

DIE GRUNDLAGEN DER KOSMOLOGIE

TOBIAS KÜHNEL UND MATTHIAS BARTELMANN

16. Mai 2003

ZUSAMMENFASSUNG

Die moderne Kosmologie beruht auf Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie, die für Nichtphysiker praktisch unzugänglich ist. Dadurch entsteht oft der Eindruck, die Kosmologie sei eine ebenso schwer verständliche Theorie. Wenige grundlegende Annahmen über das Universum vereinfachen die physikalische Beschreibung des Universums jedoch derart, dass es möglich wird, allein mit Hilfe des Newtonschen Gravitationsgesetzes zu verstehen, wie das Universum sich als Ganzes verhält und von welchen physikalischen Größen dieses Verhalten abhängt. Dadurch werden die Grundlagen der Kosmologie anschaulich und mit grundlegenden physikalischen Kenntnissen erklärbar. In diesem Artikel beschreiben wir die zwei wesentlichen Annahmen der Kosmologie und erklären, welche Vereinfachungen sich daraus ergeben und auf welches Verhalten des Universums als Ganzem daraus geschlossen werden kann.

ZWEI ANNAHMEN

Das Gebäude der Kosmologie steht auf zwei fundamentalen Annahmen. Die erste besagt, dass wir, in welche Richtung wir auch beobachten, immer dieselben Eigenschaften des Universums sähen. Diese Unabhängigkeit des Universums von der Beobachtungsrichtung heißt *Isotropie*. Die zweite besagt, dass unsere Position im Universum durch nichts ausgezeichnet sei. Diese Annahme wird oft als das kosmologische oder Kopernikanische Prinzip bezeichnet, denn in ihm spiegelt sich auf höherer Ebene, was Kopernikus tat, als er die Erde aus dem Zentrum des Sonnensystems weg versetzte.

Wenn das Universum entsprechend der ersten Annahme um uns herum isotrop ist, und wenn entsprechend der zweiten Annahme unsere Position im Universum durch nichts ausgezeichnet ist, dann muss das Universum auch um jeden anderen seiner Punkte herum isotrop sein. Wenn das so ist, dann können seine Eigenschaften nicht vom Ort abhängen, d.h. es muss dann auch homogen sein (vgl. Abb. 1).

Wenn also die beiden fundamentalen kosmologischen Annahmen stimmen, dann ist das Universum *homogen* und *isotrop*. Seine physikalischen Eigenschaften hängen dann weder vom Ort des Beobachters ab, noch von der Richtung, in die er beobachtet.

Annahmen wie diese heißen Symmetrieanahmen. Die Annahme, das Universum sei um einen Punkt isotrop, bedeutet, dass man es um diesen Punkt beliebig drehen können muss, ohne dass eine Änderung wahrnehmbar wird. Es muss also drehsymmetrisch um diesen Punkt sein. Die Annahme, das Universum sei homogen, bedeutet, dass man ebenso ohne wahrnehmbare Änderung einen Ausschnitt daraus beliebig verschieben können muss. Solche Symmetrieanahmen spielen in der Physik eine große Rolle, und wir werden gleich sehen, welche Kraft in ihnen steckt.

Auf den ersten Blick erscheint die erste Annahme, also die der Isotropie um uns herum, geradezu absurd (vgl. Abb. 2). Sehen wir nicht schon mit bloßem Auge das Band der Milchstraße hier und nicht dort, Galaxien und Galaxienhaufen an einer Stelle des Himmels, aber nicht an einer anderen? Schon Wilhelm Herschel hatte im 18. Jahrhundert bemerkt, dass ein Drittel der ihm bekannten Galaxien auf einem Achtel der Fläche des Himmels stehen, dass sie also höchst ungleichmäßig verteilt sind.

Trotzdem zeigt sich, dass der Himmel umso isotroper wird, je weiter entfernt die Objekte sind, die wir betrachten. Je größere Entfernungen wir überblicken, desto größer wird das Volumen,

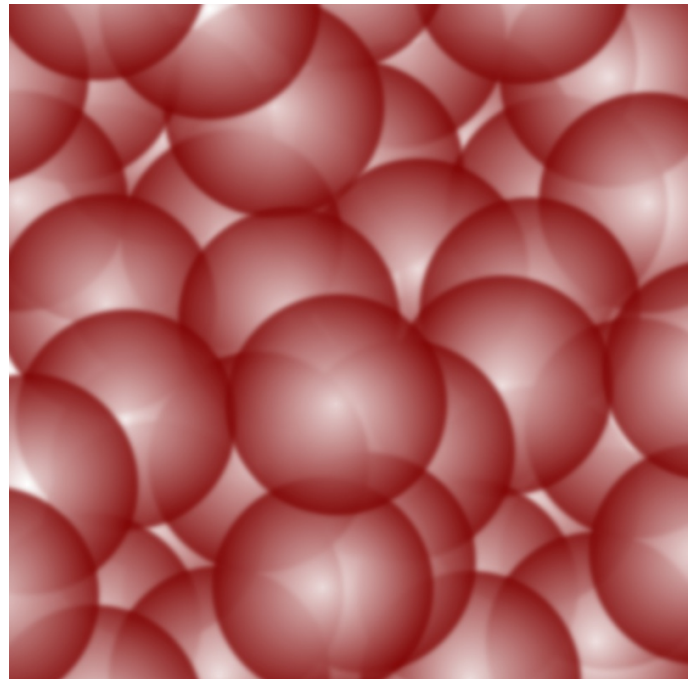


ABBILDUNG 1.—Ein Universum, das um jeden Punkt isotrop ist, ist auch homogen.

das wir betrachten. Wenn man über genügend große Volumina mittelt, dann sieht das Universum tatsächlich in jeder Richtung etwa gleich aus. Was heißt genügend groß? Es gibt Strukturen im Universum, die so genannten Leerräume (engl. *voids*), die Durchmesser von etwa 150 Millionen Lichtjahren erreichen. Der Durchmesser des beobachtbaren Universums, darauf kommen wir später noch, beträgt aber mehr als 10 Milliarden Lichtjahre. Obwohl also die Strukturen im Universum groß sind, obwohl man deshalb über sehr große Volumina mitteln muss, bevor das Universum wirklich als isotrop erscheint, ist im Universum gewissermaßen genügend Platz: Das gesamte überschaubare Universum ist erheblich größer als die größten Strukturen, die in ihm auftreten.

