maximums passt darüber hinaus sehr gut zu den Voraussagen für ein flaches Universum; der Raum ist also nur in der Umgebung von Massen gekrümmt, nicht aber auf großer Skala.

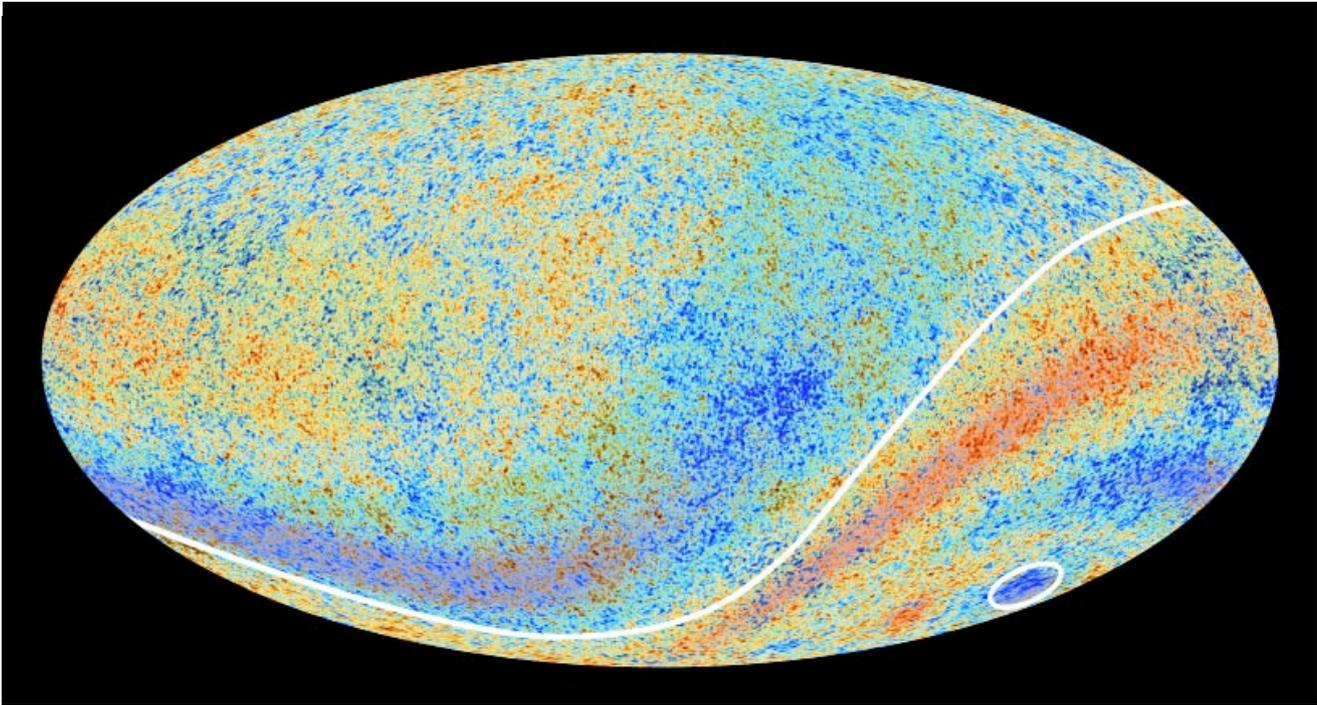
Die neue Mikrowellenkarte des Himmels ist etwa dreimal so gut aufgelöst wie die des 2010 außer Betrieb gegangenen Satelliten WMAP. Störende Strahlung aus der Milchstraße blenden die Instrumente sehr viel besser aus, und die Multipolentwicklung reicht etwa doppelt so weit – Fluktuationen lassen sich darum nun bis in kleinste Winkelbereiche darstellen. Auf ihrem Weg zur Präzisionswissenschaft, die den Vergleich mit der Teilchenphysik nicht mehr zu scheuen braucht, kommt die beobachtende Kosmologie also immer weiter voran.

