

Brian Greene

Die verborgene Wirklichkeit

PARALLELUNIVERSEN UND DIE GESETZE DES KOSMOS

Aus dem Englischen von Sebastian Vogel

Pantheon

Die amerikanische Originalausgabe erschien 2011 unter dem Titel »The Hidden Reality. Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos« bei Alfred A. Knopf, New York.

Der Verlag behält sich die Verwertung der urheberrechtlich geschützten Inhalte dieses Werkes für Zwecke des Text- und Data-Minings nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.
Jegliche unbefugte Nutzung ist hiermit ausgeschlossen.



Penguin Random House Verlagsgruppe FSC® Noo1967

7. Auflage 2024

Copyright © 2011 by Brian Greene

Copyright © der deutschsprachigen Ausgabe 2012 by Siedler Verlag,

Copyright © dieser Ausgabe 2013 by Pantheon Verlag

in der Penguin Random House Verlagsgruppe GmbH,

Neumarkter Straße 28, 81673 München

Umschlaggestaltung: Büro Jorge Schmidt, München

Lektorat: Andrea Böltken, Berlin

Wissenschaftliche Beratung und Redaktion: Dr. Markus Pössel, Heidelberg

Satz: Ditta Ahmadi, Berlin

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in the EU

ISBN 978-3-570-55212-4

www.pantheon-verlag.de

Für Alec und Sophia

Inhalt

Vorwort	9
KAPITEL 1	
Die Grenzen der Wirklichkeit: Über Parallelwelten	13
KAPITEL 2	
Endlos Doppelgänger: Das Patchwork-Universum	21
KAPITEL 3	
Ewigkeit und Unendlichkeit: Das Inflations-Multiversum	55
KAPITEL 4	
Vereinheitlichung der Naturgesetze: Auf dem Weg zur Stringtheorie	97
KAPITEL 5	
Schwebende Universen gleich nebenan: Das Branen- und das zyklische Multiversum	135
KAPITEL 6	
Neue Gedanken über eine alte Konstante: Das Landschafts-Multiversum	163
KAPITEL 7	
Naturwissenschaft und das Multiversum: Über Vermutungen, Erklärungen und Vorhersagen	207
KAPITEL 8	
Die vielen Welten der Quantentheorie: Das Quanten-Multiversum	237

KAPITEL 9

Schwarze Löcher und Hologramme:

Das holographische Multiversum 291

KAPITEL 10

Universen, Computer und mathematische Wirklichkeit:

Simulierte und letztmögliche Multiversen 335

KAPITEL 11

Die Grenzen der Forschung:

Multiversen und die Zukunft 375

Anmerkungen 393

Weiterführende Literatur 435

Register 439

Vorwort

Falls es zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts noch Zweifel gegeben hatte, so war die Sache zu Beginn des 21. ausgemacht: Wenn es darauf ankommt, das wahre Wesen der Wirklichkeit offenzulegen, führen uns unsere gewöhnlichen Erfahrungen häufig in die Irre. Denkt man genauer darüber nach, ist das eigentlich nicht verwunderlich. Als unsere Vorfahren in den Wäldern Essbares sammelten und in der Savanne auf die Jagd gingen, hätte ihnen die Fähigkeit, das Quantenverhalten der Elektronen zu berechnen oder die kosmologischen Konsequenzen der Existenz Schwarzer Löcher aufzuklären, kaum einen Überlebensvorteil eingebracht. Ein größeres Gehirn aber war mit Sicherheit von Nutzen, und mit der Erweiterung unserer geistigen Kapazität nahm auch die Fähigkeit zu, unsere Umgebung immer eingehender zu erforschen. Einige Angehörige unserer Spezies bauten Vorrichtungen, mit denen sich die Reichweite unserer Sinne vergrößerte; andere begannen, sich mit großem Erfolg eine systematische Methode zum Aufspüren und Ausdrücken von Mustern anzueignen: die Mathematik. Dank solcher Hilfsmittel konnten wir nach und nach einen Blick hinter die Alltagserscheinungen werfen.

