Das kosmologische Standardmodell

1. Vortrag im Bayerischen Fernsehen

Gerhard Börner
Max-Planck-Institut für Astrophysik
Karl-Schwarzschild-Str. 1, 85748 Garching

Die Kosmologie ist eine ganz besondere Wissenschaft. Da ihr Forschungsgegenstand die Struktur und Dynamik des Universums als Ganzes ist, befaßt sie sich definitionsgemäß mit einem einzigartigen Objekt und einem einzigartigen Ereignis. Jeder Physiker wäre unglücklich, müßte er seine Theorien auf ein einzelnes unwiederholbares Experiment stützen. Die Kosmologen können mit Sternen und Galaxien nicht einfach experimentieren. Sie entwerfen stattdessen ein Modell, in dessen Rahmen die Beobachtungen erst verständlich werden. Andererseits wird das Modell durch astronomische Beobachtungen auf seine Konsistenz hin überprüft. Dieses Verfahren führt zum Erfolg, weil das beobachtete Universum eine sehr einfache Grundstruktur aufweist.

Das moderne Bild vom Kosmos ruht im wesentlichen auf zwei fundamentalen Beobachtungen, der Entdeckung des amerikanischen Astronomen Edwin P. Hubble, daß sich fast alle fernen Galaxien von uns wegbewegen, und der Messung eines kosmischen Strahlungsfeldes im Mikrowellenbereich durch Arno Penzias und Robert Wilson im Jahre 1964. Die Entdeckung Hubbles im Jahr 1929 veränderte das Bild der Welt dramatisch: Die Vorstellung einer gleichmäßigen, unveränderlichen Verteilung von Sternen bis in unendliche Tiefen – ein Bild, dem zunächst sogar Albert Einstein vertraut hatte – mußte aufgegeben werden zugunsten des Konzepts eines Universums der Entwicklung und Veränderung, wie es das auseinanderfliegende, expandierende System der Galaxien darstellt. Die astronomischen Beobachtungen dieser Expansion führen zur Bestimmung einer charakteristischen Zeitspanne von 15 Milliarden Jahren. Vor 15 Milliarden Jahren waren die auseinanderfliegenden Galaxien dicht beisammen. Die Temperatur der kosmischen Mikrowellenstrahlung, die jetzt etwa 2.7 Kelvin beträgt, war in der Vergangenheit im weniger ausgedehnten Kosmos ebenfalls höher. Diese beiden fundamentalen Beobachtungen führen nahezu zwangsläufig zu dem Schluß, daß es einen heißen dichten Frühzustand des Universums gegeben hat, in dem die Galaxien und Sterne, die wir jetzt sehen, in einem nur wenig strukturierten, heißen und dichten Gemisch aus Strahlung und Materie aufgelöst waren.

Das gleichmäßig expandierende Universum läßt sich in mathematischen Modellen beschreiben, die sich als einfache Lösungen der Einsteinschen Gravitationstheorie ergeben. Es gibt eine ganze Reihe von Modellen, die im Einklang mit den astronomischen Messungen sind. Trotzdem sprechen die Astronomen von einem "Standard–Urknallmodell", im Sinne einer ganzen Klasse von Modellen, die einige typische Eigenschaften gemeinsam haben: Das Universum hat sich nach einer explosionsartig schnellen Ausdehnung zu Anfang durch eine heiße und dichte Frühphase zum gegenwärtigen Zustand entwickelt. Es sieht in jedem Punkt und in allen Richtungen gleich aus, abgesehen von Unregelmäßigkeiten auf kleinen Skalen. Galaxien und Galaxienhaufen haben sich aus anfänglich kleinen Dichteschwankungen durch die Wirkung der Schwerkraft gebildet.

