

Hermann Brück

## Astrophysikalische Kosmologie

Die naturwissenschaftliche Kosmologie befaßt sich mit dem Studium von Struktur und Evolution des physikalischen Universums als ganzem. Betrachten wir, mit welcher ungeheueren Dimensionen in Raum und Zeit wir dabei zu tun haben, scheint die Kosmologie eine nahezu unmögliche Aufgabe zu haben. Daß sie diese Aufgabe mit beachtlichem Erfolg wahrnimmt, hängt mit der Erkenntnis zusammen, daß das Universum in seiner Großstruktur relativ einfach ist, sowie von dem Umstand, daß die endliche Geschwindigkeit des Lichtes uns gestattet, die Entwicklung des Universums in ihre Vergangenheit zurückzuverfolgen, indem wir immer entferntere Teile davon beobachten.

Die moderne naturwissenschaftliche Kosmologie entstand in den zwanziger Jahren. Im Bereich der Beobachtung begann sie mit der Entdeckung der Natur der «Galaxien», der Bausteine der Großstruktur des Universums. Im theoretischen Bereich begann die Kosmologie mit der Anwendung der Einsteinschen Relativitätstheorie auf verschiedene theoretische Modelle des Universums.

Astronomische Beobachtungen berichten uns, daß das Universum aus vielen Millionen von Galaxien besteht, die ziemlich gleichmäßig über den Raum hin verteilt sind und selbst Strukturen darstellen, die aus Millionen von Einzelsternen und einiger diffuser interstellarer Materie bestehen. «Unsere eigene Galaxie», die Galaxie, in der unsere Sonne ihren Platz hat, umfaßt einige 100 000 Millionen Sterne, die alle der Sonne mehr oder minder ähnlich sind.

So groß die Abstände zwischen den Einzelsternen sind, die Abstände zwischen den Galaxien sind millionenfach größer. Wie der amerikanische Astronom E. Hubble in den frühen zwanziger Jahren entdeckte, sind selbst die uns nahegelegenen Galaxien einige Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Und die Entfernungen von wirklich nur sehr lichtschwachen Galaxien belaufen sich auf mehrere tausend Millionen Lichtjahre. Wenn wir sie beobachten, dann sehen wir

sie nicht, wie sie im Augenblick sind, sondern wie sie vor einigen tausend Millionen Lichtjahren gewesen sind.

Eine zweite bedeutende Entdeckung, die derselbe amerikanische Astronom 1929 machte, betrifft die Bewegungen der Galaxien. Durch Beobachtung ihrer Spektren und unter Benutzung des bekannten Dopplereffekts konnte er die Bewegungen von Galaxien in der Sehlinie messen und fand dabei, daß sie sich von uns entfernen mit einer Fluchtgeschwindigkeit, die desto größer wird, je weiter sie entfernt sind. Solche Bewegungen lassen erkennen, daß die Galaxien sich auch voneinander entfernen oder daß der Gesamtbereich der Galaxien sich in einer allgemeinen Expansion befindet. Beobachtungen lassen erkennen, daß diese Expansion nach einem festen Maßstab erfolgt: Die entferntesten noch zu beobachtenden Objekte entfernen sich von uns und voneinander mit einer Geschwindigkeit, die einem erheblichen Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit entspricht.

Die Entdeckung dieser allgemeinen Expansion legt die Annahme nahe, daß der gegenwärtige Zustand des Universums das Ergebnis einer in der Vergangenheit erfolgten Explosion dessen ist, was man das «Uratom» genannt hat und das auf engstem Raum komprimiert alle Materie enthalten hat, die wir jetzt im Universum verstreut sehen. Wenn die gegenwärtig beobachtete Expansionsgeschwindigkeit von Anfang an bis heute mehr oder weniger die gleiche geblieben ist – und das ist eine keineswegs unvernünftige Annahme – dann ist die Urexplosion oder, wie man allgemein sagt, der «Urknall», vor etwa 15 000 Millionen Jahren erfolgt.

Gehen wir nun von den Beobachtungen zur Theorie, so treffen wir, abgesehen von Einstein in diesem Bereich auf eine ganze Anzahl Pioniere. Doch der «Vater der Urknall-Kosmologie» war der verstorbene Monsignore Georges Lemaître aus Löwen. Er gehörte zu den frühesten Mitgliedern der Päpstlichen Akademie der Wissenschaften und war von 1960 bis zu seinem Tod im Jahre 1967 ihr Präsident. Ihm zu Ehren veranstaltete die Akademie im Herbst 1981 eine Studienwoche über «Kosmologie und Fundamentalphysik», an der an die zwanzig führende Astronomen und Physiker der Welt teilnahmen.

Die Einbeziehung der Fundamentalphysik in den Themenkreis der Studienwoche anerkennt die Tatsache, daß in den frühesten Stadien des explodierenden Universums zugleich auch die

fundamentalen elementaren Partikel der Physik entstanden sind, aus denen alle anderen, ja in Wirklichkeit alle Strukturen des gegenwärtigen Universums, sich in der Zeit entwickelt haben.

Sprechen wir vom «Anfang» des Universums, so meinen wir immer den Zeitpunkt, auf den wir letztlich alle Phänomene zurückverfolgen können, die wir heute beobachten. Obwohl die physikalischen Bedingungen in den frühesten Stadien des Universums sehr verschieden waren von denen, die uns heute vertraut sind, ist die moderne Atomphysik vollständig fähig, diese frühen Bedingungen zu berücksichtigen und vernünftige Rückschlüsse zu ziehen auf den Zustand des Universums einige Minuten, Sekunden oder gar Sekundenbruchteile nach dem Ur-Knall.

In der Erforschung der Geschichte des Universums hat von Anfang an die Radioastronomie eine maßgebliche Rolle gespielt. Beginnend mit der Pionierleistung von Sir Martin Ryle, Cambridge, in den fünfziger Jahren haben Beobachtungen über die Verteilung weit entfernter Galaxien im Raum mit Hilfe der Radioastronomie überzeugend dargetan, daß in seiner verflossenen Geschichte das Universum erheblich verschieden von dem war, was es heute ist und daß es alle Zeichen einer kosmischen Evolution aufweist. Während der vatikanischen Studienwoche widmete man eine besondere Aufmerksamkeit der Verteilung der Quasare, äußerst lichtstarker Radiogalaxien, die aus sehr großer Entfernung zu entdecken sind und damit wertvolle Information über frühe Perioden in der Geschichte des Universums vermitteln.

Eine weitere wichtige Entdeckung auf dem Gebiet der Radioastronomie wurde 1965 von zwei amerikanischen Physikern gemacht: A.A. Penzias und R.W. Wilson, die unter Einsatz eines Radioteleskops im Mikrowellenbereich das Vorhandensein einer schwachen Radiostrahlung entdeckten, die am besten gedeutet werden kann als Überrest einer Strahlung, die vom Universum ausging, als dieses tausendmal kleiner und heißer war, als es gegenwärtig ist. Die Energie dieser Mikrowellen-Ausstrahlung entspricht einer gegenwärtigen Temperatur des Universums von nur drei Grad über dem absoluten Nullpunkt, einer Temperatur, zu der die Strahlung abgekühlt ist als Folge der Expansion seit ihrer Aussendung, etwa eine Million Jahre nach dem Urknall.

Verglichen mit den 15000 Millionen Jahren, die seit Beginn der Expansion verstrichen sind,

stellt ein «Alter» von einer Million Jahren ein sehr jugendliches Stadium in der Geschichte des Universums dar. Doch – wie eben schon erwähnt – läßt sich der Zustand des Universums in der Tat anhand der Gesetze der fundamentalen Physik bis auf weit frühere Zeiten zurückverfolgen. Derartige Extrapolationen werden natürlich zunehmend provisorischer, je weiter man in einen Bereich vordringt, innerhalb dessen diese Gesetze nicht mehr strikt anwendbar sein können.

Gewiß ist, daß das Universum in seinem Frühstadium, in seinem heißen komprimierten Zustand, eine beträchtliche Menge der Energie enthielt, die gemäß den Regeln der Quantentheorie und der Relativitätstheorie gleichermaßen in Gestalt von Strahlung oder in Gestalt von Materie auftreten kann. Wenige Sekunden nach dem Urknall befand sich der größte Teil der Energie des Universums aktuell im Zustand der Strahlung, während nur ein kleiner Teil davon als Materie vorhanden war. Wenige Minuten später waren die physikalischen Bedingungen so, daß das Element Helium zu dem Wasserstoff, dem im größten Überfluß vorhandenen aller Elemente, hervorgebracht werden konnte.

Was die schwereren Elemente anbetrifft, so wissen wir seit den Forschungen von E.M. und G.R. Burbidge gegen Ende der fünfziger Jahre, daß sie bei Kernreaktionen im heißen Inneren massiver Sterne entstanden sind. Die geniale Theorie der Nukleogenese gilt jedoch nicht für die Entstehung des Elementes Helium; und die Entdeckung, daß dieses Element in seiner korrekten Proportion zum Wasserstoff entstanden sein könnte, kurz nach dem Urknall, lieferten eine willkommene Lösung für ein seit langer Zeit anstehendes Problem. Eine weitere Bestätigung dieses Ergebnisses und die Erklärung, daß weitere leichte Elemente wie Deuterium und Lithium im Urknall entstanden sind, wurden ebenfalls auf der Vatikanischen Studienwoche vorgetragen und gaben der Theorie vom heißen Urknall eine starke Unterstützung.

Natürlich bestehen hier noch zahlreiche offene Fragen. Eine sehr gewichtige betrifft das Problem, wie und in welchem Stadium Galaxien in der Lage waren, aus der diffusen intergalaktischen Materie zu kondensieren und wie Strukturen, die aus Haufen oder auch aus Superhaufen einzelner Galaxien mit großen Leerräumen dazwischen bestehen, mit der Zeit dazu kamen, sich zu entwickeln. Die Bildung dieser Strukturen erfolgte in relativ spätem Stadium, vielleicht

100 Millionen Jahre nach dem Urknall; und es ist eine interessante Tatsache, daß die frühe Periode von einer Sekunde bis zu einer Million Jahren in der Geschichte des Universums besser erfaßt ist, als eine spätere von einer Million bis zu einer Billion Jahren.

Wenn wir einmal die vergangene Geschichte des Universums betrachtet haben, können wir gut nach seiner Zukunft und seinem künftigen Schicksal fragen. Wird die derzeitige Expansion für ewige Zeiten weitergehen, oder wird sie sich verlangsamen und wird das Universum zuletzt zusammenbrechen? Laut der Relativitätstheorie hängt der Expansionsumfang des Universums ab von der Menge der Materie, die es enthält. Überschreitet die durchschnittliche Konzentration der Materie eine bestimmte kritische Dichte, werden Gravitationskräfte die Expansion hemmen, und das Universum wird sich am Ende wieder kontrahieren. Diese kritische Dichte läßt sich unschwer errechnen; sie ist dann erreicht, wenn sich pro Kubikmeter drei Atome finden; eine wirklich sehr geringe Dichte! Vergleicht man das mit der gegenwärtigen durchschnittlichen Dichte der Materie im galaktischen Material, so stellt man fest, daß diese Dichte nur um ein Dreißigstel der kritischen beträgt. Die Materie scheint nur sehr dünn verbreitet zu sein und das Universum auf weite Gebiete ganz leer.

Doch weisen Forschungen über die relativen Bewegungen der Galaxiehaufen auf die Existenz einer beachtlichen Menge unsichtbarer Materie hin; und während der Studienwoche war man sich einig darüber, daß Galaxien sehr wohl zehnmal mehr Dunkelmaterie enthalten können, als man gegenwärtig beobachtet. Solche Materie könnte die durchschnittliche Dichte in Richtung auf den kritischen Wert vorantreiben, der in ferner Zukunft zu einem Zusammenbruch des Universums führt.

Dunkelmaterie kann in verschiedener Form existieren. Eine Möglichkeit, über die auch während der Studienwoche diskutiert wurde, ist, daß wir es hier mit Neutrinos zu tun haben, das heißt mit Elementpartikeln, die bei dem Urknall gebildet wurden und ungeachtet ihrer im Einzel exemplar nur sehr geringen Masse aufgrund ihrer großen Anzahl zu einem wesentlichen Anstieg der im Universum enthaltenen Materie beitragen können.

Die Menge der Materie im Universum ist maßgeblich für seine Expansionsweite, und diese wiederum bestimmt die Bildung und Entwick-

lung von Galaxien und Sternen. Außerhalb eines ziemlich engen Bereiches im Ausmaß der Expansion konnte das Universum nicht die Sterne hervorgebracht haben, die ihrerseits die schweren chemikalischen Elemente gebildet haben, aus denen das Umfeld unseres Planeten und letztlich wir selbst gebildet worden sind. In einem schneller expandierenden Universum wären die Gravitationskräfte, die erforderlich waren, um die Materie zu sammeln, nicht stark genug gewesen, um den Zerstreueffekt der Expansion auszugleichen. In einem langsamer expandierenden Universum andererseits hätte das Universum gestockt und wäre in sich zusammengefallen, bevor noch die Sterne Zeit hatten, sich zu entwickeln. Es gibt Wissenschaftler, die all diese Umstände für mehr als ein zufälliges Zusammentreffen halten und die sich auf den Standpunkt des sogenannten «anthropischen Prinzips» stellen, das besagt, unser Universum sei einzigartig in dem Sinne, daß kein anderes letztlich zum Auftreten eines intelligenten Wesens in seinem Bereich führen konnte. Der Satz «Cogito, ergo mundus talis est (Ich denke, also ist die Welt so beschaffen)», ist von den Verfechtern dieses Prinzips geprägt worden. Die Koinzidenzen sind zweifellos bemerkenswert, aber die Kosmologen generell halten es nicht für notwendig, diese spezielle Auffassung zu übernehmen. Und so gehörte diese These auch nicht zu den Themen, die auf der Studienwoche behandelt wurden.

Alles in allem kann man sagen, daß die volle wissenschaftliche Evidenz von der Seite der Beobachtung wie von der Seite der Theorie her die Auffassung vom heißen Urknall als dem Anfang des Universums im großen und ganzen unterstützt. In Einzelpunkten bleiben, wie oben schon erwähnt, manche Phasen, besonders einige der frühesten, bis heute unklar. Mag auch ein Sekundenbruchteil in der menschlichen Erfahrung kein bedeutender Zeitraum sein, – für die Physik der subatomaren Teilchen ist das Gegenteil der Fall. Und die Zeit, bis zu der das Verhalten des Universums extrapoliert werden kann, wird mit Hilfe neuer Beobachtungen und eines verbesserten Verständnisses der fundamentalen Physik sicher noch weiter in die Vergangenheit vorgeschoben. Die Kosmologen beanspruchen nicht, daß sie jemals den Augenblick des aktuellen Beginns erreichen werden, obwohl es in den mathematischen Modellen von Raum und Zeit, die S.W. Hawking während der Studienwoche

entwickelt hat, vollkommen möglich ist, frühere Perioden mit in Betracht zu ziehen.

Aufgrund gelegentlicher Mißverständnisse ist es wichtig zu betonen, daß der Augenblick, in dem die Expansion des Universums begann, nichts – was es auch sei – mit dem theologischen Begriff der Schöpfung zu tun hat, wo etwas aus dem Nichts ins Dasein tritt, mag es in der Zeit beginnen oder nicht. Es war bedauerlich, daß diese Unterscheidung von einem so ausgezeichneten Mathematiker wie Sir Edmund Whittaker nicht mehr beachtet wurde, als er in seinen Riddell-Vorlesungen von 1942 sagte: «Wenn wir mit rein wissenschaftlichen Methoden die Entwicklung des materiellen Universums in der Zeit zurückverfolgen, so gelangen wir schließlich zu einer kritischen Situation, jenseits derer die Naturgesetze, wie wir sie kennen, nicht wirksam gewesen sein können: offen gesagt zu einer Schöpfung. Physik und Astronomie können uns durch die Vergangenheit an den Anbeginn der Dinge führen und uns zeigen, daß dort eine Schöpfung stattgefunden haben muß.» Desgleichen in seinen Donnellan-Vorlesungen von 1946, als er erklärte: «Verschiedene Schätzungen konvergieren zu der Schlußfolgerung, daß es vor 1000 oder 10000 Millionen Jahren eine Epoche gab, an deren uns abgewandter Seite der Kosmos, wenn er überhaupt vorhanden war, in einer von jeder uns bekannten verschiedenen Form existierte, so daß hier die äußerste Grenze der Naturwissenschaft sichtbar wird. Vermutlich können wir von ihr, ohne einen Übergriff zu begehen, als der Schöpfung sprechen.»

Sir Edmund Whittakers Ideen fanden eine wohlwollende Aufnahme durch Papst Pius XII., der in einem Schreiben an die Päpstliche Akademie der Wissenschaften vom Jahre 1951 Whittakers Auffassung voll gut hieß, indem er erklärte: «So hat die Naturwissenschaft mit der für physikalische Beweisführungen charakteristischen Konkretheit die Kontingenz des Universums bestätigt und auch die wohlfundierte Schlußfolgerung auf die Epoche, in der der Kosmos aus der Hand des Schöpfers hervorging. Daher: Gott existiert! Obwohl sie keineswegs weder explizit ist noch vollständig, ist dies die Antwort, die wir von seiten der Naturwissenschaft erwartet hatten.» Die Worte des Papstes gelangten damals in eine breite Öffentlichkeit, und die ihr zugrundeliegende Fehlinterpretation wissenschaftlicher Evidenz verursachte viele Schwierigkeiten.

Als anderes Beispiel für ein Mißverständnis, das aus der Gleichsetzung des physikalischen Beginns mit der Schöpfung der Welt entstehen kann, möchten wir die völlig unnötige Kontroverse in Erinnerung bringen, die sich um die in den späten vierziger Jahren von H. Bondy, T. Gold und F. Hoyle entwickelte «Steady-state-cosmology» entzündete. In dieser Kosmologie wird das Universum als, zumindest im großen Maßstab, immer gleichbleibend angesehen und als ohne Anfang und Ende. Als Erklärung für das unbestrittene Phänomen der Ausbreitung der Galaxien im Raum führten die Autoren dieser Theorie die Idee von der «fortwährenden Schöpfung» ein. Dieser Theorie entsprechend entsteht ständig neue Materie, und zwar soviel, daß der auf die Expansion des Universums zurückzuführende Verlust ausgeglichen wird. Die Idee, daß es keinen Anfang gegeben habe, wurde günstig aufgenommen von allen, die meinten, damit würde die Notwendigkeit einer Schöpfung aufgehoben. Sie sagte damals auch einigen Astronomen zu, da sie die damals existierende, bald darauf aber anderweitig erklärte Diskrepanz zwischen dem Alter des Gesamtuniversums und dem jeweiligen Alter einiger seiner Bestandteile zu umgehen schien. Die «Steady-state-Theorie» mußte dann aber aufgrund verschiedener Beobachtungsergebnisse aufgegeben werden, obwohl dadurch in manchen Kreisen Verwirrung entstand im Hinblick auf ihre sogenannten philosophischen und theologischen Implikationen.

Die beiden Fragen, die nichts miteinander zu tun haben, nämlich nach dem Beginn des physikalischen Universums und nach der Schöpfung sowie nach ihrem Verhältnis zueinander sind seit den Tagen Whittakers oft diskutiert worden. Erwähnen können wir in diesem Zusammenhang vor allem E. L. Mascalls «Christian Theology and Natural Science» aus dem Jahr 1956 oder Stanley L. Jakis «Cosmos and Creator» (1980). Zur Frage nach dem Beginn in der Zeit zitiert Mascall aus der *Summa contra Gentiles* von Thomas von Aquin, wo dieses Thema ganz einfach behandelt ist: «Gott brachte Schöpfung und Zeit gemeinsam ins Dasein», und nicht weniger klar: «Die Erhaltung aller Dinge durch Gott geschieht nicht durch irgendeine neue Handlung, sondern durch eine Fortführung jener Handlung, durch die er Existenz verleiht; und diese Handlung ist ohne Änderung und ohne Zeit.»

Aus dem Englischen übersetzt von Karlhermann Bergner

## HERMANN BRÜCK

Nach seiner Arbeit am Einstein-Institut und am Astrophysikalischen Observatorium in Potsdam und einem Jahr an der Sternwarte des Vatikans ging er 1937 nach Cambridge in England, wo er Assistant Director der Sternwarte und Inhaber des John Couch Adams-Lehrstuhls für Astronomie wurde. 1947 ging er nach Irland, wo er Senior Professor am Dublin Institute for Advanced Studies und Direktor des Dunsink Observatory wurde. 1957 ging er nach Schottland, wo er Astronomer Royal for Scotland und Regius Professor

of Astronomy an der Universität Edinburgh war. Seit 1975 Professor emeritus. Seit 1955 Mitglied der Päpstlichen Akademie der Wissenschaften; seit 1964 auch Mitglied von deren Akademischem Rat. Veröffentlichungen: Zahlreiche Aufsätze über Astrophysik und Stellare Astronomie in wissenschaftlichen Zeitschriften und Publikationen von Sternwarten. Neueste Veröffentlichung (zus. mit G.V. Coyne und M.S. Longair als Hg.): *Astrophysical Cosmology and Fundamental Physics*. Pontificia Academia Scientiarum 1982. 600 Seiten. Anschrift: Craigower, Penicuik Midlothian, EH26 9LA, Großbritannien.

Mary Hesse

## Kosmologie als Mythos

Vom naturwissenschaftlichen Standpunkt aus beruht der Konflikt zwischen der christlichen Lehre von der Schöpfung und der naturwissenschaftlichen Kosmologie auf einer bestimmten Philosophie von Naturwissenschaft, die in Hinblick auf die wissenschaftliche Theorie realistisch und in Hinblick auf die Wahrheit objektivistisch ist. Darum wurde die naturwissenschaftliche Kosmologie auf der einen Seite als ontologisch in ihren Voraussetzungen betrachtet und auf der anderen Seite der Begriff des Mythos als das Gegenteil von Tatsache und Wahrheit abgewertet. Die Betrachtung des Konflikts vom philosophischen Standpunkt aus macht daher eine Untersuchung der beiden Voraussetzungen notwendig.

### *I. Realismus*

Seit den Anfängen der modernen Naturwissenschaft im 17. Jahrhundert haben Naturwissenschaftler und Philosophen in gleicher Weise für sich in Anspruch genommen, die entscheidende Methode zur Erlangung von Wissen über die Wirklichkeit zu besitzen. Im 17. Jahrhundert nahm diese Sicht die Form eines dogmatischen Mechanismus an – die natürliche Wirklichkeit ist

nichts als Materie in Bewegung, und es ist die Aufgabe der Naturwissenschaft, die korpuskularen Systeme unterhalb des Beobachtungsniveaus zu entdecken, die die vielfältigen beobachtbaren Phänomene erklären würden. Der gleiche Realismus gegenüber theoretischer Entdeckung steht hinter Ansprüchen des 19. Jahrhunderts, daß die Naturwissenschaft bewiesen habe, die Natur sei sowohl mechanistisch wie auch deterministisch unterworfen dem strengen Regiment der Newtonschen Bewegungsgesetze.

Zwei Entwicklungen im zwanzigsten Jahrhundert haben diese Sicht als unhaltbar entlarvt. Die erste kommt aus der Zurückweisung der mechanistischen und der deterministischen Sicht durch die moderne Physik, die grundlegenden Naturgesetze sind nicht mehr die von Newton, sondern die der Relativität und der Quantenphysik. Diese sind für widerstreitende Interpretationen offener, als die Newtonschen es je waren, und vor allem die Quantenphysik hat der Newtonschen Theorie widersprochen, daß alle physikalischen Prozesse durch Gesetze und die Summe der Initialbedingungen in jedem gegebenen Zeitpunkt determiniert sind.

Zweitens hat die philosophische Betrachtung der Naturwissenschaft eine klare Unterscheidung gebracht zwischen dem Anspruch auf der einen Seite, daß die naturwissenschaftliche Theorie idealerweise eine realistische und umfassende Beschreibung der natürlichen Welt sei, und dem Faktum auf der anderen Seite, daß die Naturwissenschaft im allgemeinen immer erfolgreicher korrekte Erwartungen hinsichtlich des Funktionierens der natürlichen Welt bereitstellt. Dieser instrumentelle Erfolg der Naturwissenschaft ist