

*Tohuwabohu – der chaotische Beginn*

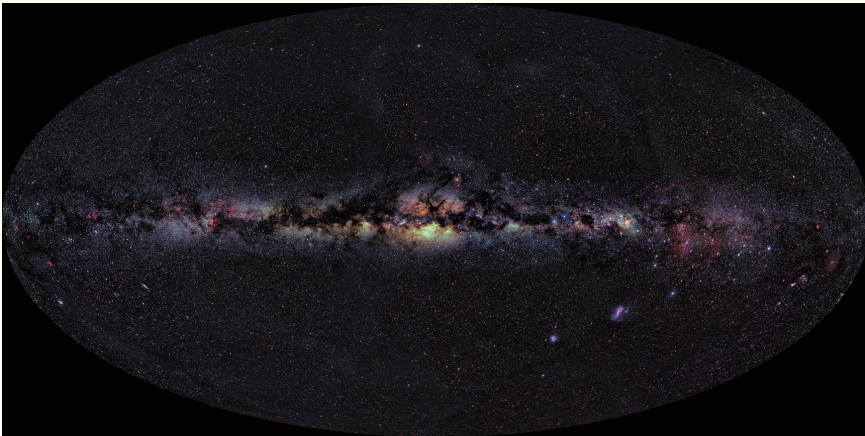
«Am Anfang schuf Gott Himmel und Erde. Und die Erde war wüst und leer, und es war finster auf der Tiefe; und der Geist Gottes schwebte auf dem Wasser.»<sup>1</sup> Erstaunlicherweise ist der Anfang der Schöpfungsgeschichte aus dem ersten Buch Mose, abgesehen von einigen wichtigen Details, gar nicht so weit entfernt vom Beginn des Universums, wie ihn sich Astrophysiker und Kosmologen heute vorstellen. Der hebräische Ausdruck «Tohuwabohu», der in der deutschen Version der Bibel mit «wüst und leer» übersetzt wurde, ist heute ein Synonym für Chaos und Wirrwarr. Tatsächlich geht die moderne Kosmologie davon aus, dass unser Universum in einer chaotischen, inflationären Aufblähung aus dem Nichts entstanden ist. Wenn die neuesten astrophysikalischen Erkenntnisse richtig sind, müssen wir uns mit dem Gedanken anfreunden, dass das, was wir als «Nichts» bezeichnen, das Vakuum also, den höchsten Energiezustand im Universum darstellt. Dieses Nichts ist an manchen Stellen bis zum Zerreißen mit einer Spannung erfüllt, ähnlich wie die aufgezoogene Feder in einem Uhrengehäuse oder die Schoten der «Rühr-mich-nicht-an»-Pflanze. Die kleinste Störung, der Hauch einer Berührung führt dazu, dass die Schoten aufplatzen und die Samen sich mit Macht in alle Winde zerstreuen. Im übertragenen Sinn kann man sich den Urknall wie ein derartiges Aufplatzen vorstellen. Die Spannung des Raums, die in diesem Bild zur Entstehung des Universums führt, wird auf eine bisher noch nicht verstandene Kraft zurückgeführt, das sogenannte Higgs-Feld. Ob das etwas mit der vor kurzem entdeckten Dunklen Energie zu tun hat, wissen wir noch nicht, doch hat die Dunkle Energie heutigen Vorstellungen nach ebenfalls eine exponentiell be-

schleunigte Ausdehnung des Kosmos zur Folge. Die Erkenntnisse über dieses Tohuwabohu haben eine lange, wechselvolle Geschichte, in der unsere eigene Milchstraße eine wichtige Rolle spielt.

Wenn wir einmal das Glück haben, in einer dunklen, sternklaren Nacht an den Himmel zu blicken, sehen wir das helle Band der Milchstraße über uns. Abbildung 1 zeigt das Panorama des gesamten Himmels. Das helle Band, das sich quer über das Firmament zieht, ist unsere Milchstraße. In der Mitte des Bildes befindet sich das Galaktische Zentrum, für das unbewehrte Auge unsichtbar, weil es von dunklen Staubwolken verdeckt ist. Als Galileo Galilei im Jahr 1609 das erste Mal ein Fernrohr auf die Milchstraße richtete, stellte er fest, dass das schwache Leuchten aus Tausenden von Sternen besteht. Wir scheinen uns mitten in einer Scheibe aus Milliarden von Sternen zu befinden. Fast alle Objekte, die wir mit bloßem Auge am Nachthimmel sehen, sind Sterne unserer Milchstraße – der Galaxis. Nur in der rechten unteren Hälfte des Bildes sind zwei kleine Nebelflecken zu erkennen, von denen

1 Panorama des gesamten Himmels im sichtbaren Licht. In der Mitte der Abbildung befindet sich das Galaktische Zentrum. Die Milchstraßenebene ist als helles, von Dunkelwolken durchzogenes Band erkennbar.

der Seefahrer Magellan 1521 berichtete. Anders als die Astronomen vor einhundert Jahren wissen wir heute, dass die Magellan'schen Wolken zwei kleine, nahe der Milchstraße gelegene, eigenständige Galaxien sind.





Könnten wir uns über die Ebene der Milchstraße hinaus erheben, würden wir feststellen, dass unsere Galaxis ein gigantisches Spiralrad aus Sternen und Gasnebeln ist, ähnlich der wunderschönen Spiralgalaxie NGC 1232 in Abbildung 2, dem ersten Bild, das mit dem ersten *Very Large Telescope* (VLT) der Europäischen Südsternwarte ESO in der chilenischen Atacama-Wüste aufgenommen wurde.<sup>2</sup> Die relativ nahe Galaxie NGC 1232 beobachten wir fast genau von oben. Wie an Perlenschnüren aufgereiht sieht man die jungen, blauen Sterne in den Spiralarmen der Galaxie, während im Zentrum die älteren, roten Sterne vorherrschen. Insgesamt gibt es in der Milchstraße oder anderen typischen Spiralgalaxien etwa 100 Milliarden Sterne. Wir wissen inzwischen

2 Das «Erste Licht» des *Very Large Telescope* der Europäischen Südsternwarte auf dem Cerro Paranal in Chile. Das Bild zeigt die Spiralgalaxie NGC 1232, die wir fast exakt von oben sehen.

auch, dass unser Sonnensystem zwischen zwei der äußeren Spiralarme der Galaxis liegt; was wir als «Milchstraße» sehen, sind die Sterne, Gas- und Staubwolken der uns umgebenden Spiralarme.

Über Jahrhunderte galt der gestirnte Himmel über uns als unvergänglich, lediglich unterbrochen vom regelmäßigen Lauf der Wandelsterne und manchmal durch das unheilsschwangere Auftauchen von Kometen oder «Gaststernen», die für wenige Wochen erschienen. Noch für die meisten astronomischen Zeitgenossen Einsteins bestand das Universum einzig und allein aus dem Band der Milchstraße, das seit dem Anfang aller Zeiten existiert haben musste und auch in alle Ewigkeit weiterbestehen würde. Man glaubte damals, dass die Sonne ziemlich genau in der Mitte dieses Kosmos stünde, unter anderem deshalb, weil das galaktische Band rund um den Himmel in alle Richtungen sehr ähnlich aussieht, weil man in jede Richtung etwa die gleiche Anzahl von Sternen zählt und weil sich die Sterne untereinander nur relativ langsam bewegen. Man glaubte allerdings, dass dieser Kosmos zwar zeitlich ohne Anfang und Ende, dafür aber räumlich durchaus begrenzt sei.

Als Albert Einstein im Jahr 1915 die erste Version der Allgemeinen Relativitätstheorie aufgestellt hatte, realisierte er, dass die Lösungen seiner Feldgleichungen kein statisches, räumlich begrenztes Universum erlaubten, sondern eines, das entweder in sich zusammenstürzen oder auseinanderfliegen müsste. Man kann verstehen, welches Unbehagen die Vorstellung eines instabilen, dynamischen Universums damals ausgelöst hat. Deshalb sah sich Einstein dazu veranlasst, im Jahr 1917 ein zusätzliches, stabilisierendes Glied in seine Gleichungen einzubauen, die sogenannte *Kosmologische Konstante*  $\Lambda$ . In einem Brief an Paul Ehrenfest schrieb er im Februar 1917: «Ich habe wieder etwas verbrochen in der Gravitationstheorie, was mich ein wenig in Gefahr bringt, in ein Tollhaus interniert zu werden.»<sup>3</sup> Diese Konstante kann man sich als eine Art abstoßende Wirkung – eine Anti-Gravitationskraft – vorstellen: Wenn ich einen Stein in die Höhe werfe, wird dieser durch die Schwerkraft angezogen und kommt wieder auf die Erde zurück (oder, wenn ich ihn mit einem Raketenantrieb ausstatte, kann er die Erde verlassen). Die abstoßende Kosmologische Konstante würde jedoch

dazu führen, dass der Stein ab einer gewissen Entfernung von der Erde beschleunigt und mit steigendem Abstand immer schneller würde. Der Wert der Kosmologischen Konstante musste demnach genau so eingestellt werden, dass diese abstoßende Kraft der Anziehungskraft der gesamten Materie im Kosmos exakt die Waage hält und damit ein statisches Universum ermöglicht. Um bei dem Beispiel des Steins zu bleiben, so müsste dieser in gewisser Entfernung von der Erde gerade zur Ruhe kommen. Wir wissen heute allerdings, dass der Kosmos selbst mit dieser Kosmologischen Konstante nicht wirklich statisch wäre. Die kleinste Störung würde ihn aus dem Gleichgewicht werfen.

Würde man alle Materie und Strahlung aus dem Kosmos entfernen – und damit aus Einsteins Gleichungen –, bliebe in letzter Konsequenz immer noch die Kosmologische Konstante übrig. Das Nichts wäre gleichmäßig mit einer Substanz gefüllt. Mit diesem Problem schlugen sich Einstein und seine mit ihm im regen wissenschaftlichen Austausch stehenden Zeitgenossen über viele Jahre herum. Einstein selbst, der stark von dem Philosophen Ernst Mach beeinflusst war, hatte ursprünglich das Mach'sche Prinzip postuliert, nach dem der Raum nur durch die Materie geschaffen wird. In einem Brief vom Januar 1916 an Karl Schwarzschild, den wir später noch im Zusammenhang mit den Schwarzen Löchern genauer kennenlernen werden, schreibt er: «Man kann es scherzhaft so ausdrücken: Wenn ich alle Dinge aus der Welt verschwinden lasse, so bleibt nach Newton der Galileische Trägheitsraum, nach meiner Auffassung aber *nichts* übrig.»<sup>4</sup> Er glaubte, das Mach'sche Prinzip müsse zwischen vernünftigen und unvernünftigen Lösungen seiner Feldgleichungen auswählen. Der holländische Astronom und spätere Direktor der Sternwarte in Leiden, Willem de Sitter, hatte dagegen bereits im Jahr der Veröffentlichung der Allgemeinen Relativitätstheorie eine Lösung der Einstein'schen Feldgleichungen für ein von einer Kosmologischen Konstante dominiertes, massefreies Universum publiziert. Einstein kritisierte natürlich umgehend die von seinem Gegenspieler angegebene Lösung der Gravitationsgleichungen. Erst viel später wurde realisiert, dass sich ein derartiges de-Sitter-Universum exponentiell

ausdehnen müsste, was im Rahmen der weiter unten beschriebenen Inflationstheorie noch sehr wichtig werden wird. Im Jahr 1921 veröffentlichte der russische Meteorologe Alexander Friedman allgemeine Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen, die zeigten, dass der Kosmos, mit oder ohne Kosmologische Konstante, expandieren oder kontrahieren kann, je nachdem, welche Parameter man in die Gleichungen einsetzt. Einstein, der den dynamischen Lösungen seiner Gleichungen von Anfang an mit großer Skepsis begegnete, glaubte ursprünglich, einen Rechenfehler in Friedmans Lösungen gefunden zu haben, musste diesem dann aber 1923 doch Recht geben, was sein Vertrauen in das Mach'sche Prinzip deutlich erschütterte.<sup>5</sup>

Die Allgemeine Relativitätstheorie hatte zu Beginn ausschließlich astronomische Anwendungen. Ihre Feuertaufe bestand sie durch Einsteins Erklärung der bis dato unverstandenen astronomischen Beobachtungen zur Drehung der Merkurbahn. Die im Jahr 1919 von Sir Arthur Eddington, dem englischen Hofastronomen, zum ersten Mal durchgeführte Messung der Gravitationsablenkung von Lichtstrahlen am Sonnenrand machte Einstein über Nacht weltweit berühmt. Anders als beispielsweise de Sitter war Einstein jedoch zunächst wenig an den Auswirkungen interessiert, welche die dramatischen Entwicklungen der beobachtenden Astronomie Anfang des letzten Jahrhunderts auf seine Theorie haben würden. Um 1920 kulminierte ein Streit unter den Astronomen, der eine zweite Kopernikanische Wende in unserem Verständnis des Kosmos einleiten sollte: die «Welteninsel-Debatte». Bereits Ende des 18. Jahrhunderts hatte sich Immanuel Kant gefragt, ob einige der elliptischen diffusen Nebelflecken, die man beim Blick durch ein großes Teleskop überall zwischen den Sternen entdecken konnte, möglicherweise aus eigenständigen, weit entfernten scheibenförmigen Sternsystemen bestehen, eben den Welteninseln («Island Universes»), oder aber aus leuchtenden Gaswolken in unserer Milchstraße, etwa dem Großen Nebel im Sternbild Orion.

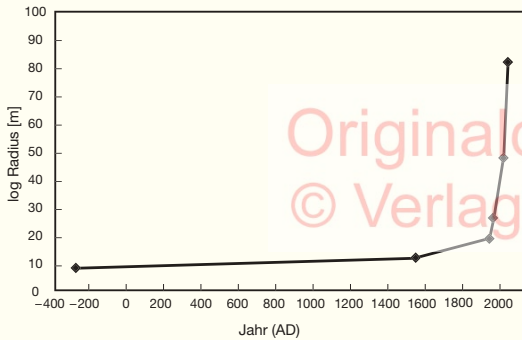
Der Astronom Julius Scheiner hatte schon im Jahr 1899 am Astrophysikalischen Observatorium Potsdam ein Spektrum des An-

dromeda-Nebels aufgenommen und festgestellt, dass die Lichtverteilung dieses Nebels derjenigen der Sonne sehr ähnlich ist.<sup>6</sup> Er schloss daraus, dass der Spiralnebel im Sternbild Andromeda wie unsere Milchstraße ein System aus Sternen sein müsse. Er ließ sich sogar zu der Vorhersage inspirieren, unsere Milchstraße müsse ebenfalls eine Spiralstruktur besitzen, womit er seiner Zeit weit voraus war. Die Astronomen der damaligen Zeit waren diesem Ergebnis gegenüber sehr skeptisch oder ignorierten es einfach. In einer Veröffentlichung aus dem Jahr 1909 beschwerte sich Scheiner über den Direktor seines Observatoriums, Hermann Carl Vogel, der mehrere seiner Arbeiten nicht für Wert befunden hatte, in das Nachschlagewerk *Populäre Astronomie* aufgenommen zu werden.<sup>7</sup> In der gleichen Notiz beklagte er sich auch über den Kollegen Edward Arthur Fath aus Pasadena, der geschlossen hatte, Scheiners Spektrum müsse wohl so schwach gewesen sein, dass an seiner Interpretation Zweifel angebracht wären, aber aus seiner eigenen Arbeit dennoch zur gleichen Schlussfolgerung gelangt war. Erst 1995 wurde Scheiner endgültig rehabilitiert, als es Hans Oleak, einem meiner Kollegen am Astrophysikalischen Institut Potsdam, gelang, Scheiners inzwischen fast vollständig verblasste originale Photoplatte auf einer modernen Maschine zu digitalisieren und seine Aussagen vollauf zu bestätigen.<sup>8</sup>

Im Jahr 1920 fand in der Nationalen Akademie der Wissenschaften in Washington die berühmte «Great Debate» zwischen den beiden amerikanischen Astronomen Heber D. Curtis und Harlow Shapley statt, die sich über die Natur der Nebel stritten. Curtis war der Meinung, die Nebel seien Gaswolken in der Milchstraße, während Shapley sie als eigene Insel-Universen aus unzähligen Sternen ansah. Wie sich herausstellte, hatten die Vertreter beider Lager Recht. Eines der schwierigsten Probleme in der Astronomie liegt nämlich in der Bestimmung der Entfernung zu den Himmelskörpern, und damals war es noch nicht möglich, die Entfernung der Nebel hinreichend genau zu bestimmen. Mit immer besseren Teleskopen gelang es, in einigen der Nebel einzelne helle Sterne aufzulösen, während sich andere Nebel tatsächlich als Gaswolken herausstellten.

Die amerikanische Astronomin Henrietta Leavitt hatte 1912 in einer langjährigen Arbeit an einer Gruppe variabler Sterne in den Magellan'schen Wolken gezeigt, dass deren Pulsationsperiode direkt von ihrer Leuchtkraft abhängt. Aus dieser Tatsache konnte man eine neue Technik zur Bestimmung von Entfernungen entwickeln, die sogenannte Cepheiden-Methode. Bereits im Jahr 1913 schätzte der in Potsdam arbeitende dänische Astronom Ejnar Hertzsprung mit Hilfe des variablen Sterns Delta Cephei, nach dem die Methode benannt ist, die Entfernung zur Kleinen Magellan'schen Wolke ab und kam zu der seinerzeit außerordentlichen Schlussfolgerung, dass dieser Nebel ein Sternsystem außerhalb unserer Milchstraße – also eine eigene Welteninsel – sein muss. Die von ihm damals angegebene Entfernung, etwa 3000 Lichtjahre, war aber vermutlich wegen eines Rechenfehlers lächerlich klein ausgefallen, so dass die eigentlich bahnbrechende Arbeit international kaum beachtet wurde. Der Durchbruch und das Ende der Welteninsel-Debatte kam erst 1929 mit Edwin Powell Hubble, der mit Hilfe des damals größten Teleskops, des 2,3-Meter-Spiegels auf dem Mount-Wilson-Observatorium, im Nebel Messier 31 einzelne Cepheiden-Sterne beobachtete und damit Scheiners Vermutung beweisen konnte, dass dieses kleine diffuse, nur mit dem Feldstecher sichtbare Nebelfleckchen im nördlichen Sternbild Andromeda in Wirklichkeit ein riesiges Sternsystem darstellt, vergleichbar unserer eigenen Milchstraße, aber in der gigantischen Entfernung von 2,1 Millionen Lichtjahren. Seit dieser Zeit gibt es den Begriff «extragalaktisch», also außerhalb unserer Milchstraße gelegen. Parallel dazu zeigte Harlow Shapley durch die Entfernungsbestimmung von Kugelsternhaufen, ebenfalls am Mount Wilson, dass die Sonne gar nicht im Zentrum unserer Milchstraße, sondern vielmehr am Rand ihrer Scheibe beheimatet ist. Damit war das Universum mit einem Schlag um ein Vielfaches größer geworden, und wieder einmal, wie bereits bei Nikolaus Kopernikus, wurde der Mensch aus dem Zentrum seines Universums vertrieben. Abbildung 3 zeigt, wie sich die Erkenntnis über die Größe unseres Weltalls mit der Zeit dramatisch geändert hat.





Mit dem Namen von Edwin Hubble ist aber ein noch viel größerer Durchbruch verbunden, und dieser bringt uns zurück zu Einstein. Ähnlich wie die Polizei die Geschwindigkeit von Temposündern in einer Radarfalle bestimmt, kann man auch die Bewegungsgeschwindigkeiten von Galaxien messen. Dies ist analog zu dem von dem österreichischen Physiker Christian Doppler 1842 entdeckten Effekt, dass sich die Frequenz von Schall- oder Lichtwellen mit der Geschwindigkeit des Objektes ändert. Besonders gut lässt sich das an vorbeifahrenden Polizeiautos beobachten, deren Tatütata beim Herannahen deutlich höher erscheint als beim Wegfahren. Noch schöner ist der Effekt allerdings bei Formel-1 Rennen, wo der Zuschauer das charakteristische Wrrroam der vorbeirasenden Rennwagen hört. Überlegen Sie einmal, was Michael Schumacher selbst hörte, wenn er in seinem Boliden über die Piste raste!

Teilt man das Licht eines Sterns mit einem Prisma oder einem fein geritzten Gitter in seine Regenbogenfarben auf, lassen sich in diesem sogenannten Spektrum dunkle Linien erkennen, die Fraunhofer'schen Spektrallinien, die von einzelnen chemischen Elementen in den Atmosphären der Sterne stammen. Bereits seit 1912 hatte der amerikanische Astronom Vesto M. Slipher am Lowell-Observatorium in Arizona in einigen Galaxien eine Verschiebung dieser Spektrallinien zum roten Teil des Spektrums hin gefunden,

3 Die bekannte Größe des Weltalls als Funktion der Zeit. Mehrere Kopernikanische Wenden haben das bekannte Weltall dramatisch vergrößert: Um 1500 zeigte Kopernikus, dass nicht die Erde, sondern die Sonne den Mittelpunkt des Sonnensystems darstellt. Noch bis 1920 glaubten die Astronomen jedoch, dass sich die Sonne im Mittelpunkt der Milchstraße befindet. Erst Shapley bewies, dass die Sonne am Rande unserer Milchstraße beheimatet ist, und Hubble stellte 1929 fest, dass unsere Milchstraße nur eine unter vielen Welteninseln ist. Durch die Inflationstheorie und die beschleunigte Ausdehnung haben sich die Grenzen des Universums abermals wesentlich weiter hinausgeschoben. Aus der Kurve ist bisher noch kein Ende abzusehen.

und bis 1928 hatte er etwa vierzig «Rotverschiebungen» gemessen. Der schon erwähnte Willem de Sitter interpretierte diese Rotverschiebungen als Erster als Doppler-Verschiebungen, die Fluchtgeschwindigkeiten von etlichen hundert Kilometern pro Sekunde entsprechen, und baute sie in sein Modell des expandierenden Kosmos ein. Für eine kurze Zeit waren diese Rotverschiebungen als de-Sitter-Effekt bekannt und spielten auch eine wichtige Rolle in der Großen Debatte von 1920. Im Jahr 1923 kombinierte der Kieler Astronom Carl Wirtz Sliphers Rotverschiebungsmessungen mit Entfernungsschätzungen, die auf der Größe der Spiralnebel basierten, und schlug als Erster einen linearen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der Entfernung der Galaxien vor. Mit Hilfe der Cepheiden-Methode bestimmte Edwin Hubble 1924 die Entfernung zum Andromeda-Nebel. Fünf Jahre später hatte er die Entfernung zu 18 Galaxien bestimmt und stellte ebenso wie Wirtz eine annähernd lineare Beziehung mit der Rotverschiebung fest. Zusammen mit seinem Nachtassistenten Milton Humason veröffentlichte er 1931 eine wesentlich erweiterte, überzeugendere Stichprobe.<sup>9</sup> Daraus ergab sich, dass sich fast alle Galaxien von uns wegbewegen, und zwar umso schneller, je weiter sie von uns entfernt sind. Unsere Nachbargalaxie, der Andromeda-Nebel, ist demgegenüber eine der wenigen Galaxien, die sich auf uns zu bewegen, und zwar mit etwa 150 km/s. Das wird gegen Ende dieses Buches noch eine wichtige Rolle spielen.

Die Entdeckung der Galaxienfluchtbewegung ist eines von mehreren Beispielen dafür, dass der Ruhm für eine astronomische Beobachtung nicht notwendigerweise all den Personen zuteil wird, denen er eigentlich gebührt. Die Idee eines expandierenden Universums, das aus einem «Ur-Atom» hervorging, hatte bereits 1927 der Jesuit Georges-Henri Lemaître veröffentlicht. Der katholische Priester aus Belgien, der gleichzeitig als Astronom ein Schüler von Harlow Shapley war, hatte damit in die kosmologischen Modelle eine Art Schöpfungsakt eingebracht. Schaut man sich im Nachhinein das berühmte Hubble-Diagramm aus dem Jahr 1929 an, so ist es schwer, eine signifikante Korrelation zwischen Geschwindigkeit und Entfernung festzustellen, und man versteht die von Ste-

ven Weinberg formulierten Zweifel daran, ob der Ruhm für diese Entdeckung nicht auch mit den Namen von Slipher, Wirtz, Humason und Lemaître in Verbindung gebracht werden muss.<sup>10</sup> Die Schlussfolgerungen aus diesen Beobachtungen waren jedoch kolossal: Der Kosmos dehnt sich tatsächlich aus! Wie die Rosinen in einem Hefekuchen, der beim Backen aufgeht, bewegen sich alle Galaxien voneinander weg, und zwar mit einer Geschwindigkeit, die umso größer ist, je weiter sie auseinanderliegen. Dies legt den Schluss nahe, dass in der Frühzeit des Kosmos alle Materie einmal sehr nahe beieinandergestanden haben musste – das Urknall-Modell war geboren. Das Alter des Kosmos lässt sich direkt aus der Expansionsrate abschätzen: Je schneller die Galaxien auseinanderfliegen, desto kürzer muss die Zeit seit dem Urknall sein (siehe Abbildung 11). Leider war die Hubble-Konstante ursprünglich deutlich zu groß ausgefallen, was zunächst auf ein viel zu kleines Weltalter von nur 2 Milliarden Jahren deutete.

Einstein muss wohl in den Jahren seit 1917 diese atemberaubenden Entwicklungen in der Astronomie mitbekommen haben. Er war aber immer noch von seinem statischen Kosmos überzeugt, obwohl er inzwischen vereinzelt Zweifel am Mach'schen Prinzip geäußert hatte. Noch 1927 wies er auf dem Solvay-Kongress in Brüssel die Lösungen für expandierende Universen zurück und sagte zu Lemaître: «Vos calculs sont corrects, mais votre physique est abominable» (Ihre Rechnungen sind korrekt, aber Ihre Physik ist abscheulich).<sup>11</sup> Im Jahr 1931 besuchte er auf einer Reise in die Vereinigten Staaten von Amerika auch das California Institute of Technology und das Mount-Wilson-Observatorium, an dem Hubble und Humason ihre Entdeckung gemacht hatten. Abbildung 4 zeigt ein sehr schönes Foto von diesem Besuch, auf dem Einstein durch das Okular des 2,3-Meter-Teleskops schaut und Edwin Hubble im Hintergrund seine Pfeife raucht. Erst auf dieser Reise wurde Einstein klar, dass mit der Fluchtbewegung der Galaxien sein Bild vom statischen Universum endgültig zerstört war. Mit der Ausdehnung des Universums war der ursprüngliche Grund für die Einführung der Kosmologischen Konstante obsolet geworden. Fast unmittelbar nach seiner Rückkehr nach Berlin

4 Albert Einstein mit Edwin Hubble und Walter Adams (von links nach rechts) im Jahr 1931 bei einem Blick durch das 100"-Teleskop auf dem Mount Wilson, an dem Hubble und Kollegen zwei Jahre zuvor die Expansion des Universums entdeckt hatten.<sup>12</sup>



hielt er einen Vortrag in der Preußischen Akademie der Wissenschaften, in dem er mitteilte, seine Annahme eines statischen Universums sei durch Hubbles Messungen unhaltbar geworden, und seine ursprünglichen Gleichungen – ohne Kosmologische Konstante – würden den expandierenden Kosmos auf einfache Weise beschreiben. Im Jahr 1932 schrieb er zusammen mit seinem ursprünglichen Kontrahenten Willem de Sitter eine gemeinsame Arbeit über das expandierende Universum als Lösung seiner ursprünglichen Feldgleichungen. Viele Jahre später – bereits 1933 war er auf der Flucht vor den Nazis in den Vereinigten Staaten geblieben – schrieb er: «Wenn die Hubble-Expansion zu der Zeit, als ich die Allgemeine Relativitätstheorie entwickelt hatte, bereits bekannt gewesen wäre, wäre die Kosmologische Konstante nie eingeführt worden.»<sup>13</sup> Der berühmte Astrophysiker George Gamow, ein Kollege aus der Zeit Einsteins in Princeton, den wir im Zusammenhang mit dem heißen Urknall-Modell noch kennenlernen werden, schreibt in seiner 1970 posthum veröffentlichten Autobiographie: «... Also war Einsteins ursprüngliche Gravitationsgleichung korrekt, und sie zu ändern war ein Fehler. Als ich viel später mit Einstein kosmologische Probleme erörterte, bemerkte er, dass die Einführung der Kosmologischen Konstante die ‹größte Eselei› seines Lebens gewesen sei (the biggest blunder he ever made in his life). Aber diese von Einstein verworfene ‹Eselei› wird sogar heute im-

mer noch manchmal von Kosmologen verwendet, und die Kosmologische Konstante  $\Lambda$  hebt ihr hässliches Haupt wieder und wieder und wieder ...»<sup>14</sup> Gamow konnte augenscheinlich die Kosmologische Konstante nicht besonders leiden. Böse Zungen behaupten, dass er froh gewesen sei, dass Einstein diese Bemerkung selbst gemacht hatte, ansonsten wäre Gamow wohl stark versucht gewesen, sie zu erfinden. Die Geschichte von seiner «größten Eselei» wurde Einstein jedenfalls nicht wieder los.

Die Tatsache, dass ohne Kosmologische Konstante das Alter des Kosmos viel geringer ausfiel als zum Beispiel das bereits bekannte Alter der Erde oder vieler Sterne, störte Einstein nicht zu sehr; er meinte, in der Astronomie müsse man vorsichtig sein mit zu großen Extrapolationen in der Zeit (womit er Recht behielt). Einige Verfechter von  $\Lambda$ , wie zum Beispiel Eddington und Lemaitre, bestanden jedoch weiterhin darauf, die Kosmologische Konstante beizubehalten, und in den sechziger und siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts wurde sie von einigen Astrophysikern wieder eingeführt. In Deutschland war der Bonner Astronom Wolfgang Priester jahrelang einer der glühenden Verfechter einer Kosmologischen Konstante. Ihre Existenz und ihre genaue Größe waren jahrzehntelang umstritten, aber man war sich einig, dass sie sehr klein sein musste. Ihre Energiedichte konnte nicht viel größer sein als einige Wasserstoffatome pro Kubikmeter. Erst kurz vor der Jahrtausendwende wurden die astronomischen Indizienbeweise so erdrückend, dass eine Art Kosmologischer Konstante dingfest gemacht werden konnte. Mehrere unabhängige Messungen deuten darauf hin, dass es tatsächlich so etwas wie eine abstoßende Gravitationskraft geben muss, die fortan als «Dunkle Energie» bezeichnet und von der Mehrheit der Astronomen akzeptiert wurde.

Hat dies etwas mit dem «Tohuwabohu» zu tun, aus dem die Welt entstanden ist? Wir wissen es heute noch nicht. Tatsächlich liegt sowohl der kosmologischen Inflation in den ersten Sekundenbruchteilen des Universums als auch der gegenwärtigen beschleunigten Ausdehnung des Kosmos eine abstoßende Kraft zugrunde, die eine exponentielle Vergrößerung des Kosmos verursacht. Ehrlich gesagt

ist die Information, die wir heute sowohl über die Inflation als auch über die Dunkle Energie haben, noch viel zu lückenhaft, um derartige Schlussfolgerungen zu ziehen. Um aber diese Frage näher zu behandeln, müssen wir uns zuerst mit den unheimlichen Quantenfluktuationen des Vakuums beschäftigen.

Originaldokument  
© Verlag C.H.Beck