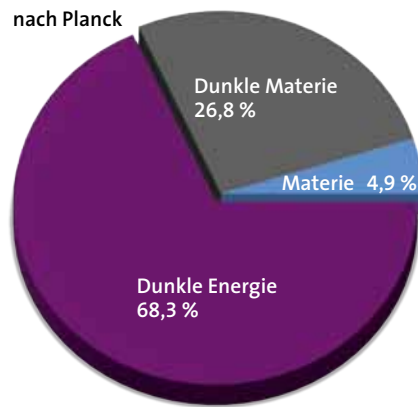
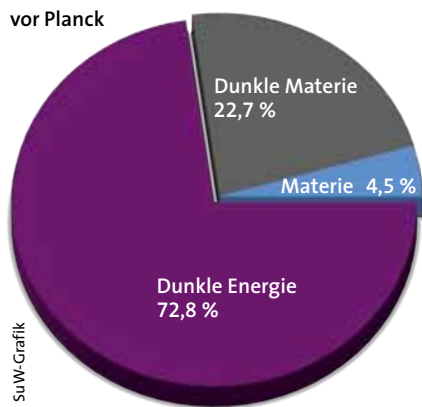




Nach den Auswertungen der Planck-Messungen besteht das Universum nun zu 68,3 Prozent aus Dunkler Energie, zu 26,8 Prozent aus Dunkler Materie und zu 4,9 Prozent aus gewöhnlicher Materie. Damit hat sich der Anteil gewöhnlicher Materie gegenüber dem alten Wert um neun Prozent erhöht.

Weltraumteleskop Planck: erste Ergebnisse

Im März 2013 wurden die Resultate der ersten anderthalb Jahre Beobachtungszeit des Weltraumteleskops Planck vorgestellt. Sie bestätigen das kosmische Standardmodell und erlauben tiefe Blicke in die Frühphase des Universums.

Die 1964 von Arno Penzias und Robert Wilson entdeckte kosmische Hintergrundstrahlung hat eine Temperatur von rund -270 Grad Celsius und ist in allen Richtungen am Himmel dieselbe. Doch Anfang der 1990er Jahre wies der Satellit COBE (Cosmic Background Explorer) Schwankungen dieser Temperatur von einigen Millionstel Grad nach. Dies wurde durch erdgebundene Beobachtungen und in den letzten Dutzend Jahren mit dem Satelliten WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) der NASA bestätigt.

Das Weltraumteleskop Planck der europäischen Raumfahrtbehörde ESA, das 2009 zum Lagrangepunkt L2 geschossen wurde, hat nun diese räumlichen Temperaturschwankungen mit nie zuvor erreichter Genauigkeit vermessen (siehe Bild S. 12). L2 liegt außerhalb der Erdbahn in rund 1,5 Millionen Kilometer Distanz von der Erde.

Die Messungen wurden bei neun Frequenzen im Bereich von 25 bis 1000 Gigahertz mit Hilfe von 74 Detektoren in zwei Instrumenten durchgeführt, dem Low Frequency und dem High Frequency Instrument. Ihre Auflösung am Himmel beträgt zwischen 5 und 30 Bogenminuten. Der relativ große Frequenzbereich des Planck-Teleskops erlaubt ein genaues Verständnis der »Störsignale«, die unter anderem von Emissionen unserer Milchstraße stammen, und somit eine hoch präzise Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Ihr Ursprung ist das »Nachglühen« der Strahlung, die zum Zeitpunkt des Urknalls

vorhanden war. Infolge der Ausdehnung des Universums kühlte sich diese Strahlung auf den heutigen Wert von -270 Grad Celsius – rund 3 Kelvin – ab.

Während der ersten 380 000 Jahre nach dem Urknall war die Strahlung an die Materie gekoppelt. Erst nach dieser Zeitspanne wurde das Universum durchsichtig, so dass sich die Strahlung ungehindert ausbreiten konnte. Bis zu dieser Zeit haben sich Dichteschwankungen, die ihren Ursprung in den ersten Momenten des Universums haben, wie Schallwellen ausgebreitet. Diese Störungen machen sich als Schwankungen in der Temperatur und in der Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung bemerkbar, die mit Planck im Detail beobachtet wurden.

Kosmologen lernen sehr viel über die Beschaffenheit und die Anfangsbedingungen des Universums, indem sie die höheren harmonischen Ordnungen dieser Störungen analysieren. Dieses Verfahren ähnelt demjenigen eines Instrumentenbauers, der durch eine Harmonieanalyse auf die Beschaffenheit eines Instruments schließt. Da Planck diese Harmonien äußerst präzise vermisst, lassen sich sehr genaue Aussagen über das zugrundeliegende kosmologische Modell treffen. Die Fehler bewegen sich dabei nur noch im niedrigen Prozentbereich.