Was wir dabei entdeckt haben, erfordert bereits für sich genommen radikale Veränderungen an unserem Bild vom Kosmos. Mit physikalischen Erkenntnissen und mathematischer Strenge, mit Experimenten und Beobachtungen als Leitfaden und Bestätigung konnten wir etwas Wichtiges nachweisen: Raum, Zeit, Materie und Energie verfügen über ein Verhaltensrepertoire, das weit über unsere Alltagserfahrung hinausgeht. Gründliche Analysen dieser und ähnlicher Entdeckungen führen uns heute wohl zur nächsten Umwälzung unseres Wissensstandes: Möglicherweise ist unser Universum nicht das einzige. Um dieses Thema geht es in *Die verborgene Wirklichkeit*.

In diesem Buch setze ich beim Leser keinerlei Fachkenntnisse in Physik oder Mathematik voraus. Stattdessen möchte ich wie in meinen früheren Büchern mithilfe von Metaphern, Analogien und eingestreuten historischen Episoden einige der seltsamsten und – sollten sie sich als richtig erweisen – aufschlussreichsten Erkenntnisse der modernen Physik allgemein verständlich darstellen.

Viele der hier vorgestellten Konzepte setzen voraus, dass der Leser bequeme Denkweisen aufgibt und sich mit unerwarteten Bereichen der Realität auseinandersetzt. Die wissenschaftlichen Windungen und Wendungen, die dieser Weg genommen hat, machen ihn nur umso spannender und verständlicher. Ich habe daraus mit Bedacht ausgewählt und eine Landschaft der Ideen gezeichnet, die sich mit Gipfeln und Tälern vom Alltäglichen bis zum völlig Ungewohnten erstreckt.

Im Unterschied zum Aufbau meiner früheren Bücher habe ich dieses Mal keine Einleitungskapitel zur systematischen Darlegung von Grundwissen – beispielsweise über die Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie oder über Quantenmechanik – vorangestellt. Stattdessen führe ich Elemente aus diesen Themenbereichen jeweils nur »nach Bedarf« ein; wenn ich hier und da feststelle, dass eine etwas umfassendere Darstellung notwendig ist, damit das Buch aus sich heraus verständlich bleibt, weise ich Leser mit fortgeschrittenen Kenntnissen darauf hin, dass sie diesen oder jenen Absatz ohne Weiteres überspringen können.

In mehreren Kapiteln widme ich dagegen die letzten Seiten einer Darstellung des Materials, die manche Leser vielleicht schwierig finden werden. Zu Beginn dieser Abschnitte biete ich Lesern mit weniger Vorkenntnissen eine kurze Zusammenfassung an, und dann können sie zum nächsten Kapitel springen, ohne den Zusammenhang zu verlieren. Dennoch möchte ich ausdrücklich dazu ermutigen, diese Abschnitte so weit zu lesen, wie Interesse und Geduld es erlauben. Die Beschreibungen sind dort zwar komplizierter, der ganze Text ist aber für ein breites Lesepublikum bestimmt und setzt auch hier nichts anderes voraus als den Willen zum Durchhalten.

Die Anmerkungen sind in dieser Hinsicht etwas anderes. Leser, für die das Thema neu ist, können sie völlig außer Acht lassen; der kenntnisreichere Leser findet dort Klarstellungen oder Erweiterungen, die ich für wichtig halte, die aber im Haupttext des Buches zu weit geführt hätten. Viele Anmerkungen richten sich an Leser mit mathematischer oder physikalischer Bildung.

Während ich *Die verborgene Wirklichkeit* schrieb, erhielt ich viele nützliche, kritische Kommentare und Rückmeldungen von Freunden, Kollegen und Angehörigen, die einige oder alle Kapitel des Buches gelesen hatten. Mein besonderer Dank gilt David Albert, Tracy Day, Richard Easther, Rita Greene, Simon Judes, Daniel Kabat, David Kagan, Paul Kaiser, Raphael Kasper, Juan Maldacena, Katinka Matson, Maulik Parikh, Markus Pössel, Michael Popowits und Ken Vineberg. Die Arbeit mit Marty Asher, meinem Lektor bei Knopf, ist immer eine Freude, und ich danke auch Andrew Carlson, der das Buch in den letzten

Herstellungsstadien fachmännisch betreute. Die großartigen Illustrationen von Jason Severs kommen der Qualität der Beschreibungen sehr zugute; ich danke ihm sowohl für seine Begabung als auch für seine Geduld. Mit besonderer Freude danke ich meinen Agenten Katinka Matson and John Brockman.