In weiten Teilen stimmen die Planck-Ergebnisse sehr gut mit dem Standardmodell der Kosmologie überein. In diesem wird das frühe Universum, abgesehen von winzigen Quantenfluktuationen, als homogen und isotrop angenommen. Es sieht also immer gleich aus, egal in welcher Richtung man es betrachtet. Den Theoretikern zufolge behält der Kosmos diese Eigenschaften auch im Verlauf seiner Expansion und Abkühlung. Zumindest auf sehr großen Skalen; Galaxien gelten als lokale Inhomogenitäten, über die man getrost hinwegsehen darf.

Zunächst mag erstaunen, dass auch weit voneinander entfernte Regionen im Universum Hintergrundstrahlung der gleichen mittleren Temperatur ausstrahlen. Doch nach dem Urknall standen alle Raumbereiche für kurze Zeit in thermischem Kontakt miteinander. Dann aber trat das Universum in eine Phase, in der es sich mit vielfacher Lichtgeschwindigkeit exponentiell ausdehnte. Bei dieser so genannten Infla-



Aus den Planck-Daten erstellten Kosmologen dieses Spektrum der Temperaturschwankungen des Mikrowellenhintergrunds. Es reicht bis in kleinste Winkelabstände (große Multipole) und stimmt in diesem Bereich sehr gut mit den Voraussagen des kosmischen Standardmodells (grüne Kurve) überein. Nicht so bei großen Winkeln: Hier weichen die Messergebnisse (rote Punkte) teilweise deutlich von den erwarteten Werten ab.



tion entstanden aus winzigen Quantenfluktuationen makroskopische Dichteunterschiede, die später die Strukturen im Universum bildeten.

Einige der zahlreichen, aber widerstreitenden Theorien für die Inflationsphase lassen sich anhand der Planck-Daten nun ausschließen. Weiterhin offen ist indes die Frage, wie viele Neutrinofamilien es gibt. Üblicherweise geht man von der Existenz dreier unterschiedlicher Typen dieser extrem massearmen Elementarteilchen aus. Dafür wurden mit Experimenten am Beschleuniger LEP des Forschungszentrums CERN in Genf überzeugende Belege gefunden. Den Planck-Ergebnissen zufolge könnten es aber auch vier sein. Je mehr Teilchenfamilien es gibt, umso schneller verlief die nur etwa 10^{-32} Sekunden andauernde Inflationsphase.

An die Inflation schloss sich die Strukturbildung an. Laut Modellrechnungen erfordert dieser Vorgang, der sich über Jahrmilliarden hinweg erstreckte, nicht nur »baryonische« Materie, wie wir sie in Sternen und im interstellaren Gas finden, sondern vor allem auch »Dunkle« Materie: Die baryonische Materie fiel gewissermaßen in die von der Dunklen Materie gebildeten Potenzialmulden. Während die Natur dieser Substanz noch unbekannt ist,

Die Asymmetrie der Hintergrundstrahlung ist auf dieser Karte künstlich hervorgehoben: In der südlichen Hemisphäre (unterhalb der weißen Linie) sind die Temperaturen höher als in der Nordhälfte. Dafür liegt am Südhimmel ein großer »kalter Fleck« (Kreis).

hat man die indirekte Wirkung, die sie durch ihre Schwerkraft zum Beispiel auf die Bewegungen von Sternen in Galaxien hat, schon sehr genau untersucht. Den Anteil Dunkler Materie an der Energiedichte des Universums bestimmen die Planck-Messungen zu 26,8 Prozent; auf die baryonische Materie entfallen 4,9 Prozent. Vorher ging man von 22,7 und 4,5 Prozent aus.

Präzise Resultate

Die restlichen 68,3 Prozent der Energiedichte – bisher: 72,8 Prozent – entfallen den neuen Daten zufolge auf »Dunkle Energie«. Laut den Kosmologen ist sie dafür verantwortlich, dass unser Universum nicht nur expandiert, sondern dies seit weniger als fünf Milliarden Jahren auch beschleunigt tut. Nachgewiesen wurde das Phänomen durch verschiedene Messungen, etwa an fernen Supernovae. Der zu Grunde liegende physikalische Mechanismus ist allerdings völlig ungeklärt.