Das überzeugendste Argument für die Isotropie liefert der kosmische Mikrowellenhintergrund (siehe Abb. 3). Er entstand etwa 400.000 Jahre nach dem Urknall, als das Universum zum ersten Mal durchsichtig wurde, und stellt damit die am weite-



ABBILDUNG 2.—Auf den ersten Blick ist das Universum sehr ungleichmäßig strukturiert. Gebiete hoher und niedriger Galaxiendichte (im Bild hell und dunkel dargestellt) wechseln sich ab. Galaxien bilden Verdichtungen, zwischen denen weitgehend leerer Raum liegt. Das Bild zeigt den Blick in Richtung des nördlichen galaktischen Pols.

sten entfernte sichtbare Quelle überhaupt dar. Er überzieht den gesamten Himmel und ist fast perfekt isotrop. Seine mittlere Temperatur beträgt 2,726 Kelvin, knapp drei Grad über dem absoluten Nullpunkt. Die Abweichungen von dieser Temperatur betragen ein Teil in hundert Tausend, d.h. von Ort zu Ort am Himmel schwankt die Temperatur um einige zehn Mikrokkelvin. Wäre der Mikrowellenhintergrund ein Ozean von tausend Metern Tiefe, entspräche diesen Schwankungen ein Wellengang mit einer Höhe von etwa einem Zentimeter. Niemand fände es schwierig, eine derart sanfte Dünung als „spiegelglatte See“ zu bezeichnen.

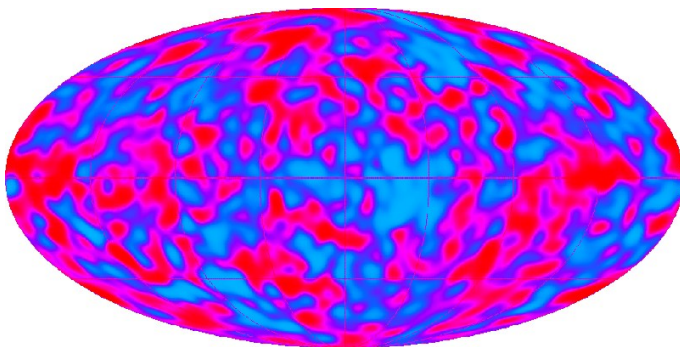


ABBILDUNG 3.—Die größte Lichtquelle am Himmel ist der so genannte Mikrowellenhintergrund. Er entstand, als das Universum etwa 400.000 Jahre nach dem Urknall so weit abgekühlt war, dass es durchsichtig wurde. Der Mikrowellenhintergrund ist in jeder Richtung fast gleich hell. Die sichtbaren Schwankungen betragen nur etwa ein hunderttausendstel seiner mittleren Helligkeit.

Nehmen wir die Isotropie um uns herum als gegeben hin, dann fällt es in der Regel überhaupt nicht schwer, auch die zweite Forderung anzunehmen, der zufolge sich unsere Positi-

on im Universum durch nichts auszeichne. Wir haben uns daran gewöhnt, zumindest nicht im kosmischen Mittelpunkt zu stehen.

Beobachtungen lassen also zu, das Universum im Großen als homogen und isotrop anzusehen. Deswegen nehmen wir uns bei der Beschreibung des Universums als Ganzem die Freiheit, es als *ideal* homogen und isotrop zu betrachten.

KRÄFTE

Die Physik kennt vier Grundkräfte, nämlich die Gravitation, die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung. Von diesen vier Arten der Wechselwirkung spielt in der Kosmologie allein die Gravitation eine Rolle. Die starke Wechselwirkung findet zwischen den Kernteilchen statt. Die schwache Wechselwirkung bestimmt im Wesentlichen die Kräfte zwischen Neutrinos und Elektronen bzw. Teilchen, die zur selben Teilchenfamilie wie die Elektronen gehören. Beide Wechselwirkungen sind viel zu kurzreichweitig, als dass sie für die Entwicklung des Universums wichtig werden könnten. Die elektromagnetische Wechselwirkung wirkt zwar über große Entfernungen, ist aber im Vergleich zur Gravitation so stark, dass sie jede Trennung von positiven und negativen elektrischen Ladungen aufzuheben sucht und sich dadurch neutralisiert. Es bleibt also allein die Gravitation als maßgebliche Kraft übrig, wenn man das Verhalten des Universums darstellen will.

Die beste Beschreibung der Gravitation, die wir haben, liefert die Allgemeine Relativitätstheorie, die Albert Einstein 1915 veröffentlichte. Sie geht zwar erheblich über Newtons Gravitationstheorie hinaus, muss aber dem Umstand Rechnung tragen, dass Newtons Theorie die Bewegungen der Planeten und Monde im Sonnensystem mit hoher Präzision zu beschreiben erlaubt. Daher muss die Newtonsche Theorie in dem Sinne einen Grenzfall der Allgemeinen Relativitätstheorie darstellen, dass für genügend kleine Systeme aus Körpern, die sich wesentlich langsamer als die Lichtgeschwindigkeit bewegen, die Newtonsche Theorie eine gute Beschreibung abgibt. Darauf kommen wir später wieder zurück. Vorerst bleibt auf einer kosmologischen Skala im Grunde nichts übrig, als nach homogenen, isotropen Lösungen der Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie zu suchen.

Trotz der erheblichen Vereinfachungen, die die Annahmen der Homogenität und Isotropie mit sich bringen, ist die Konstruktion solcher Lösungen schwierig und schließt die Kosmologie insbesondere von der Physik aus, wie sie an Schulen behandelt werden kann. Doch gerade wenn das Universum so hochgradig symmetrisch ist, dass es als homogen und isotrop angesehen werden kann, dann ist es möglich, sein Verhalten auch im Großen im Rahmen der gewöhnlichen Newtonschen Gravitationsphysik zu beschreiben. Wir zeigen nun, wie das geht.

DAS ISOLIERTE KUGELUNIVERSUM

Denken wir uns einen beliebigen Ausschnitt aus dem Universum. Da es homogen ist, können seine physikalischen Eigenschaften wie Druck oder Dichte nicht vom Ort abhängen. Es ist also vollkommen egal, wo im Universum wir den Ausschnitt wählen.

Legen wir nun in unserem Ausschnitt des Universums einen beliebigen Punkt fest. Wieder spielt es wegen der Homogenität überhaupt keine Rolle, welchen Punkt wir wählen. Denken wir uns diesen Punkt als Mittelpunkt einer Kugel mit beliebigem Radius, und schneiden wir diese Kugel aus dem Ausschnitt des Universums heraus, um sie näher zu betrachten (siehe Abb. 4).

Offensichtlich sind die physikalischen Eigenschaften der Kugel wie Druck und Dichte identisch zu denen des gesamten Ausschnitts, denn sonst wäre die Homogenität verletzt. Die Kugel

hat also eine gleichförmige Materiedichte, und in ihr herrscht ein gleichförmiger Druck. Wegen der Homogenität können Druck und Dichte auch innerhalb der Kugel höchstens von der Zeit abhängen, aber eben nicht vom Ort.

GRÖSSE IST UNWICHTIG

Das Verhalten der Kugel darf nicht davon abhängen, wie groß die Kugel ist. Wäre das so, käme man sofort in Konflikt mit der Annahme der Homogenität. Um das einzusehen, stellen wir uns eine Kugel vor, in der die Materiedichte einen bestimmten Wert annimmt, der natürlich überall gleich sein muss. Stellen wir uns weiter vor, wir würden um den Mittelpunkt der Kugel eine kleinere Kugel legen, deren Radius genau halb so groß wie der Radius der gesamten Kugel sein soll. Nun blasen wir die große Kugel auf den doppelten Radius auf. Dabei nimmt natürlich die Dichte in ihrem Inneren ab, aber wegen der Homogenität muss sie auch nach dem Aufblasen wieder überall in der Kugel gleich groß sein. Das bedeutet, dass auch der Radius der kleinen, eingeschriebenen Kugel verdoppelt werden muss. Diese Überlegung zeigt, dass die *relative* Änderung des Kugelradius nicht von dessen *absolutem* Wert abhängen darf: Sowohl die große als auch die kleine Kugel wachsen jeweils auf das Doppelte ihres ursprünglichen Radius, egal wie groß dieser war, denn anderenfalls wäre die Kugel nach dem Aufblasen nicht mehr homogen.

Wir können die Kugel also so klein oder groß wählen wie wir wollen. Solange wir lediglich die *relative* Änderung des Kugelradius betrachten, lässt sich das Verhalten einer kleinen Kugel ebenso auf das Universum übertragen wie das einer großen Kugel. Insbesondere können wir die Kugel so klein wählen, dass in ihr die Newtonsche Gravitationstheorie eine sehr gute Näherung an die Allgemeine Relativitätstheorie darstellt, wie das etwa im Sonnensystem der Fall ist. Darauf beruht die physikalische Begründung, warum das Universum im Großen letztlich mit Hilfe des Newtonschen Gravitationsgesetzes verstanden werden kann, obwohl eigentlich die Allgemeine Relativitätstheorie dazu nötig wäre.

Unser zweites wichtiges Ergebnis lautet also, dass wegen der Homogenität nur die *relative* Größenänderung der Kugel wichtig sein darf, aber nicht ihre *absolute* Größe, und dass deswegen die Kugel so klein gewählt werden darf, dass in ihr das Newtonsche Gravitationsgesetz gilt. Üblicherweise vergleicht man die Größe der Kugel mit ihrer heutigen Größe und gelangt dann zu Aussagen wie der, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Vergangenheit die Kugel entsprechend kleiner oder größer war als heute, und diese *relative* Aussage trifft dann auch auf das gesamte Universum zu.

AUSDEHNUNG UND ROTVERSCHIEBUNG

Die Homogenität verlangt also, dass nur *relative* Größenänderungen wichtig sind. Dehnt sich die betrachtete Kugel auf das Doppelte aus, wächst alles auf die doppelte Größe an, was in ihr enthalten ist, unter anderem auch die Wellenlänge des Lichts. Eine Vergrößerung der Wellenlänge auf das Doppelte bedeutet aber eine Verringerung der Energie des Photons auf die Hälfte. Zieht sich die Kugel zusammen, nimmt die Wellenlänge der Photonen im Universum im selben Maß ab, wie das Universum schrumpft. Das Ausmaß, in dem sich die *relative* Wellenlänge des Lichts ändert, gibt also ein direktes Maß dafür, in welchem Ausmaß sich die *relative* Größe des Universums ändert. Rotes Licht hat eine größere Wellenlänge als blaues Licht. Deshalb spricht man von Rotverschiebung, wenn die Wellenlänge wächst, und von Blauverschiebung, wenn sie abnimmt.

Durch diesen Zusammenhang zwischen der Wellenlänge des Lichts und der Ausdehnung des Universums wird letztere direkt messbar. Eine Lichtquelle, z.B. eine Galaxie, muss ihr Licht in der Vergangenheit abgeschickt haben, damit es uns heute erreicht. Wenn das Universum damals kleiner war als heute, wird das Licht der Galaxie auf seinem Weg zu uns im selben Maß

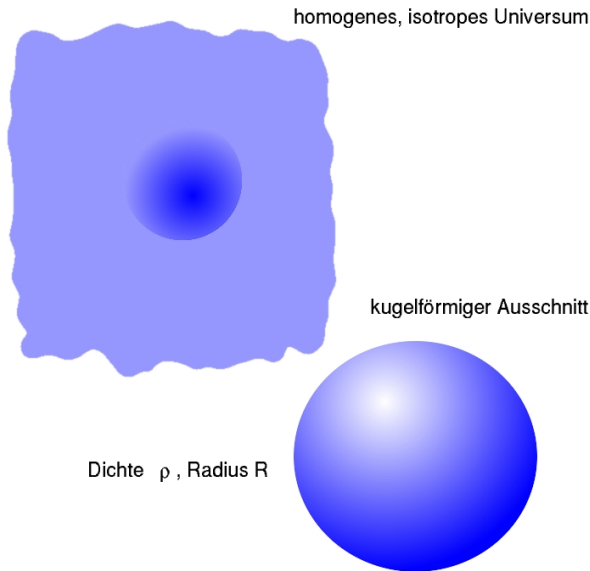


ABBILDUNG 4.—Aus dem Universum wird eine Kugel herausgeschnitten. Wegen der Homogenität des Universums hat sie eine gleichmäßige Dichte, und in ihr herrscht ein gleichmäßiger Druck. Die Umgebung der Kugel übt auf ihre Entwicklung keinen Einfluss aus, so dass die Kugel für sich allein betrachtet werden kann.

Die Isotropie, also die Unabhängigkeit von der Richtung, steuert eine entscheidende Vereinfachung bei. Fragen wir, wie die Umgebung der Kugel auf die Kugel zurück wirkt. Wie besprochen, kann sie nur aufgrund der Schwerkraft wirken. Müssen wir also die Schwerkraft aufaddieren, wie sie von der gesamten Umgebung auf die gesamte Kugel ausgeübt wird? Keineswegs, denn die Isotropie lässt nur ein eindeutiges Ergebnis zu:

Die Schwerkraft müsste aus irgendeiner Richtung wirken, sie müsste also irgendwo hin ziehen. Diese Richtung der Schwerkraft würde aber eine Richtung im Raum festlegen und damit die Isotropie verletzen. Die Schwerkraft, die die Kugel aus ihrer Umgebung erfährt, muss sich insgesamt gerade aufheben. Es bleibt also aufgrund der Isotropie nur zu folgern übrig, dass die Umgebung der Kugel *nicht* auf die Kugel wirken kann, denn anderenfalls wäre die Isotropie verletzt. Diese Überlegung ist ein Beispiel dafür, wie das Verhalten physikalischer Systeme aufgrund von Symmetrieanahmen ohne langwierige Rechnungen bestimmt werden kann.

Wir kommen also zu dem ersten wichtigen Ergebniss, dass die Kugel so betrachtet werden kann, als wäre sie isoliert und entwickle sich allein auf sich gestellt, unbeeinflusst von ihrer Umgebung. Die wesentlichen Vereinfachungen, die wir aufgrund der Annahmen von Homogenität und Isotropie gewonnen haben, bestehen also darin, dass wir das Verhalten des Universums im Großen studieren können, indem wir das Verhalten einer isolierten Kugel betrachten, die in ihrem Inneren homogen ist.

gedehnt, wie das Universum seither gewachsen ist. Die Wellenlänge der Fraunhoferlinien bei der Emission ist bekannt, da sie allein durch die Atomphysik bestimmt wird. Anhand ihrer Wellenlänge in den Spektren der Galaxien lässt sich messen, um wieviel die Wellenlänge des Lichts seit seiner Emission zu- oder abgenommen hat, und damit steht auch fest, in welchem Maß sich die Größe des Universums im selben Zeitraum verändert haben muss.

DRUCK WIRKT ANZIEHEND

Es ist bemerkenswert, wie weit wir in unseren Überlegungen gekommen sind, indem wir ausschließlich die beiden grundlegenden Symmetrieanahmen verwendet haben, ohne eine einzige Rechnung durchzuführen. Bevor wir fortfahren können, müssen wir uns aber noch einen Sachverhalt aus der Speziellen Relativitätstheorie in Erinnerung rufen, nämlich die Äquivalenz von Masse und Energie, die durch Einsteins berühmte Formel $E = mc^2$ ausgedrückt wird. Diese Äquivalenz bewirkt, dass auch der Druck eines Gases als Quelle der Gravitation wirken muss, d.h. dass der Druck eine Schwerkraft ausübt: Druck auf eine Fläche kommt dadurch zustande, dass die Gasteilchen sich bewegen und gegen die Fläche stoßen. Er ist also eine Folge der Bewegung der Teilchen und muss mit der Energie verwandt sein, die in der Teilchenbewegung steckt (siehe Abb. 5). Nach Einsteins Formel ist die Bewegungsenergie der Teilchen zu einer Masse äquivalent, und diese übt ebenso eine Schwerkraft aus wie jede andere Masse.

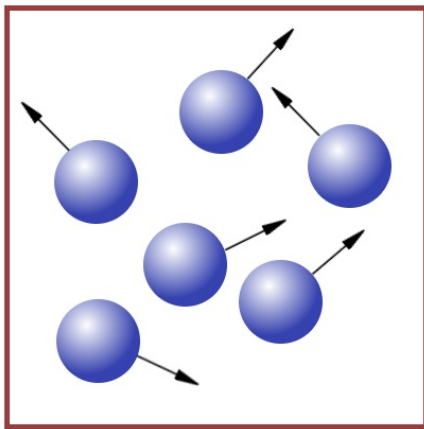


ABBILDUNG 5.—Druck kommt durch Bewegung zustande, also durch die kinetische Energie der Gasteilchen. Da nach Einsteins Formel $E = mc^2$ Energie und Masse äquivalent sind, muss auch der Druck als Quelle der Gravitationskraft wirken.

Allerdings muss der Druck eines Gases nur dann als Quelle der Gravitation berücksichtigt werden, wenn die Gasteilchen sich (beinahe) mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, wenn es sich also um ein „relativistisches Gas“ handelt; anderenfalls ist sein Beitrag vernachlässigbar klein. Das wichtigste Beispiel für ein relativistisches Gas ist eine Ansammlung von Photonen, also von Lichtteilchen. Wenn sich in unserem kugelförmigen Kleuniversum ein Gemisch von nichtrelativistischer und relativistischer Materie befindet, müssen wir bei der Bestimmung der gesamten Gravitationskraft neben der Masse den Anteil berücksichtigen, den der Druck der relativistischen Materie beiträgt.

Den weitaus größten Teil dazu steuert der Mikrowellenhintergrund bei, d.h. der relativistische Materieanteil im heutigen Universum ist fast vollständig durch den Mikrowellenhintergrund bestimmt.

WIE DIE KUGEL SICH BEWEGT

Unsere bisherigen Überlegungen zeigen, dass unsere Kugel als taugliches Modell für das Universum dienen kann. Am einfachsten lässt sich ihr Verhalten bestimmen, wenn wir annehmen, dass auf der Kugeloberfläche ein Testteilchen sitzt, das sich mit der Oberfläche der Kugel bewegt, wenn diese sich ausdehnt oder zusammenzieht. Das Testteilchen unterliegt allein der Schwerkraft, die von der Kugel auf es ausgeübt wird, und zu deren Beschreibung reicht, wie wir gesehen haben, Newtons Gravitationsgesetz.

Als weitere physikalische Bedingung kommt hinzu, dass die gesamte Energie erhalten bleiben muss, die in der Kugel eingeschlossen ist. Energie darf weder in unsere Kugel hinein noch aus ihr heraus fließen, denn dieser Fluss würde eine Richtung festlegen und damit die Isotropie verletzen. Eine Kugel, in der hoher Druck herrscht, wird sich ausdehnen und dabei abkühlen. Sie verliert dabei Wärmeenergie, gewinnt aber potentielle Energie. Jede Ausdehnung oder Kontraktion muss so verlaufen, dass der Verlust oder Gewinn an Wärmeenergie gerade durch einen entsprechenden Gewinn oder Verlust an potentieller Energie ausgeglichen wird. Das bedeutet, dass zur Beschreibung der Bewegung unseres Testteilchens auf der Kugeloberfläche neben dem Newtonschen Gravitationsgesetz auch der Energieerhaltungssatz berücksichtigt werden muss.

Diese Überlegung führt uns auf eine weitere, letzte Zutat, die zur Beschreibung unseres Kugeluniversums nötig ist. Das Ausmaß, in dem z.B. Gase ihre Dichte ändern, wenn man sie zusammenpresst, ist durchaus nicht bei allen Gasen gleich. Das klingt vielleicht überraschend, denn wir sind es gewohnt, dass die Dichte gerade auf das Doppelte ansteigt, wenn sich das Volumen halbiert. Es gibt aber Gase, in denen die Dichte stärker wächst, als das Volumen abnimmt, oder stärker abnimmt, als das Volumen zunimmt, in dem sie eingeschlossen sind. Ein Beispiel dafür ist ein Gas aus Photonen, wie etwa der Mikrowellenhintergrund eines ist. Wie der Druck eines Gases mit dessen Dichte zusammenhängt, wird durch seine Zustandsgleichung beschrieben.

Drei physikalische Zutaten sind also nötig, um unser Kugeluniversum zu beschreiben, nämlich das Newtonsche Gravitationsgesetz, der Energieerhaltungssatz und eine Zustandsgleichung für das kosmologische Material. Unter diesen Annahmen lässt sich eine Gleichung konstruieren, die unser Kugeluniversum vollständig beschreibt, und damit auch das wirkliche Universum. Diese Gleichung heißt Friedmann-Gleichung, nach dem russischen Physiker Alexander Friedmann, der sie als erster fand.

Die Friedmann-Gleichung ist eine so genannte Differentialgleichung, d.h. sie beschreibt nicht, wie das Universum beschaffen ist, sondern wie es sich ändert. Wenn man den Zustand des Universums zu einem Zeitpunkt kennt, sagt die Friedmann-Gleichung, wie es sich dorthin entwickelt hat und wie es sich weiter entwickeln wird. Um kosmologische Aussagen zu machen, muss man also den Zustand des Universums zu einem beliebigen Zeitpunkt kennen oder festlegen. Wie das geschehen kann, werden wir gleich besprechen.

DIE KOSMOLOGISCHE KONSTANTE

Stellt man sich das Verhalten unseres Kugeluniversums vor, sieht man leicht ein, dass es nicht zeitlich unveränderlich sein

kann. Nehmen wir eine Kugel, deren Dichte, Druck und Radius gerade so eingestellt sind, dass unser Testteilchen auf der ihrer Oberfläche ruht. Überlassen wir die Kugel sich selbst, wird sie sich aufgrund ihrer eigenen Schwerkraft zusammenziehen. Dadurch erhöht sich die Dichte, die Gravitationskraft wächst, und die Kugel zieht sich weiter zusammen. Ein solches Universum ist also instabil. Als zum ersten Mal bemerkt wurde, dass dies auch in der allgemein-relativistischen Kosmologie gilt, hielt man das Universum noch für statisch, also zeitlich unveränderlich. Einstein bemerkte, dass die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie durch einen einfachen Zusatzterm so verändert werden können, dass ein statisches Universum möglich wird. Überträgt man diesen Zusatzterm zurück in die Newtonsche Kosmologie, bedeutet er, dass man von der Massendichte in Newtons Gravitationsgesetz eine konstante Dichte ρ_Λ abzieht, die in etwas anderer Form als kosmologische Konstante bezeichnet wird.

Diese Operation sieht in der Newtonschen Gravitationstheorie sehr willkürlich aus, ist aber in der Allgemeinen Relativitätstheorie durch kein physikalisches Argument verboten. Der Ansatz zu einem physikalischen Verständnis der kosmologischen Konstante liegt darin, dass in der Allgemeinen Relativitätstheorie der Druck als Quelle der Gravitation wirkt, wie wir vorher gesehen haben. Nehmen wir an, es gebe eine Form von Materie, deren Druck negativ wäre, dann ließe sich die kosmologische Konstante einfach als Maß für den Druck auffassen, der durch diese Materieform beigesteuert wird. Kurioserweise hat gerade das Vakuum solche Eigenschaften. Aufgrund der Unschärferelation der Quantenmechanik kann kein Vakuum wirklich leer sein, sondern es muss so genannte Vakuumfluktuationen ausführen, in denen auch eine gewisse Energie steckt. Will man ein Vakuum vergrößern, muss man daher auch die Energie erhöhen, die im Vakuum steckt, und dazu muss man Arbeit aufwenden. Umgekehrt verringert sich die Energie eines Vakuums, wenn man sein Volumen verkleinert. Dieses Verhalten ist dem gewöhnlicher Gase genau entgegengesetzt, denn man muss Arbeit aufwenden, um ein Gas zu komprimieren. Man kann ein Vakuum so beschreiben, als hätte es einen negativen Druck, der gerade seiner Energiedichte entspricht.

Eines der wichtigsten Beobachtungsergebnisse des letzten Jahrhunderts war die Entdeckung, dass das Universum nicht statisch ist, sondern sich ausdehnt. In den zwanziger Jahren des letzten Jahrhunderts entdeckte zunächst Vesto Slipher, dass so gut wie alle Galaxien sich von uns entfernen, und dann Edwin Hubble, dass sie das umso schneller tun, je weiter sie von uns entfernt sind. Damit entfiel der eigentliche Grund für die kosmologische Konstante in Einsteins Gleichungen. Es gab nun aber keinen zwingenden Grund mehr, sie wieder daraus zu entfernen. Die kosmologische Konstante hat seitdem ein wechselvolles Schicksal durchlaufen, aber es sieht seit einigen Jahren danach aus, als würde sie tatsächlich existieren.

UNIVERSEN OHNE URKNALL

Es sei hier nur am Rande erwähnt, dass sich das Universum keineswegs immer ausgedehnt haben muss, selbst wenn es sich heute ausdehnt. Auf den ersten Blick erscheint das absurd, denn die Schwerkraft unserer Kugel wird das Testteilchen auf ihrer Oberfläche immer zum Mittelpunkt hin ziehen und damit die Ausdehnung der Kugel bremsen. Die anschauliche Vorstellung ist also, dass die Ausdehnungsgeschwindigkeit der Kugel im Lauf der Zeit abnimmt. Wenn sich die Kugel heute noch ausdehnt, dann sollte sie sich in der Vergangenheit noch schneller ausgedehnt haben. Geht man in der Zeit zurück, stürzt die Kugel immer schneller in ihrem Mittelpunkt zusammen. Der Urknall ist unvermeidlich und wird erreicht, wenn sie zu einem Punkt

geschrumpft ist.

Diese Vorstellung stimmt, so lange die kosmologische Konstante keine Rolle spielt. Bezieht man sie mit ein, verleiht ihr negativer Druck dem Universum einige merkwürdige Eigenschaften. Es ist dann möglich, dass sich das Universum *beschleunigt* ausdehnt. Entsprechend kann es dann auch sein, dass das Universum sich immer langsamer ausdehnt, wenn man in der Zeit zurück geht, und dass die Ausdehnung zu einem Zeitpunkt in der Vergangenheit zum Stillstand kommt. Ein solches Universum kommt ohne Urknall aus. Zu einem Zeitpunkt in der fernen Vergangenheit begann es sich auszudehnen, hatte aber schon eine endliche Größe.

Vorhin hatten wir gesehen, dass die *relative* Größe des Universums anhand der Rotverschiebung messbar ist. Wenn das Universum auf das Doppelte gewachsen ist, seitdem das Licht einer Galaxie ausgesandt wurde, ist die Wellenlänge dieses Lichts gleichfalls auf das Doppelte gewachsen, wenn es uns erreicht. Es ist dann um das zweifache rotverschoben. Wenn das Universum aus einem Urknall entstanden ist, war es früher beliebig klein, und die Rotverschiebungen, die wir sehen, können beliebig groß werden. Hatte es jedoch immer eine endliche Mindestgröße, muss es eine größte Rotverschiebung geben, die gerade dem Verhältnis aus der heutigen Größe des Universums und seiner Mindestgröße entspricht. Objekte mit hoher Rotverschiebung sind also ein indirektes Argument dafür, dass das Universum einen Urknall gehabt haben muss. Darauf kommen wir später zurück.

DIE STELSCHRAUBEN DES UNIVERSUMS

Wie oben erwähnt, müssen wir nun noch den Zustand des Universums zu einem beliebigen Zeitpunkt festlegen. Wie können wir das tun? Zunächst müssen wir einen Zeitpunkt wählen, am besten gerade den heutigen. Das Universum dehnt sich heute aus, und zwar so, dass die Ausdehnungsgeschwindigkeit proportional zur Entfernung vom Beobachter wächst. Von kleinen Störungen abgesehen gehört daher zu einer bestimmten Entfernung eine bestimmte, messbare Geschwindigkeit.

Übertragen wir diesen Befund auf unsere Kugel. Auf ihre Oberfläche setzen wir ein Testteilchen, das die Rolle einer Galaxie spielen soll. Stellen wir uns weiter vor, wir säßen im Mittelpunkt der Kugel, dann ist die Entfernung des Testteilchens von uns gerade gleich dem Kugelradius. Aufgrund der Messungen an Galaxien wissen wir, welche Geschwindigkeit wir dem Testteilchen geben müssen.

Wir hatten aber vorhin schon gesehen, dass die *absolute* Größe der Kugel für ihre Entwicklung gar keine Rolle spielen darf, denn sonst würden wir in Konflikt mit der Homogenität geraten. Also können wir einen Schritt weiter gehen und sagen, dass nicht die *absolute* Geschwindigkeit des Testteilchens festgelegt werden darf, sondern nur seine *relative* Geschwindigkeit, d.h. seine Geschwindigkeit geteilt durch den Radius der Kugel.

Längen misst man in der Kosmologie gewöhnlich in Megaparsec, das entspricht 3,3 Millionen Lichtjahren (oder etwa 31 Milliarden Milliarden Kilometern). Der experimentelle Befund aus der Messung der Ausdehnung des Universums besagt, dass die *relative* Geschwindigkeit der Galaxien etwa 70 Kilometer pro Sekunde pro Megaparsec ist. Das bedeutet, dass Galaxien in einer Entfernung von einem Megaparsec sich mit etwa 70 Kilometern pro Sekunde von uns entfernen, in einer Entfernung von zwei Megaparsec mit 140 Kilometern pro Sekunde, usw. Diese relative Ausdehnungsgeschwindigkeit heißt Hubble-Konstante nach Edwin Hubble, der 1929 den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der Entfernung der Galaxien fand.

Die momentane Geschwindigkeit des Testteilchens liegt jetzt also fest. Wir haben sie so gewählt, dass sie dem tatsächlichen

Verhalten des Universums entspricht. Natürlich können wir sie auch anders einstellen und untersuchen, wie ein solches hypothetisches Universum sich entwickeln würde.

Das weitere Verhalten des Testteilchens hängt ganz davon ab, wie stark die Schwerkraft der Kugel ist, denn sie zieht das Testteilchen ja zum Kugelmittelpunkt hin und wirkt damit seiner Bewegung entgegen. Die Schwerkraft hängt davon ab, wie groß die Kugel ist und wie viel Materie in ihr enthalten ist. Wieder darf aber das Verhalten des Testteilchens gerade nicht von der *absoluten* Größe der Kugel abhängen. Also ist nicht die Schwerkraft selbst die entscheidende Größe, sondern die *relative* Schwerkraft, also die Schwerkraft geteilt durch den Kugelradius.

Diese *relative* Schwerkraft hängt nur noch von der Materiedichte in unserem Kugeluniversum ab und auch vom Druck, denn Druck wirkt anziehend. Vernachlässigen wir zunächst den Druck; auf ihn kommen wir später zurück. Je dichter die Materie in der Kugel gepackt ist, umso stärker wird sie das Testteilchen auf ihrer Oberfläche anziehen, und umso stärker wird sie seine Flucht bremsen. Wenn die Hubble-Konstante gerade die gemessenen etwa 70 Kilometer pro Sekunde pro Megaparsec beträgt, muss die Materiedichte auf etwa 10^{-29} Gramm pro Kubikzentimeter eingestellt werden, damit die Schwerkraft die Bewegung des Testteilchens so abbremst, dass es nach unendlich langer Zeit gerade zum Stillstand kommt. Ist die Materiedichte höher, wird das Teilchen erst abgebremst und dann zum Mittelpunkt der Kugel hin beschleunigt, ist sie geringer, kann das Teilchen bis in alle Ewigkeit davonfliegen, weil es nicht ausreichend gebremst wird.

Diese Dichte von 10^{-29} Gramm pro Kubikzentimeter entspricht gerade einem Wasserstoffatom in jedem Kubikmeter kosmischen Volumens. Sie heißt kritische Dichte, denn sie trennt, wie wir gerade gesehen haben, ewig expandierende kosmologische Modelle von solchen, die eine maximale Ausdehnung erreichen und danach wieder zusammenfallen. Üblicherweise dividiert man die heutige, tatsächliche Materiedichte im Universum durch die kritische Dichte und erhält auf diese Weise den Dichteparameter Ω_0 .

Kommen wir nun auf die Rolle des Drucks zurück. Wie erwähnt, ist der relativistische Materieanteil am Universum fast vollständig durch den Mikrowellenhintergrund bestimmt. Wegen der sehr geringen Temperatur der Mikrowellenstrahlung ist ihre Energiedichte heute so gering, dass wir ihren Druck und damit die von ihr ausgeübte Schwerkraft ohne weiteres vernachlässigen können. Es bleibt aber die kosmologische Konstante, denn die entspricht einem negativen Druck, der seinerseits wieder äquivalent zu einer Massendichte ρ_Λ ist. Auch diese Dichte dividiert man durch die kritische Dichte und bekommt einen weiteren Parameter, die kosmologische Konstante Ω_Λ .

Diese drei Parameter, die Hubble-Konstante H_0 , der Dichteparameter Ω_0 und die kosmologische Konstante Ω_Λ legen das Verhalten des Universums vollständig fest. Streng genommen käme die Energiedichte relativistischer Gase noch als ein vierter Parameter hinzu (der gelegentlich als Ω_R bezeichnet wird), aber sie ist im heutigen Universum viel zu klein, als dass sie eine Rolle spielen könnte.

DIE STELLUNG DER SCHRAUBEN

Was wissen wir über die verbliebenen drei kosmologischen Parameter? Wie erwähnt, beträgt die Hubble-Konstante etwa 70 Kilometer pro Sekunde und Megaparsec. Ihr Wert wurde viele Jahrzehnte lang kontrovers diskutiert, weil es sehr schwierig ist, die Entfernungen weit entfernter Galaxien zuverlässig zu messen. Die gemessenen Werte lagen zwischen 50 und 100 Kilometer pro Sekunde und Megaparsec verstreut. Gemessen daran ist

die heutige Unsicherheit der Hubble-Konstante relativ klein; sie liegt bei etwa 10 Prozent.

Auch der Dichteparameter und die kosmologische Konstante durchliefen ein wechselvolles Schicksal. Ebenso wie bei der Hubble-Konstante brachten die letzten etwa zwei Jahre entscheidende neue Ergebnisse. Heute wird die Situation durch Messungen der Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund dominiert. Die Strukturen in diesen Schwankungen lassen es zu, die Summe aus der kosmologischen Konstante und dem Dichteparameter verlässlich zu messen. In den letzten Monaten hat sich die Sensation herausgestellt, dass diese Summe mit hoher Genauigkeit gleich eins ist, dass also die Summe aus beiden Dichtekomponenten gerade gleich der kritischen Dichte ist.

Schließlich gibt es eine Reihe anderer Überlegungen und vor allem Messungen, die das konsistente Bild ergeben, dass die Materiedichte etwa ein Drittel der kritischen Dichte ausmacht, so dass der Dichteparameter Ω_0 etwa gleich 0,3 ist. Nachdem die Summe aus der kosmologischen Konstante und dem Dichteparameter gerade gleich eins ist, muss die kosmologische Konstante den Rest beitragen, also etwa zwei Drittel.

Zum ersten Mal in der Geschichte der modernen Kosmologie hat unsere Kenntnis der kosmologischen Parameter ein Niveau erreicht, das uns zu sagen erlaubt, die Eigenschaften des Universums im Großen seien ausreichend genau bestimmt. Mit den drei Größen $\Omega_0 \approx 1/3$, $\Omega_\Lambda \approx 2/3$ und $H_0 \approx 70$ km/s/Mpc lässt sich der kosmologische Rahmen genügend genau abstecken. Als Beispiel zeigt Abb. 6, wie die Größe des Universums im Lauf der Zeit bis heute zugenommen haben muss, wenn man diese Parameterwerte zu Grunde legt.

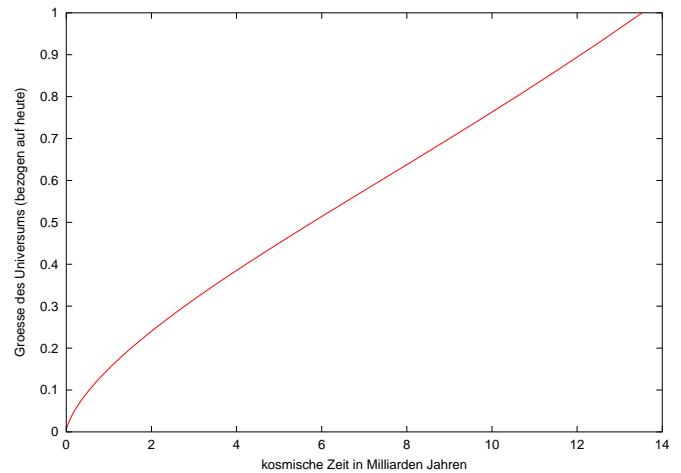


ABBILDUNG 6.—Die Abbildung zeigt, wie die Größe des Universums im Lauf der kosmischen Zeit zunahm. Die Größe ist auf ihren heutigen Wert bezogen, d.h. eine Größe von 0,5 bedeutet, dass das Universum halb so groß war wie heute. Das Universum ist jetzt knapp 14 Milliarden Jahre alt.

Wie geht es weiter? Die kosmologische Konstante übersteigt die heutige Materiedichte um das Doppelte. Sie bewirkt, dass das Universum sich immer schneller ausdehnt. Die Kurve in Abb. 6 deutet das an, indem sie sich mit zunehmendem Alter des Universums nach oben zu krümmen beginnt. Das Universum wird sich also immer weiter ausdehnen; in Zukunft sogar noch schneller als heute.

Wir hatten oben besprochen, dass es mit Hilfe der kosmologischen Konstante möglich ist, Universen zu konstruieren, die keinen Urknall hatten. Nun stellt sich heraus, dass unser Universum heute sogar durch die kosmologische Konstante dominiert wird. Gab es einen Urknall?

Sollte es keinen gegeben haben, muss es eine größte Rotver-

schiebung geben. Kürzlich wurden so genannte Quasare gefunden, deren Lichtwellenlänge um das Siebenfache rotverschoben erscheint. Es gab also einen Zeitpunkt, zu dem das Universum um das Siebenfache kleiner war als heute. Wenn man unser Universum in der Zeit zurück entwickelt, stellt sich heraus, dass ein Kollaps unvermeidlich ist, wenn es erst einmal auf ein Siebtel seiner heutigen Größe geschrumpft ist. Die einfache Beobachtungstatsache, dass es derart rotverschobene Quasare gibt, beweist indirekt, dass unser Universum aus einem Urknall entsprungen sein muss.

ZUSAMMENFASSUNG

Wir sind am Ende unseres Streifzugs durch die Kosmologie angekommen. Wir haben gesehen, dass die zwei Annahmen, das Universum sei homogen und isotrop, es erlauben, stellvertretend für das Universum eine isolierte, homogene Kugel zu betrachten, die allein der Newtonschen Gravitation unterliegt. Die hochgradige Symmetrie, die unsere beiden Annahmen fordern, erlaubt weitgehende Schlussfolgerungen über das Universum. Außerdem haben wir von der anziehenden Wirkung des Drucks erfahren, die aus der Äquivalenz von Masse und Energie folgt, und wir sind der kosmologischen Konstante begegnet, die einen negativen Druck beisteuert und damit die Expansion des Universums beschleunigen kann.

Seit einigen Monaten sind wir zum ersten Mal in der Geschichte der modernen Kosmologie in der Lage, die kosmologischen Parameter mit einiger Genauigkeit anzugeben. So gut wie alle kosmologischen Beobachtungen weisen darauf hin, dass die Materiedichte im Universum etwa einem Drittel seiner kritischen Dichte entspricht und die kosmologische Konstante gerade die zwei Drittel beisteuert, die zur kritischen Dichte fehlen. Die Materiedichte entspricht damit einem Wasserstoffatom in drei Kubikmetern. Die relative Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums, die Hubble-Konstante, beträgt etwa 70 Kilometer pro Sekunde pro Megaparsec.

Die zusätzliche Beobachtung der am stärksten rotverschobenen Quasare erlaubt zu folgern, dass das Universum einen Urknall durchlaufen haben muss. Es gab also ein Anfangsereignis, und wir wissen jetzt, dass es etwa 13,5 Milliarden Jahre zurückliegt. Die Dominanz der kosmologischen Konstante bewirkt, dass sich die Ausdehnung des Universums beschleunigt. Sie wird nie mehr zum Stillstand kommen.

Was *ist* die kosmologische Konstante? Wir wissen es nicht. Jetzt, wo das kosmologische Modell endlich fest steht, können wir uns solchen fundamentalen Fragen widmen.