Als ich überlegte, wie ich den in diesem Buch behandelten Stoff darstellen soll, waren zahlreiche Gespräche mit einer großen Zahl von Kollegen äußerst nützlich. Neben den bereits erwähnten Personen danke ich insbesondere Raphael Bousso, Robert Brandenberger, Frederik Denef, Jacques Distler, Michael Douglas, Lam Hui, Lawrence Krauss, Janna Levin, Andrei Linde, Seth Lloyd, Barry Loewer, Saul Perlmutter, Jürgen Schmidhuber, Steve Shenker, Paul Steinhardt, Andrew Strominger, Leonard Susskind, Max Tegmark, Henry Tye, Cumrun Vafa, David Wallace, Erick Weinberg und Shing-Tung Yau.

Mit der Arbeit an *Das elegante Universum*, meinem ersten Buch für ein Laienpublikum, begann ich im Sommer 1996. In den 15 Jahren, die seither vergangen sind, genoss ich ein unerwartetes, fruchtbares Wechselspiel zwischen dem zentralen Thema meiner wissenschaftlichen Forschung und den Gebieten, über die ich in meinen Büchern berichte. Ich danke meinen Studierenden und Kollegen an der Columbia University für ein lebendiges Forschungsumfeld, dem Energieministerium für die Finanzierung meiner wissenschaftlichen Arbeit und dem mittlerweile verstorbenen Pentti Kouri für die großzügige Unterstützung meines Forschungszentrums an der Columbia University, dem Institute for Strings, Cosmology and Astroparticle Physics.

Und schließlich danke ich Tracy, Alec und Sophia, die dieses Universum zum besten aller möglichen Universen machen.

KAPITEL I

Die Grenzen der Wirklichkeit: Über Parallelwelten

Wäre mein Kinderzimmer nur mit einem einzigen Spiegel ausgestattet gewesen, meine jugendlichen Tagträume hätten ganz anders ausgesehen. Aber es waren zwei. Jeden Morgen, wenn ich den Kleiderschrank öffnete und meine Kleidung herausholen wollte, befand sich der Spiegel in der Schranktür direkt gegenüber dem Wandspiegel, und es entstand eine scheinbar endlose Reihe von Spiegelbildern mit allem, was sich zwischen den Spiegeln befand. Es war faszinierend. Ich genoss den Anblick: Bild um Bild bevölkerte die parallel stehenden Glasflächen, und die Reihe erstreckte sich so weit, wie das Auge reichte. Alle Spiegelbilder schienen sich im Einklang zu bewegen – aber das lag, wie ich bereits wusste, nur an den Beschränkungen unserer Wahrnehmung; schon in jungen Jahren hatte ich davon gehört, dass sich das Licht nicht unendlich schnell bewegt. Vor meinem geistigen Auge betrachtete ich also das Hin und Her des Lichtes. Ein Nicken, eine ausholende Armbewegung flogen zwischen den Spiegeln hin und her, und jedes reflektierte Bild erzeugte das nächste. Manchmal stellte ich mir ein respektloses Ich vor, das sich weigerte, seinen Platz einzunehmen, so dass die gleichmäßige Abfolge unterbrochen war und eine neue Wirklichkeit entstand, die über die nachfolgenden Realitäten bestimmte. Wenn es in der Schule langweilig war, dachte ich manchmal an das Licht, das ich am Morgen ausgesandt hatte und das immer noch endlos zwischen den Spiegeln hin- und hergeworfen wurde; ich gesellte mich zu einem meiner gespiegelten Ichs und trat in eine imaginäre, aus Licht gebaute und von der Fantasie beflügelte Parallelwelt ein.

Natürlich haben Spiegelbilder keinen eigenen Willen. Aber die Höhenflüge meiner jugendlichen Fantasie mit ihren imaginären, parallelen Wirklichkeiten finden ihren Widerhall in einem immer prominenter werdenden Thema der modernen Wissenschaft: der Möglichkeit, dass es jenseits der Welt, die wir kennen, noch andere gibt. Der Frage, wie diese aussehen können, gehe ich in diesem Buch nach, das Sie auf eine Reise mitnimmt, auf der wir uns die wichtigsten wissenschaftlichen Konzepte über Paralleluniversen sorgfältig und durchaus kritisch ansehen werden.