Die durch den Planck-Satelliten nötig gewordenen Korrekturen sind gering. Die Daten bestätigen im Wesentli-

chen den bisherigen Stand der experimentellen Kosmologie und verbessern deren Genauigkeit. Erkenntnisse erwachsen jedoch weniger aus der Bestätigung vorhandenen Wissens, sondern eher aus unerwarteten, manchmal zunächst fragwürdigen Ergebnissen. Auch hier haben die Daten einiges zu bieten. So sind die Fluktuationen der Hintergrundstrahlung im Bereich von Multipolen unterhalb vom Wert 50 recht ungleich über die Nord- und Südhälfte des Himmels verteilt. Dies widerspricht der grundlegenden Annahme räumlicher Homogenität und Isotropie ebenso wie ein bisher unerklärlicher »kalter Fleck« in der südlichen Hemisphäre (siehe Bild oben, Kreis), der vergleichsweise wenig Materie enthält.

Beide Phänomene tauchten zwar schon auf der WMAP-Karte auf. Damals hatten die Forscher aber große Zweifel an ihrem kosmologischen Ursprung; es hätte sich auch schlicht um Artefakte der Datenanalyse handeln können. Diese Zweifel lösen sich jetzt auf, was wiederum die Kosmologen in Zugzwang bringt, stichhaltige Erklärungsmodelle

Enttäuschende Bestätigung

Trotz enormen Aufwands keine »neue Physik«.

Die Medien suchen Sensationen. Als es vorübergehend so aussah, als hätten vom Forschungszentrum CERN ausgesandte Neutrinos auf ihrem Weg zum Gran-Sasso-Detektor bei Rom Überlichtgeschwindigkeit erreicht, da rauschte es gewaltig im Blätterwald – fast lauter als beim Nachweis des Higgs-Teilchens durch den Large Hadron Collider (LHC) bei CERN. Das eine hätte die etablierte Physik umgestoßen, das andere bestätigte bloß das Standardmodell der Teilchenphysik.

Auch die neue Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung durch das Planck-Weltraumteleskop verfeinert einstweilen nur das kosmologische Standardmodell (siehe nebenstehenden Artikel). Das Alter des Weltalls wird ein wenig nach oben korrigiert, und der Anteil der sichtbaren Materie im Universum ändert sich um ein paar Zehntelprozent. Der britischen Fachzeitschrift »Nature« war das immerhin eine redaktionelle Meldung wert. Das US-Wissenschaftsmagazin »Science« hat die Präzisionsmessungen der europäischen Raumsonde bisher völlig ignoriert.

Lohnt sich der ganze Aufwand überhaupt noch? Der größte Teilchenbeschleuniger der Welt bestätigt ein seit 30 Jahren vermutetes Teilchen, und ein tonnenschwerer Satellit liefert Daten, die unser Bild des Universums um ein paar Stellen hinter dem Komma schärfer stellen. Wird die Forschung vor unseren Augen zum Opfer eines Gesetzes der »diminishing returns«, droht ein wachsendes und demnächst untragbares Missverhältnis zwischen Aufwand und Ertrag?

Das Glas der wissenschaftlichen Erfolge ist zugleich halb leer und halb voll. Nicht nur die neugierige Öffentlichkeit, auch viele Naturforscher hätten es lieber gesehen, wenn im LHC außer dem Higgs auch Spuren supersymmetrischer Teilchen aufgetaucht wären – und wenn die Planck-Daten merkliche Indizien für das Wesen der Dunklen Materie geliefert hätten oder gar Hinweise auf die Dunkle Energie, welche die Expansion des Alls beschleunigen soll. Den Forschern bleibt die Genugtuung, dass ihre Standardmodelle immer exaktere Prüfungen bestehen.