Der Abstand zweier Galaxien, die mit der kosmischen Expansion mitschwimmen, wächst im Laufe der Zeit ständig an, falls die Massendichte unter einem kritischen Wert liegt (der etwa 3 Wasserstoffatomen pro Kubikmeter entspricht). Falls der kritische Wert der Dichte überschritten wird, erreicht die Ausdehnung ein Maximum und geht anschließend in eine Kontraktion über. Neueste Messungen an Supernovae erbrachten den Hinweis, daß die Expansion gegenwärtig sogar beschleunigt verläuft, angetrieben von einer kosmischen Abstoßung, einer positiven "kosmologischen Konstanten", die man wohl als eine Art Energiedichte des leeren Raumes interpretieren muß. Dies bedeutet, daß die Ausdehnung des Weltalls unumkehrbar für alle Zeit weitergehen wird. Im Standardmodell beginnt das Universum in einer Urexplosion von unendlicher Dichte, Temperatur und unendlich großem Anfangsschwung. Diese Anfangssingularität entzieht sich einer Beschreibung mit den Begriffen und Gesetzen der uns bekannten Theorien. Doch kurz nach dem Urknall, etwa 1 Sekunke später, gilt wohlbekannte Physik, und das weitere Verhalten des Universums läßt sich in einem konsistenten Standardmodell beschreiben. Zum Schluß sei noch ein Zeitrafferbild (das ich von meinem Kollegen Peter Kafka übernommen habe) geschildert, das die zeitliche Entwicklung des Kosmos veranschaulichen soll:

Drängen wir die Geschichte des Universums auf ein Jahr zusammen. Jeder Monat in diesem Bild entspricht in Wirklichkeit einer Milliarde Jahren. Stellen wir uns vor, mit dem Glockenschlag zum Neuen Jahr entstehe auch unsere Welt im Urknall. Der Urstoff, eine Strahlung, die den ganzen Raum gleichmäßig und mit ungeheuerer Dichte und Temperatur erfüllte, besaß noch keine Struktur, aber durch den Schwung der geheimnisvollen Urexplosion dehnte er sich überall gegen seine eigene Schwerkraft aus und kühlte sich dabei ab. Schon in einem winzigen Bruchteil der ersten Sekunde des ersten Januar entstand die Materie: die Elementarteilchen und gleich darauf die einfachsten Atomkerne, Wasserstoff und Helium. Noch vor Ende Januar entkoppelten Strahlung und Materie und die Galaxien entstanden. Die ersten Sterngenerationen in den Galaxien erzeugten in ihrem Inneren die höheren chemischen Elemente und schleuderten sie – zum Teil in Staubform – bei ihrer Explosion in das umgebende Gas. Kohlenstoff entstand besonders häufig – auf Staubkörnern in der Nähe von Sternen bildeten sich komplizierte organische Moleküle.

Mitte August entstand aus einer zusammenstürzenden Wolke von Gas und Staub unser Sonnensystem. Schon nach einem Tag war die Sonne in ihrem heutigen Zustand und versorgte ihre Planeten mit einem ziemlich konstanten

Strahlungsstrom einer Temperatur von etwa 6000 Grad. Da der übrige Himmel dunkel und kalt war, konnte die Erde die zugestrahlte Energie bei viel tieferer Temperatur wieder abstrahlen. So entstanden auf der Erde zuerst komplizierte chemische, dann biologische Strukturen. Von Mitte September stammen die ältesten Gesteine der Erdoberfläche, und in ihnen finden sich offenbar schon die ersten Spuren von Leben: fossile Einzeller. Bereits von Anfang Oktober stammen fossile Algen, und im Laufe von 2 Monaten entstand nun zunächst in den Gewässern eine ungeheure Vielfalt von Pflanzen und Tierarten. Die ersten Wirbeltierfossilien datieren wir auf den 16. Dezember. Am 19.12. besiedelten die Pflanzen die Kontinente. Am 20.12. waren die Landmassen mit Wald bedeckt, das Leben schuf sich selbst eine sauerstoffreiche Atmosphäre, die das ultraviolette Licht zurückhielt und somit noch komplexere und empfindlichere Formen des Lebens ermöglichte. Am 22. und 23. Dezember entstanden aus Fischen amphibische Vierfüßler und eroberten feuchtes Land. Aus ihnen entwickelten sich am 24. Dezember die Reptilien, die auch das trockene Land besiedelten. Am 25.12. erschienen die ersten Säugetiere. In der Nacht zum 30.12. begann die Auffaltung der Alpen. In der Nacht zum 31.12. entsprang der Menschenzweig dem Ast, der zu den heutigen Menschenaffen führt. Mit etwa 20 Generationen pro Sekunde begann nun der Mensch seine Entwicklung. 5 Minuten vor zwölf lebten die Neanderthaler, 15 Sekunden vor zwölf wurde Jesus Christus geboren, eine halbe Sekunde vor zwölf begann das technische Zeitalter. Schon sind wir im Neuen Jahr. Wie wird es weitergehen?