Universum und Universen

»Universum« bedeutete früher »alles, was ist«. Alles. Mit allem Drum und Dran. Die Vorstellung von mehr als einem Universum, mehr als allem, erscheint so gesehen wie ein Widerspruch in sich. Aber durch eine ganze Reihe theoretischer Überlegungen wurde die Bedeutung des Begriffs »Universum« nach und nach eingeschränkt. Heute hängt sie vom Zusammenhang ab. Manchmal meint man mit »Universum« immer noch absolut alles. Manchmal aber auch nur diejenigen Gebiete, zu denen Sie und ich prinzipiell Zugang haben könnten. Manchmal wendet man den Begriff auf Bereiche an, die uns jeweils teilweise oder vollständig, vorübergehend oder immer unzugänglich sind; so gebraucht, macht das Wort unser Universum zu einem Element in einer großen, vielleicht sogar unendlich großen Sammlung.

Nachdem das Wort »Universum« seinen allumfassenden Gehalt verloren hatte, traten andere Begriffe an seine Stelle. Sie erfassen die größere Leinwand, auf der die Gesamtheit der Realität möglicherweise gemalt ist. *Parallelwelten*, *Paralleluniversen*, *multiple Universen*, *Alternativuniversen* oder das *Metaversum*, *Megaversum* oder *Multiversum* – alle diese Wörter bedeuten das Gleiche und schließen nicht nur unser Universum ein, sondern auch ein Spektrum weiterer, die es vielleicht noch gibt.

Ihnen wird auffallen, dass all diese Begriffe ein wenig vage sind. Was macht eine Welt oder ein Universum eigentlich aus? Durch welche Kriterien unterscheiden sich einzelne Regionen eines einzigen Universums von Gebilden, die wir als eigenständige Universen einstufen? Vielleicht werden unsere Kenntnisse über multiple Universen eines Tages so weit ausgereift sein, dass wir auf solche Fragen genaue Antworten geben können. Vorerst wollen wir es aber vermeiden, uns mit derart abstrakten Definitionen herumzuschlagen; stattdessen bedienen wir uns eines Verfahrens, das der Richter Potter Stewart einmal auf die Definition von Pornographie anwandte. Während der Oberste Gerichtshof der Vereinigten Staaten sich angestrengt bemühte, einen Maßstab festzulegen, was Pornographie sei und was nicht, erklärte Stewart schlicht: »Wenn ich es sehe, weiß ich es.«

Ob man diesen oder jenen Bereich als Paralleluniversum bezeichnet, ist letztlich nur eine semantische Frage. Der eigentlich bedeutsame Kern des Themas ist ein anderer: Wird unsere konventionelle Vorstellung durch die Existenz von Bereichen in Frage gestellt, die nahelegen, dass das, was wir lange Zeit für *das* Universum gehalten haben, letztlich nur ein Bestandteil einer viel größeren, vielleicht auch viel seltsameren und größtenteils verborgenen Wirklichkeit ist?

Allerlei Paralleluniversen

Es ist eine verblüffende Tatsache (und einer der Gründe, die mich dazu trieben, dieses Buch zu schreiben): Gleich eine ganze Reihe von wichtigen Entwicklungen in der grundlegenden theoretischen Physik – relativistische Physik, Quantenphysik, Kosmologie, vereinheitlichte Theorien, computergestützte Physik – hat dazu geführt, dass Physiker über diese oder jene Form von Paralleluniversen nachdenken. Die folgenden Kapitel schlagen einen erzählerischen Bogen über neun Variationen des Multiversum-Themas. In jeder davon entpuppt sich unser Universum als Teil eines größeren Ganzen, dessen Ausmaß unsere Erwartungen sprengt; aber was das Aussehen dieses Ganzen und das Wesen seiner Mitgliedsuniversen angeht, sind die Unterschiede enorm. In manchen Varianten sind die Paralleluniversen von unserem durch ungeheure räumliche oder zeitliche Abstände getrennt; in anderen treiben sie sich nur wenige Millimeter entfernt herum; in wieder anderen erweist sich schon die Vorstellung von einem Aufenthaltsort als zu kurz gedacht und bedeutungslos. Ein ähnliches Spektrum an Möglichkeiten kommt in den Gesetzen zum Ausdruck, denen die Paralleluniversen unterliegen. In manchen sind diese Gesetze die gleichen wie bei uns; in anderen haben sie eine andere Form, sind aber zumindest noch durch ein gemeinsames Erbe geprägt; und in wieder anderen sind Form und Struktur der Gesetze völlig anders als alles, was uns jemals begegnet ist. Sich vorzustellen, wie umfangreich die Realität sein kann, ist aufregend, hält uns aber auch zur Bescheidenheit an.

Einen der ersten Streifzüge in das Gebiet der Parallelwelten unternahmen in den fünfziger Jahren Wissenschaftler, die über bestimmte Aspekte der Quantenmechanik rätselten. Diese Theorie hatte man zur Erklärung von Phänomenen entwickelt, die sich im mikroskopisch kleinen Bereich der Atome und subatomaren Teilchen abspielen. Die Quantenmechanik brach aus dem Korsett des früheren begrifflichen Rahmens, der klassischen Mechanik, aus und zeigte, dass bestimmte grundlegende Vorhersagen der Wissenschaft notwendigerweise Wahrscheinlichkeitscharakter haben. Wir können dann zwar die Wahrscheinlichkeit, zu einem bestimmten Ergebnis zu gelangen, voraussagen, wir können die Wahrscheinlichkeit für ein anderes Ergebnis vorhersagen, aber im Allgemeinen können wir nicht voraussagen, welche der verschiedenen Möglichkeiten tatsächlich eintreten wird. Schon diese allgemein bekannte Abkehr von jahrhundertealten wissenschaftlichen Denkweisen ist überraschend genug. Die Quantentheorie hat jedoch einen noch verwirrenderen Aspekt, der weniger Aufmerksamkeit erregt hat. Obwohl die Quantenmechanik jahrzehntelang eingehend erforscht wurde und dabei eine Fülle von Daten zusammengekommen sind, welche die mit ihrer Hilfe

berechneten Wahrscheinlichkeiten bestätigen, vermochte bisher niemand zu erklären, warum sich in einer bestimmten Situation nur eines der vielen möglichen Ergebnisse einstellt. Wenn wir Experimente machen, wenn wir die Welt erforschen, sind wir uns alle einig, dass wir auf eine einzige, eindeutige Wirklichkeit treffen. Aber noch heute, mehr als ein Jahrhundert nach Beginn der Quantenrevolution, besteht unter den Physikern keine Einigkeit in der Frage, wie sich diese grundlegende Tatsache mit dem mathematischen Formalismus der Theorie verträgt.

Diese beträchtliche Wissenslücke gab im Laufe der Jahre den Anlass zu vielen kreativen Vorschlägen. Der verblüffendste war gleichzeitig einer der ersten: Vielleicht, so die Aussage, ist die vertraute Vorstellung, jedes Experiment würde zu einem einzigen Ergebnis führen, ja falsch. Die mathematischen Grundlagen der Quantenmechanik – oder zumindest eine Sichtweise darauf – legen die Vermutung nahe, dass *alle* möglichen Ergebnisse sich auch einstellen, wobei jedes davon in einem anderen Universum zu Hause ist. Wenn eine quantentheoretische Berechnung vorhersagt, dass ein Teilchen hier oder dort sein könnte, *ist* es im einen Universum hier und im anderen *ist* es dort. Und in jedem derartigen Universum befindet sich auch ein Exemplar von uns, die wir das eine oder andere Ergebnis beobachten und – zu Unrecht – glauben, unsere Realität sei die einzige. Wenn man sich klarmacht, dass die Quantenmechanik die Basis aller physikalischen Prozesse darstellt, von der Verschmelzung der Atome in der Sonne bis zu den Nervenimpulsen, die das Substrat für unser Denken bilden, wird die Tragweite einer solchen Vorstellung deutlich. Sie besagt, dass es keine verpassten Chancen, keine nicht eingeschlagenen Wege gibt. Aber jeder derartige Weg – jede Wirklichkeit – ist vor allen anderen verborgen.