Aus den Messungen mit Planck ergibt sich, dass das Universum zu 4,9 Prozent aus gewöhnlicher Materie, zu 26,8 Prozent aus Dunkler Materie und zu 68,3 Prozent aus Dunkler Energie besteht. In dieser Bezie-

hung hat Planck unser Standardmodell des Universums bestätigt, auch wenn der Anteil der Dunklen Energie durch die Messung mit Planck nun etwas kleiner ist als vorher angenommen (siehe Grafik oben). Der Hubble-Parameter, der die lokale Expansionsrate des Universums beschreibt, ist mit $67,15 \pm 1,2$ Kilometer pro Sekunde und Megaparsec signifikant kleiner als der bisherige Standardwert von $74,3 \pm 1,2$, der sich aus Daten des Infrarotsatelliten Spitzer ergab. Die Messungen ergeben für das Alter des Universums 13,82 Milliarden Jahre.

Das frühe Universum

Die präzisen Daten von Planck erlauben es, auch die frühesten Momente des Universums zu untersuchen. Während der ersten Sekundenbruchteile nach dem Urknall hat sich, so die gängige Vorstellung, der Raum explosionsartig – inflationär – aufgebläht. Das gesamte heute sichtbare Universum sollte aus einem Raumbereich kleiner als ein Atomkern hervorgegangen sein. Die meisten Kosmologen glauben an dieses aberwitzig erscheinende Ereignis, weil eine solche inflationäre Phase des Universums eine Reihe von ansonsten schwer verständlichen Beobachtungen erklären kann.

Die erste Beobachtung ist die erstaunliche und durch Planck genauer bestätigte Flachheit des Raums. Eigentlich sollte dessen Krümmung gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie zunehmen. Wenn der Raum heute jedoch flach erscheint, so muss er früher noch viel flacher gewesen

sein. Nur während einer inflationären Phase können Unebenheiten so weit ausgebügelt werden, dass heute nichts mehr davon übrig ist.

Die zweite Beobachtung ist die Gleichförmigkeit des Universums. Die Materie scheint überall etwa mit der gleichen Dichte vorzukommen: Das Universum ist statistisch homogen. Der kosmische Mikrowellenhintergrund ist, bis auf die kleinen Fluktuationen, äußerst isotrop. Kein Ort und keine Richtung im Universum scheint ausgezeichnet zu sein. Diese Gleichförmigkeit ist besonders überraschend, wenn man sich vergegenwärtigt, dass in einem Universum ohne Inflation viele der sich ähnelnden Orte noch nie im physikalischen Kontakt gewesen sein können. Zur Veranschaulichung: Nehmen wir zwei entgegengesetzt liegende Orte, an denen wir den Mikrowellenhintergrund messen. Deren Licht und jegliche andere Fernwirkung kommt gerade heute bei uns vorbei, wird aber noch lange unterwegs sein, um den jeweils gegenüberliegenden Ort zu erreichen. Wenn es nun aber ganz am Anfang eine inflationäre Phase gegeben hat, so ist es durchaus möglich, dass die beiden Orte anfänglich in Kontakt waren, bevor sie dann durch die Inflation auseinander gerissen wurden.

Die dritte Beobachtung betrifft das Vorhandensein von kleinen Temperaturschwankungen, die wir im Mikrowellenhintergrund sehen. Ihnen entsprechen Dichteschwankungen, aus denen die heutigen Galaxien hervorgegangen sind. Die Inflationstheorie hat eine natürliche Erklärung für diese Schwankungen. Demnach wurden Quantenfluktuationen des Energiefelds, das die Inflation angetrieben hat, während der Inflation durch das schnelle Ausdehnen konserviert.

Auch wenn es also einige gute Gründe für die Inflation gibt, so muss ein solch spekulatives Konzept überprüft werden. Auch gibt es Alternativmodelle, wie zum Beispiel die Theorie eines zyklischen Weltalls, in dem unser heutiges Universum einen oder mehrere Vorgänger hatte, die sich zusammenzogen und dann wieder ausdehnten.

Planck erlaubt es, die Inflationstheorie und andere Szenarien zu testen. Eine Vorhersage der einfacheren und damit natürlicheren Inflationsszenarien betrifft ein charakteristisches Verhältnis von Fluktuationen auf großen und kleinen Skalen. Dieses soll nahe einer Gleichverteilung liegen, aber leicht die großen Skalen bevorzugen.