Der amerikanische Wissenschaftsphilosoph Daniel Dennett hat den jeweils aktuellen Forschungsstand einmal mit einer gewaltigen Pyramide verglichen, die größtenteils unverändert dasteht. Nur an ihrer Spitze spielt sich etwas Neues ab – und dem widmet sich die gesamte öffentliche Aufmerksamkeit. Das Meiste, die voluminöse Basis des Wissens, ruht relativ unbeachtet in Lehrbüchern und wird nur in Fachvorlesungen vermittelt. Die öffentliche Wahrnehmung richtet sich ausschließlich auf die Spitzenforschung und fragt ungeduldig: Wissen wir bald, was vor dem Urknall war? Wann werden wir mit Gravitonen und Strings praktische Physik treiben können?

Tatsache ist, dass jede Antwort auf solche Fragen nur um einen hohen Preis zu haben sein wird. Viele Hypothesen der modernen Grundlagenphysik erfordern zu ihrer Prüfung Apparate, die an die Grenzen des auf der Erde überhaupt Erreichbaren gehen. Vielleicht wird es noch ein, zwei Generationen von irdischen Teilchenbeschleunigern geben, doch danach stoßen Energie- und Materialaufwand an prinzipielle Schranken. Jenseits dessen wird es zu einer Vermählung von Teilchenphysik und Kosmologie kommen, wie sie sich schon seit einiger Zeit abzeichnet. In immer feineren Vermessungen der Hintergrundstrahlung und anderer kosmischer Phänomene werden Forscher mit Raumsonden mühsam nach Indizien für hypothetische Teilchen suchen – und nach der lange ersehnten Vereinigung von Gravitation und Quantenphysik. Diese Suche geht so lange weiter, wie die menschliche Neugier nicht erlahmt.



Michael Springer

zu entwickeln. Allerdings ist die statistische Signifikanz der Anisotropien noch nicht groß genug, um grundlegende Änderungen im kosmologischen Modell zu rechtfertigen.

Auch an anderer Stelle eröffnen die Daten neue Horizonte. Das Fluktuationspektrum reicht von großen bis zu sehr kleinen Winkelabständen, wobei sieben Maximalwerte auftreten. Die Maxima bei großen Winkeln stimmen gut mit früheren Ballon- und Satelliten-Daten überein, die höheren Maxima zudem auch weitgehend mit Resultaten, die erdgebundene, auf einem anderen Beobachtungsprinzip beruhende Teleskope in Chile und am Südpol gewonnen haben.

Im Bereich großer Winkel unterscheiden sich die Planck-Daten allerdings deutlich von den Modellrechnungen. Obwohl die möglichen Messfehler sehr groß sind, vermuten manche Forscher eine physikalische Ursache hinter diesen Abweichungen. Vielleicht geben sie uns sogar Auskunft über die Topologie des Universums. Bereits vor einigen Jahren hat sich gezeigt, dass kosmologische Modelle mit einem geometrisch »flachen«, aber endlichen Raum – etwa das Drei-Torus-Modell (»Ist das Universum ein Torus?«, SdW 1/2009, S. 24) – die Daten auf großen Winkelskalen besser wiedergeben. Hat Planck also messbare Hinweise gefunden, dass unser Universum endlich sein könnte? Das wäre in der Tat ein unerwarteter Erfolg.

Im nächsten Jahr werden auch die Planck-Messungen zur Polarisation ausgewertet sein, also zu den bevorzugten Schwingungsrichtungen der Hintergrundstrahlung. Sie könnten nicht nur Hinweise auf die Ursachen der Anisotropien liefern, sondern darüber hinaus grundsätzlich Neues enthüllen. Denn in der Polarisation spiegeln sich möglicherweise auch Gravitationswellen wider, die durch den Urknall ausgelöst wurden. Grund genug, Plancks Ergebnisse weiterhin mit Spannung zu verfolgen.

Georg Wolschin ist Professor am Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg.