

15. Geschichte und philosophische Bedeutung

15.1. Die Entwicklung einer physikalischen Kosmologie im 20.

Der Begriff der Kosmologie hat sich erst in der Neuzeit herausgebildet. Einen sehr informativen Blick in die Begriffsgeschichte gibt der französische Orientalist Rémi Brague in einem Buch, das in deutscher Übersetzung unter dem Titel „Die Weisheit der Welt“ erschienen ist (20). Die Geschichte der modernen Kosmologie im Sinne dieser Vorlesung ist ein Kapitel Wissenschaftsgeschichte des 20. Jahrhunderts. Die moderne Kosmologie steht auf 3 Säulen. Die erste ist Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie, die zweite Säule ist die Bestimmung kosmischer Entfernungen mit Hilfe von Standardlichtquellen und die dritte ist die kosmische Mikrowellenstrahlung. Die Errichtung der drei Säulen hat eine längere Vorgeschichte im 20. Jahrhundert, die ich ganz kurz skizzieren möchte.

Einstein hatte 1915 eine Theorie der Gravitation publiziert, die unter dem Namen Allgemeine Relativitätstheorie bekannt geworden ist. Ausgehend von der simplen Feststellung, dass die Kraft auf eine beschleunigte Masse nicht von einer Gravitationskraft zu unterscheiden ist, verändern nach Einstein Massen die Geometrie des Raumes. Die Bewegung der Massen im Raum erfolgt auf kürzesten Wegen, den Geodäten, was John A. Wheeler wie folgt charakterisiert hat: „Die Massen sagen dem Raum, wie er sich zu krümmen hat. Der gekrümmte Raum sagt den Massen, wie sie sich zu bewegen haben“. 1917 versuchte Einstein dann mit dieser Theorie ein Modell des Kosmos zu entwickeln (1). Dabei machte er eine Voraussetzung, die heute als kosmologisches Prinzip bekannt ist: Der Raum sei homogen und isotrop. Einstein konnte sich damals einen Kosmos nur statisch vorstellen, weshalb er eine kosmologische Konstante Λ einführen musste. Das war zwar eine mathematische Vervollständigung seiner Gleichungen, jedoch konnte er Λ aber keinerlei vernünftige physikalische Bedeutung geben. 1922 zeigte Alexander Friedmann, ein junger mathematischer Physiker aus St. Petersburg, dass Einsteins statisches Modell nicht stabil war und dass man bei Zulassung eines dynamischen Kosmos, zwei Lösungsmengen erhält. Im einen Fall expandiert der Kosmos endlos, in diesem Fall hat der Raum eine negative Krümmung. Im anderen Fall erhält man mit einem positiv gekrümmten Raum oszillierende Lösungen, d.h. nach anfänglicher Expansion kontrahiert der Raum wieder, ein Spiel, das sich endlos fortsetzt. Einstein reagierte zunächst skeptisch, sah aber bald durch Vermittlung eines Kollegen seinen Fehler ein und empfahl 1923 Friedmanns Arbeit uneingeschränkt zur Publikation (2) (3).

In den zwanziger Jahren untersuchte ein junger Astronom, Edwin Hubble, am Mt. Wilson Observatorium Galaxien. Er hatte dazu das zu seiner Zeit größte Spiegelteleskop von 2,5 m Öffnung zur Verfügung. Damit konnte er zeigen, dass die Objekte, welche damals Spiralnebel genannt wurden, aus Sternen bestehen, also Milchstrassensysteme sind wie unsere eigene Galaxie. Neben einer Typisierung der Galaxien, die noch bis heute Bestand hat, ist seine für die Kosmologie wichtigste Entdeckung die „Fluchtbewegung der Galaxien“ geblieben. Er fand, dass die Spektren der Galaxien sich zu längeren Lichtwellen verschieben. Er deutete diesen Effekt, der umso stärker wird, je weiter die betreffende Galaxie von uns entfernt ist, als Fluchtgeschwindigkeit (4). Der belgische Physiker und Priester LeMaitre gab 1931 die korrekte Erklärung: Nicht die Galaxien bewegen sich, sondern der Raum expandiert (5). Alle großen Abstände und Längenmaße vergrößern sich, somit auch die Wellenlänge des Lichts, wenn es von einer fernen Galaxie in einem expandierenden Kosmos zu uns gelangt. Die Vergrößerung der Lichtwellenlänge z gibt uns ein direktes Maß für die Vergrößerung linearer Maßstäbe seit der Zeit der Lichtemission. Hubble fand auch, dass z mit der Entfernung r der Galaxie linear zunimmt.

Der Proportionalitätsfaktor H_0 heißt Hubble-Konstante. H_0 war über zwei Jahrzehnte der einzige experimentell zugängliche kosmologische Parameter. Leider war Hubbles Eichung der Entfernungen fehlerhaft, was dazu geführt hatte, dass H_0 um einen Faktor 8 über dem heute akzeptierten Wert lag. Der reziproke Wert von H_0 hat die Dimension einer Zeit und ergibt eine Abschätzung des Weltalters, das nach Hubble viel zu kurz war verglichen mit den ältesten auf der Erde gefundenen Gesteinen.

Bis zum Ende der vierziger Jahre verharrte die Kosmologie in einer Art Dörrröschenschlaf. Der Prinz, der sie aufwecken sollte war wieder ein russischer Physiker, George Gamow, der noch Vorlesungen in Petersburg bei dem früh verstorbenen Friedmann gehört hatte, dann in Göttingen, Kopenhagen und Cambridge über Kernphysik arbeitete. 1933 kehrte er und seine Frau nach Teilnahme an der Solvay-Konferenz in Brüssel nicht mehr in die Sowjetunion zurück. Die Gamows emigrierten in die USA. In seinen kosmologischen Überlegungen ließ Gamow das Modell eines expandierenden Kosmos in der Zeit rückwärts laufen und fand, dass mit Abnahme der Längenskala die mittlere kosmische Dichte und die Temperatur anwachsen, bis schließlich keine Sterne mehr existieren können. Stattdessen erscheint der Raum mit einem heißen Plasma ausgefüllt, das man sich wie die Sonnenoberfläche vorstellen muss. Zu dieser Zeit wären nur einige 100000 Jahre seit dem Beginn des Kosmos vergangen. Treibt man die Rückextrapolation noch weiter bis zu Temperaturen von etwa 10 Milliarden Grad, so können Kernfusionen ablaufen. Diese Prozesse ereignen sich in den ersten 3 Minuten unseres Kosmos. Gamow erkannte, dass dabei leichte Elemente gebildet werden; so vor allem Helium, dazu wenig Deuterium und noch weniger Lithium. Das Modell lässt eine Abschätzung der Häufigkeiten zu und liefert damit ein experimentell nachprüfbares Ergebnis. Die beobachtete kosmische Häufigkeit des Heliums konnte Gamow so durch die heiße Frühphase des Kosmos erklären: Von 11 Atomen im Kosmos sind 10 Wasserstoffatome und ein Heliumatom. Seit es Sterne im Kosmos gibt, wird in ihrem Inneren aus Wasserstoff Helium erbrütet, jedoch trägt dieser Prozess nur sehr wenig zur mittleren Häufigkeit von Helium bei. Gamow gelang noch eine weitere prüfbare Vorhersage. Mit der Abkühlung des heißen Plasmas im Laufe der kosmischen Expansion auf eine Temperatur von etwa 1000 Kelvin hat sich auch die zugehörige Strahlung abgekühlt. Die Energie der meisten Energiequanten ist jetzt zu klein, um noch von Wasserstoffatomen absorbiert zu werden. Man sagt, die Strahlung habe sich von der Materie entkoppelt. Diese Abkopplung passierte etwa 300 000 Jahre nach dem Beginn. Die Strahlung macht mit der weiteren Expansion des Raumes eine Abkühlung und Rotverschiebung um etwas mehr als einen Faktor 1000 durch, so dass sie heute im Bereich der elektromagnetischen Millimeterwellen als „kosmisches Rauschen“ auftritt. Gamow sagte in seiner Arbeit von 1948 das „kosmische Rauschen“ in Form einer Wärmestrahlung von etwa 5 Kelvin voraus (die Hubble-Konstante noch immer nur sehr ungenau bekannt). Leider war die Zeit noch nicht reif für Gamows kühne Ideen. Weder gab es bei den Astronomen Interesse noch war die Messtechnik im Bereich der Millimeterwellen genügend entwickelt, um nach der Existenz einer Hintergrundstrahlung zu suchen (6)(7).

Es waren schließlich Arno Penzias und Robert Wilson, 2 Physiker in den „Bell Telephone Laboratories at Holmdel N.J.“, die 1965 beim Testen einer 7 m Hornantenne für die Satellitenkommunikation auf ein störendes Rauschen stießen, das sich nicht auf einen instrumentellen Fehler zurückführen ließ. Auf Umwegen hörten sie von Robert Dicke und Mitarbeitern an der „Princeton University“ nur eine halbe Autostunde von ihnen entfernt, die für das „kosmische Rauschen“ eine Theorie hatten und sich schon anschickten, Hornantennen für den Empfang zu konstruieren. Man kam schnell überein, zwei Publikationen an *Astrophysical Journal* zu schicken, die auch 1965 hintereinander publiziert wurden (8)(9). Peinlicherweise musste Dicke sich erst vom Editor auf die viel

frühere Arbeit Gamovs aufmerksam machen lassen, die damals bereits in Vergessenheit geraten war. Die zufälligen Entdecker Penzias und Wilson erhielten 1978 den Nobel-Preis für Physik. Die Pioniere der Kosmologie, Gamov und Dicke gingen leer aus. Terrestrische Beobachtungen der Hintergrundstrahlung erwiesen sich durch Absorption der Erdatmosphäre aber auch durch elektromagnetische Streufelder unserer Nachrichtensysteme stark gestört. Deshalb plante die NASA den Start eines Satelliten mit empfindlichen Empfängern, der sowohl das Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung wie auch die Verteilung der Intensität auf der „Himmelskugel“ messen sollte. Davon soll weiter unten berichtet werden.

Ein weiterer wichtiger Beitrag zur Erforschung des Raumes leistete die NASA 1990 durch den Start des Hubble-Weltraumteleskops (HST). Neben großen Entdeckungen wie Gravitationslinsen und Phasen der Sternentstehung, konnten damit Supernova-Explosionen in weit entfernten Galaxien beobachtet werden. Unter den letztgenannten Katastrophen gibt es eine bestimmte Klasse, die Supernovae vom Typ Ia (SN Ia), deren maximale Helligkeit immer die gleiche ist, unabhängig davon, wo das Ereignis stattfindet. Damit hatte man die gesuchten Standardlichtquellen gefunden. Sie treten zwar selten genug auf, aber das HST macht es möglich, viele ferne Galaxien gleichzeitig zu beobachten. Inzwischen haben zwei unabhängig voneinander arbeitende astronomische Arbeitsgruppen in den USA einige hundert Ereignisse registriert und diese wiederum in Güteklassen eingeteilt (10). Auf diese Weise ist eine zuverlässige Bestimmung großer Abstände möglich geworden. Wegen der endlichen Geschwindigkeit des Lichts bedeutet ein Blick in die Tiefe des Raumes immer auch einen Blick in eine ferne kosmische Vergangenheit. Die Hubble-Konstante konnte mit Hilfe der SNe Ia auf etwas besser als 10% Genauigkeit bestimmt werden. Zusätzlich wurde eine Beschleunigung der kosmischen Expansion nachgewiesen, auf welche wir noch einmal zurückkommen werden. Daneben gibt es zur Absicherung auch noch völlig andere Verfahren, auf die wir hier nicht weiter eingehen können, die das Ergebnis der SN Ia - Messungen bestätigen. Damit ist die zweite Säule der modernen Kosmologie, von der eingangs die Rede war, zuverlässig errichtet.

Als dritte Säule sei die Vermessung der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMB) mit Hilfe von Satelliten genannt. Der COBE-Satellit (Cosmic Background Explorer) wurde im November 1989 gestartet. Das Forschungsprogramm stand unter der Leitung von John C. Mather, einer der Physik-Nobelpreisträger von 2006. Der Satellit wurde auf der von der Sonne abgewandten Seite in einem Punkt gehalten, der von Erde 1,5 Millionen km entfernt liegt. Der Satellit verbleibt damit auf der Verlängerung der Verbindungslinie Sonne – Erde am so genannten L_2 -Punkt. Die spektrale Verteilung der Intensität brachte eine große Überraschung. Sie entsprach exakt der eines Wärmestrahlers von 2,725 Grad absoluter Temperatur (11). Gamovs Modell erwies als richtig. Seine Abschätzung der Strahlungstemperatur war nur um 2,4 Kelvin zu hoch. Als eine zweite Überraschung erwies sich die große Homogenität und Isotropie der Strahlung, womit Einsteins kosmologisches Prinzip bis auf wenige Teile in 100 000 nachträglich gerechtfertigt war. Mit diesen kleinen Anisotropien hat sich nun der zweite Nobelpreisträger in Physik von 2006, George F. Smoot, näher befaßt. Ohne gewisse Inhomogenitäten im Urplasma wäre nämlich die spätere Bildung von Sternsystemen und Galaxien nicht denkbar. Deshalb drang Smoot auf ihre baldige sorgfältige Messung. Dazu musste aber ein neuer Satellit konstruiert werden, dessen Differential-Strahlungsmesser gestatteten, gerade diese kleinen Unterschiede bis auf 1 : 1000 000 zu bestimmen. Ehe es zum Start von WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) im Juni 2001 kam, gab es mehrerer Ballon-Experimente. Sie untersuchten in 38 km Höhe rund um den Südpol einem Ausschnitt des Himmels, um die Größe der Anisotropien zu messen. die man sich

am Himmel wie Flecken von einer Ausdehnung von 1 – 2 Winkelgrad vorstellen muss. In diesen Flecken hat die kosmische Mikrowellenstrahlung eine geringfügig höhere Temperatur. Da man das Verhalten der Strahlung im Verlaufe der kosmischen Expansion kennt, kann man sich die heute zu erwartende Größe der Flecken ausrechnen, vorausgesetzt man kennt die Geometrie des Raumes. Ist der Raum euklidisch, findet nur eine Ausdehnung statt (etwa um den Faktor 1000). Ist der Raum positiv gekrümmt, dann wirkt er wie eine Sammellinse und die Flecken erscheinen gegenüber dem flachen Raum vergrößert. Ist der Raum dagegen negativ gekrümmt, wirkt er wie eine Zerstreuungslinse und die Flecken sind gegenüber dem flachen Raum verkleinert. Die Ergebnisse der Ballon-Experimente erfüllen innerhalb weniger Prozente die Bedingung des euklidischen Raumes. Nach Friedmanns Lösungen, die er, wie erinnerlich, aus Einsteins Gleichungen ableitete, ist der euklidische Raum ein (seltener) Grenzfall. Dazu ist erforderlich, dass die mittlere Massen- oder Energiedichte exakt einem kritischen Wert gleicht.

Die Sonde WMAP trägt den Namen von D.T. Wilkinson, ein früherer Mitarbeiter von Robert Dicke und einer der Konstrukteure der Instrumente, der leider schon vor dem Start an einer Krebserkrankung verstarb. Die Ergebnisse von WMAP haben nicht nur die Ballonexperimente bestätigt und ausgedehnt, sondern sie wurden auch wegen der langen ungestörten Messzeit, in welcher der ganze Himmel mehrfach Punkt für Punkt abgefahren wurde, ein Beispiel dafür, dass die Kosmologie inzwischen in ein Zeitalter der Präzisionsmessungen eingetreten ist. Die Daten wurden in ein Spektrum der Fluktuationen umgerechnet, aus welchem sich ein wahrscheinlichstes „Konkordanzmodell“ ermittelt lässt, welches mit nur 6 Eingabeparametern auskommt (12). Es stimmt übrigens sehr gut mit den Messungen an SNe Ia überein. Das überraschende Ergebnis ist eine kritische Dichte, die zu 75% aus Energie und zu 25% aus Materie besteht. Die Energie hat man „dunkle Energie“ genannt, ein moderner Name für Einsteins Λ , das so wieder zu Ehren gekommen ist. Die dunkle Energie ist für die beobachtete zusätzliche Beschleunigung der Expansion verantwortlich, nur konnte sie bisher trotz erheblicher Anstrengungen nicht weiter erklärt werden. Ihr Auftreten erscheint kontingent. Andererseits besteht auch der Anteil der Materie zum größten Teil aus einer noch unbekanntes so genannte „dunklen Materie“, welche sich nur durch ihre Gravitation bemerkbar macht. Höchstens 4% der kritischen Dichte entfallen auf die uns vertraute Materie, aus welcher Sterne und Planeten aufgebaut sind. Die unbekanntes Teilchen der dunklen Materie müssen nach astronomischen Beobachtungen eine Bewegungsenergie haben, die viel kleiner ist als ihre Ruhenergie, weshalb man auch von kalter dunkler Materie spricht (es können also keine Neutrinos sein). Trotz intensiver experimenteller Bemühungen ist es bisher nicht gelungen, die Elementarteilchen der dunklen Materie im Labor nachzuweisen.

15.2. Das inflationäre Paradigma löst Widersprüche auf.

Was verlangen Physiker von einer konsistenten Theorie? Sie ist auf Voraussetzungen gegründet, wie z.B. auf das kosmologische Prinzip. Weiterhin benötigt sie messbare Größen, die im Allgemeinen durch eine Messvorschrift definiert werden (z.B. Massen, Entfernungen, Temperatur, Druck, Dichte). Schließlich gibt es Grundgesetze, welche die messbaren Größen miteinander verknüpfen. In diesen sind neben mathematischen Strukturen (wie etwa die Friedmannschen Differentialgleichungen) auch Größen wie Naturkonstanten oder andere unverzichtbare Parameter enthalten. Eine brauchbare Theorie sollte möglichst viele Phänomene mit einem Minimum an Grundgesetzen und Parametern erklären können. Sie sollte schließlich zu neuen Experimenten anregen. Schauen wir uns dazu einmal das kosmologische Standardmodell an. Es enthält einen

zeitabhängigen Skalenparameter $a(t)$, der für die Gegenwart „eins“ gesetzt wird, für die Vergangenheit ist er kleiner eins, für die Zukunft größer eins. Die gegenwärtige Länge eines kosmischen Abstands kann durch Multiplikation mit $a(t)$ in eine vergangene oder in eine zukünftige Zeit t extrapoliert werden. Die zeitliche Entwicklung von $a(t)$ hängt von der Zusammensetzung der Dichte ab. Mit dieser einfach anmutenden Theorie gelingt es, die Hintergrundstrahlung vorher zu sagen, oder aber die gegenwärtig gemessenen Werte einzusetzen und so die Zeit der Abkopplung zu bestimmen (etwa 300 000 Jahre). In entsprechender Weise findet man die Zeit und die Dauer für die Bildung der leichten Elemente (die ersten 3 Minuten). Der Laie mag sich fragen, ob denn eine Beschreibung der kosmischen Dynamik über fast 15 Zehnerpotenzen in der Zeit nicht ausreicht. Nun gibt es aber tatsächlich vernünftige Gründe, das kosmologische Standardmodell zu noch kürzeren Zeiten und damit höheren Temperaturen und Dichten voran zu treiben. Wir haben, Gamow folgend, am Anfang die Entstehung der leichten Elemente aus Protonen und Neutronen erwähnt. Wie wir heute wissen, sind diese wiederum aus Quarks und Gluonen, den Quanten der starken Wechselwirkung, aufgebaut. Ein Phasenübergang zu einer Materie aus freien Quarks und Gluonen ereignet sich aber erst bei Temperaturen oberhalb etwa 2 Billionen Grad oder 0,2 GeV pro Teilchen. [1 GeV ist etwa die Energie, die notwendig ist, um ein Proton zu erzeugen.] Neben der starken Wechselwirkung gibt es noch die schwache, welche den β -Zerfall der Kerne verursacht und eine wichtige Rolle bei der Entstehung der chemischen Elemente spielt. Die elektromagnetische Wechselwirkung ist nicht nur die Basis der Nachrichten- und Kommunikationstechnik sondern sie hält auch die Moleküle zusammen, welche die Bausteine des Lebens auf der Erde bilden. Die Stärke der Wechselwirkung ändert sich mit der Teilchenenergie. Extrapoliert man sie zu hohen Energien nach dem Standardmodell der Teilchenphysik, so findet man, dass alle 3 Wechselwirkungen bei etwa 10^{16} GeV zusammenfallen. Mit terrestrischen Beschleunigern lassen sich diese Energien der „großen Vereinigung“ wohl nie erreichen. Aber man hat allen Grund anzunehmen, dass der frühe Kosmos eine solche Phase hoher Temperatur durchlaufen hat, was etwa 10^{-33} Sekunden nach dem Beginn der Fall gewesen sein könnte. In der späteren Expansion und Abkühlung haben sich dann die bekannten Teilchenfelder und ihre Wechselwirkungen auskondensiert. Es gibt also gute Gründe, die kosmische Entwicklung zu kürzeren Zeiten und höheren Energien zurück zu verfolgen. Dabei tauchen aber Schwierigkeiten auf, von welchen hier nur zwei genannt werden sollen. 1. Damit wir heute einen euklidischen Kosmos haben, wäre es im frühen Kosmos notwendig gewesen, eine verschwindende Raumkrümmung mit unvorstellbarer Genauigkeit einzuhalten (das Flachheitsproblem). 2. Der frühe, von der Strahlung dominierte, Kosmos expandierte schneller als Lichtgeschwindigkeit und zerriss damit den Raum in eine Vielzahl von Gebieten, welche kausal nicht mehr miteinander zusammenhängen, was zu einer inkohärenten kosmischen Entwicklung geführt hätte (das Horizontproblem), das aber nicht beobachtet wird. Die Lösung fand ein junger Forschungsassistent, Alan Guth, 1981 eher zufällig (13). Er war damals damit beschäftigt, ein Problem der Teilchenphysik zu lösen. Im frühen Kosmos muss es eine kurze Periode „inflationärer“ Expansion gegeben haben, die nach 10^{-33} Sekunden einsetzte und nach 10^{-31} Sekunden wieder aufhörte. In dieser Zeit blähte sich der Raum um mindestens 26 Zehnerpotenzen auf. Gab es zu Beginn nur ein winziges kausal zusammenhängendes Volumen, dann hatte es nach der Inflation makroskopische Größe und vergrößerte sich bis in die Gegenwart im Sinne der Standardtheorie weiter, so dass das heute beobachtbare Raumvolumen nur ein kleiner Teil des ursprünglichen wäre. Das Horizontproblem war damit gelöst. Wenn der Raum durch die hohe Massendichte zu Beginn der inflationären Expansion positiv gekrümmt war, so erscheint er danach praktisch euklidisch, weil die Expansion die Raumkrümmung zum Verschwinden brachte. Damit war das „inflationäre Paradigma“

geboren, um welches die Standardtheorie ergänzt werden musste. Die Inflation sagt voraus, dass es in dem mikroskopisch kleinen Volumen zu Beginn der inflationären Expansion im Urfeld, auch Inflatonfeld genannt, Quantenfluktuationen gegeben hat. Sie sind beim Erreichen des Horizontes erstarrt und bei der inflationären Expansion zu makroskopischen Dimensionen vergrößert worden. Heute beobachten wir ihre Reste in den Anisotropien der Hintergrundstrahlung. Sie bildeten die Keime der Strukturbildung, die ohne sie nicht möglich gewesen wäre. Man stellt sich vor, dass bei Beginn der Inflation die Energie des Feldes völlig in der potentiellen Energie des Inflatonfelds gespeichert war und die Inflation antrieb. Am Ende der inflationären Phase ist die potentielle Energie des Feldes abgeklungen. Das Inflatonfeld hat ein neues Minimum gefunden. Die Energie ist in die Felder von Teilchen geflossen, die gebildet wurden und jetzt den Raum bevölkern. Dann setzt die weitere Expansion nach dem Standardmodell ein.

Die Kosmologie des heißen Anfangs wurde von einem ihrer Gegner, Fred Hoyle, polemisch Urknall-Theorie getauft (Big Bang Theory). In dem erweiterten Modell übernimmt die Inflation die Rolle des „Urknalls“. Was passierte war freilich kein Knall, sondern eine exponentielle Expansion der Raumgeometrie. Aber, so könnten Wissenschaftstheoretiker fragen, ist die Inflation nicht eine Zusatzannahme, die eingeführt wurde, um das kosmologische Standardmodell zu retten? Hätte man nicht stattdessen noch einmal von vorn beginnen und ein völlig neues Modell entwickeln sollen?

15.3. Zufall und Notwendigkeit in der kosmischen Entwicklung

Die heterogene Gestalt des „Standardmodells plus Inflation“ spiegelt in gewissem Sinne das Bild wieder, das wir gegenwärtig von der physikalischen Realität haben und das ebenfalls heterogen ist. Die Gravitation, die schwächste der 4 Naturkräfte, wird von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie beschrieben. Sie ist jenes Stück „Notwendigkeit“ oder Determinismus, das in das Standardmodell durch Friedmanns Gleichungen eingearbeitet ist. Die Aufteilung der Dichte in Materie und dunkle Energie (0,25 zu 0,75) erscheint zufällig und muss aus den Beobachtungen angepasst werden. Vor Einsetzen der Inflation sind die Kräfte der Natur vermutlich in einer Urkraft vereinigt. Ein „Inflatonfeld“ löste die inflationäre Expansion aus. Das inflationäre Paradigma scheint jedoch wenig von der speziellen Ausgestaltung des Modells abhängig zu sein. In der Sprache der Theorie heißt das, die Inflation bildet einen Fixpunkt, zu welchem sich spezielle Modelle hin entwickeln. Wir können deshalb das inflationäre Paradigma als einen Theorierahmen ansehen, in welchen viele konkrete Modelle als Möglichkeiten passen.

Wie wahrscheinlich ist der inflationäre Prozess, wie wahrscheinlich ist der „Urknall“? Darüber gehen die Meinungen auseinander. Physiker gehen im Allgemeinen davon aus, dass das, was einmal geschah, auch immer wieder geschehen kann. Anschaulich gesprochen benimmt sich das Urfeld wie eine siedende Flüssigkeit, wobei die Zeitskala völlig offen bleibt. Diese Vorstellung sich wiederholender Inflationen (Eternal Inflation) führt notwendig zu Multiversen (14),(15), d.h. anderen expandierenden Räumen, wobei offen bleibt, ob wir sie als potentielle oder reale Welten denken. Ihre Existenz werden wir durch Beobachtungen aber grundsätzlich nicht nachweisen können. Sie könnten ganz anderen Naturgesetzen gehorchen als unser eigener Kosmos, der uns dann als ein ganz besonderer erscheint. In ihm ist die dunkle Energie gerade so groß, dass zur rechten Zeit Strukturen entstehen konnten, in ihm ist die elektromagnetischen Kraft gerade groß genug, um Atome und Moleküle zu stabilisieren, die Kernkräfte schließlich ermöglichen z.B. den unwahrscheinlichen Schritt vom Helium der Masse 4 zum Kohlenstoff der Masse 12, dem Element des Lebens. In unserem Kosmos konnte eine Erde entstehen, die über Jahrmilliarden stabil genug war, um Leben zu entwickeln und uns Menschen

hervorzubringen. Damit haben wir schon die Kosmologie als Wissenschaft verlassen und argumentieren im Sinne des anthropischen Prinzips. Der Gläubige wird bei diesen Gedanken verweilen und den Schöpfer preisen, der ihn in einen so freundlichen Kosmos gestellt hat. Er gab dem Menschen auch den Verstand, den Kosmos zu erforschen. Der Gläubige wird allerdings auch den atheistischen Wissenschaftler, mit dem er im Staunen verbunden sein mag, nicht widerlegen können, der ihm die Multiversen mit Hilfe der Stringtheorie schmackhaft machen will (18),(19). Spekulationen über den Anfang unseres Kosmos werden sich grundsätzlich nicht an der Erfahrung testen lassen. Das inflationäre Paradigma sorgt dafür, dass alle beobachtbaren Spuren eines Anfangs ausgelöscht sind. Die hier skizzierte Situation erinnert sehr an die biologische Evolution. Auch sie hat keine Spuren von der „Entstehung des Lebens“ hinterlassen. Auch bei ihr zeigen die Spekulationen über denkbare Wege von präbiotischen Makromolekülen bis zu den ersten vermehrungsfähigen Zellen Möglichkeiten auf, ohne dass sich ein Beweis für einen bestimmten Weg geben lässt. Es ist sicher lehrreich, über eine gewisse Analogie zwischen beiden Stufen der Evolution nachzudenken. Dass Zufall und Notwendigkeit die biologische Evolution vorantreiben, hat Jacques Monod plausibel gemacht. Der Papst hat das Zitat mündlich gebraucht. Offensichtlich spielt sogar in der Evolution des Kosmos, der man gern einen streng gesetzlichen Ablauf unterstellt, die Kontingenz eine Rolle. Auch hier können wir von Zufall und Notwendigkeit sprechen. Die tiefere Ursache für die Ähnlichkeit der Evolution des Kosmos und des Lebens mag der Philosoph in der Struktur der Zeit sehen. Der Physiker wird eher darauf verweisen, dass es die nichtlinearen Prozesse in der Natur sind, die sich unvorhersehbar entwickeln. Alltägliche Beispiele sind Wetter und Klima. Wir stoßen hier an eine Erkenntnisgrenze. Aussagen über Zufallsereignisse sind nur als Wahrscheinlichkeiten möglich. Dazu kommt, dass wir es beim Kosmos und bei unserem Planeten Erde mit einem Unikat zu tun haben. Weder kennen wir eine andere belebte Erde noch einen anderen Kosmos. Insofern sind weder Erde noch Kosmos von uns Menschen im üblichen Sinne objektivierbar. Stattdessen sind wir Bürger des Kosmos, seiner Gesetze und seiner Zufälle. Wir können über Grenzen spekulieren, aber sie nicht mit wissenschaftlichen Methoden überschreiten. Schon gar nicht können wir uns den Kosmos „von außen“ ansehen. Bei der Erde ist die Außenansicht zwar möglich, dennoch bleibt auch der blaue Planet ein Unikat. Schon der nächste Fixstern ist mit einer Entfernung von 4,2 Lichtjahren unerreichbar fern, die nächsten Planeten unbewohnbar. Dazwischen liegt lebensfeindlicher Raum. Dennoch bleibt uns das Privileg, Weltbürger auf dem blauen Planeten zu sein, mit allen Rechten und Pflichten, die wir allerdings bei Strafe der Auslöschung erfüllen sollten.

15.4. Literatur

- 1) Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. S. 142 – 152 (1917)
- 2) A. Friedmann. Über die Krümmung des Raumes. Zeitschrift f. Physik **10**, S. 377 – 386 (1922)
- 3) A. Friedmann. Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung. Zeitschrift f. Physik **21**, S. 326 – 332 (1924)
- 4) E. Hubble. A relation between distance and radial velocity among extragalactic nebula. Proc. Nat. Acad. Sci. (USA) **15**, p 169 – 173 (1929)

- 5) G. Lemaitre. Un univers de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale de nebuleuse extragalactiques. Ann. Soc. Sci. Bruxelles A **47**, S. 47 – 59 (1927)
- 6) G. Gamow. Expanding universe and the origin of elements. Phys. Rev. **70**, p 572 – 573 (1946)
- 7) G. Gamow. The origin of elements and the separation of galaxies. Phys. Rev. **74**, p 505-506 (1948).
- 8) A.A. Penzias, R.W. Wilson. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. Astrophys. Journal **142**, 419 (1965)
- 9) R.H. Dicke, P.J.E. Peebles, P.R. Rolland D.T. Wilkinson. Cosmic Blackbody Radiation Astrophys. Journal **142**, 414 (1965)
- 10) Home page des High-z-Supernova-Teams:
<http://cfa-www.harvard.edu/cfa/oir/Research/supernova/HighZ.html>
 Home page des Supernova Cosmology Projects:
<http://panisse.lbl.gov/>
- 11) J.C. Mather et al. Astrophys. Journal. **345** L37 (1990)
- 12) G. Hinshaw et al. First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Data Processing, Methods and Systematic Error Limits. Astrophys. Journal Suppl. **148**, 63 (2003)
- D.N. Spergel et al. Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results: Implications for Cosmology (2006)
<http://xxx.uni-augsburg.de/abs/astro-ph/0603449>
- 13) A. Guth: The Inflationary Universe. The Quest for a New Theory of Cosmic Origins. Perseus Publ. Comp. 1997
- 14) Ellis G. F. R., Kirchner U. and Stoeger W. R. : Multiverses and Physical Cosmology. Mon. Not. Royal. Astr. Soc **347**, 921 (2003)
- 15) M. Kaku. Im Paralleluniversum. Eine kosmologische Reise vom Big Bang in die 11. Dimension. Rowohlt Taschenbuch Verlag. rororo Science 61948 (2005)
- 16) Hans Küng. Der Anfang aller Dinge. Naturwissenschaft und Religion. Piper Verl. 2005
- 17) Dieter Hattrup. Der Traum von der Weltformel oder Warum das Universum schweigt. Herder Verl. 2006
- 18) L. Susskind. The Anthropic Landscape of String Theory . <http://xxx.uni-augsburg.de/abs/hep-th/0302219>
- 19) L. Susskind. The Cosmic Landscape. String Theory and the Illusion of Intelligent Design. Publisher Little, Brown and Company N.Y. 2005
- 20) Rémi Brague. Die Weisheit der Welt. Kosmos und Welterfahrung im westlichen Denken. H.C. Beck Verlag 2006