Genau eine solche Verteilung wird nun von Planck signifikant festgestellt.

Weiterhin sagen die verschiedenen Szenarien eine charakteristische Abweichung der Temperaturschwankungen im Mikrowellenhimmel von einer Normal- oder Gaußverteilung voraus. Eine solche »Nicht-Gaußianität« wurde von WMAP gefunden und zwar mit einer solchen Stärke, dass die einfachen Inflationsszenarien ausgeschlossen zu sein scheinen. Komplexere Inflationsszenarien hätten zu diesen Daten gepasst, wie auch Szenarien zyklischer Universen. Planck revidiert dieses Bild, indem er klare und recht kleine Schranken an diese Nicht-Gaußianität setzt, die mit den einfachen Inflationsszenarien gut kompatibel sind, aber zyklische Universen auszuschließen scheinen.

Eine weitere Vorhersage der Inflationstheorie ist die Anregung von Gravitationswellen. Die jetzigen Daten von Planck geben eine obere Schranke zu deren Anre-

Die neuen Daten sind mit einfachen Inflationsmodellen verträglich, sie schließen zyklische Universen aber eher aus.

gung an, die gerade noch mit den Vorhersagen einfacher Inflationsmodelle verträglich ist. Es wird also spannend, wenn die Daten der vollen Missionsdauer veröffentlicht werden. Auch lässt sich mit den noch unveröffentlichten Polarisationsdaten von Planck direkt nach Anzeichen von primordialen Gravitationswellen fahnden.

Anomalien

Trotz der großartigen Bestätigung des Standardmodells der Kosmologie und von Inflationsvorhersagen gibt es in den Daten einige Anomalien. Diese waren teilweise auch vorher schon dank WMAP bekannt, aber Planck hat nun jegliche Zweifel darüber ausgeräumt, dass es sich um instrumentelle Effekte handeln könnte. Auf großen Winkelskalen scheinen ungefähr zehn Prozent der Fluktuationsstärke zu fehlen, welche die Extrapolation von kleineren Skalen im Rahmen des Standardmodells vorhersagt. Dann weist die Stärke der Fluktuationen eine gewisse Hemisphärenasymmetrie auf, das heißt, auf einer Himmelshälfte sind diese leicht stärker als auf der anderen. Dies könnte ein Hinweis auf ein nicht-isotropes Universum sein, in dem die Ausdehnung in verschiedene Richtungen leicht unterschiedlich ist – oder aber es ist einfach eine statistische Fluktuation. Weiterhin wurde der bereits

von den WMAP-Daten her bekannte kalte Fleck (Cold Spot) auch von Planck gesehen, und zwar noch größer als zuvor. Ein solcher etwas zu kalter Ort dieser Größe ist im jetzigen kosmologischen Modell sehr unwahrscheinlich, aber nicht vollkommen unmöglich. Auch dieser Cold Spot könnte ein Anzeichen von neuer, bisher unberücksichtigter Physik sein. Beispielsweise könnte sich ein Defekt in der Struktur eines teilchenphysikalischen Feldes auf diese Weise zeigen. Oder der Cold Spot und manche der anderen Anomalien sind einfach dem Umstand zu verdanken, dass die Planck-Daten derart umfangreichen Tests unterzogen wurden, dass einige exotische und unwahrscheinliche Phänomene gar nicht so verwunderlich sind.

Die Frage nach der Beschaffenheit unseres Universums kann dank Planck nun mit viel höherer Genauigkeit untersucht werden. Und möglicherweise haben wir Hinweise auf neue kosmologische Phäno-

mene erhalten. Die Auswertung der Polarisationsdaten von Planck wird nun mit Spannung erwartet. Diese werden weitere Rückschlüsse auf die Modelle des frühesten Universums erlauben. Die Veröffentlichung dieser Resultate wird im Frühjahr 2014 erwartet.

TORSTEN ENSSLIN forscht am Max-Planck Institut für Astrophysik in Garching unter anderem an der kosmischen Hintergrundstrahlung und über Informationstheorie.

JOCHEN WELLER arbeitet als Kosmologe an der Ludwig-Maximilians-Universität, am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik sowie am Excellence Cluster Universe an der Erforschung der Dunklen Energie, großräumiger Strukturen, der kosmischen Hintergrundstrahlung und Galaxienhaufen.

Literaturhinweis

Ade, P. A. R. et al.: Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results. In: *Astronomy & Astrophysics* (eingereicht), 2013. arXiv:1303.5062

Weblinks unter:

www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1189337