Dieser faszinierende *Viele-Welten*-Ansatz der Quantenmechanik hat in den letzten Jahrzehnten großes Interesse auf sich gezogen. Wie genauere Untersuchungen indes gezeigt haben, birgt auch dieser theoretische Rahmen einige Schwierigkeiten (Näheres darüber in Kapitel 8); entsprechend ist der Vorschlag noch heute, nach einem halben Jahrhundert gründlicher Untersuchungen, umstritten. Manche Quantentheoretiker vertreten die Ansicht, seine Richtigkeit sei bereits bewiesen, andere behaupten mit der gleichen Überzeugung, die zugrunde liegende Mathematik würde schlicht nicht funktionieren.

Trotz solcher wissenschaftlichen Unsicherheiten fand diese frühe Version der Paralleluniversen ihren Widerhall in Literatur, Film und Fernsehen, wo die Thematik separater Welten oder alternativer geschichtlicher Abläufe bis heute Anlass zu kreativen Streifzügen bietet. (Zu meinen Lieblingen gehören seit Kindertagen *Der Zauberer von Oz*, *Ist das Leben nicht schön?*, die *Raumschiff-*

Enterprise-Episode *Griff in die Geschichte*, die Kurzgeschichte *Der Garten der Pfade*, die sich verzweigen von Jorge Luis Borges und aus jüngerer Zeit *Sie liebt ihn – sie liebt ihn nicht* und *Lola rennt*.) Insgesamt haben diese und viele andere Werke der Alltagskultur dazu beigetragen, dass die Vorstellung von parallelen Realitäten in den Zeitgeist Eingang fand und eine größere Öffentlichkeit fasziniert. Aber die Quantenmechanik ist nur eine von vielen Möglichkeiten, durch die sich aus der modernen Physik ein Konzept von Paralleluniversen herauskristallisieren lässt. Und es wird auch nicht die erste sein, die ich erörtere.

In Kapitel 2 schlage ich zunächst einen anderen Weg zu den Paralleluniversen ein, den vielleicht einfachsten überhaupt. Wie er aussieht, werden wir noch genauer erfahren: Wenn der Raum sich unendlich weit erstreckt – ein Gedanke, der mit allen Beobachtungen im Einklang steht und einen Teil des kosmologischen Modells darstellt, das von vielen Physikern und Astronomen bevorzugt wird –, muss es da draußen (und zwar wahrscheinlich *sehr* weit draußen) Kopien von Ihnen und mir und allem anderen geben, die sich einer Alternativversion der Wirklichkeit, die wir hier erleben, erfreuen. In Kapitel 3 dringen wir noch tiefer in die Kosmologie vor: Die Inflationsmodelle, ein Ansatz, der für die allerersten Augenblicke des Universums eine superschnelle Wachstumsphase der kosmischen Expansion postuliert, bringen ihre eigene Version von Parallelwelten mit sich. Wenn die Vorstellung von der Inflation stimmt – und neueste astronomische Beobachtungen deuten darauf hin –, dann war die Wachstumsphase, welche die von uns bewohnte Raumregion entstehen ließ, vielleicht nicht die einzige. Vielmehr könnte inflationäre Expansion in weit entfernten Bereichen auch gerade jetzt ein Universum nach dem anderen hervorbringen, und möglicherweise geht das für alle Ewigkeit so weiter. Und das ist noch nicht alles: Jedes dieser Universen, die sich wie Ballons aufblähen, hat seine eigene, unendliche räumliche Ausdehnung und enthält demnach unendlich viele Parallelwelten, wie sie uns in Kapitel 2 begegnet sind.

In Kapitel 4 führt uns unsere Reise zur Stringtheorie. Nach einem kurzen Überblick über deren Grundlagen berichte ich kurz über den aktuellen Stand der Dinge bei diesem Ansatz zur Vereinheitlichung aller Naturgesetze. Solchermaßen gerüstet, untersuchen wir in den Kapiteln 5 und 6 neuere Entwicklungen in der Stringtheorie, die auf drei neue Arten von Paralleluniversen schließen lassen. Eine davon ist das *Branwelt*-Szenario: Es postuliert, dass unser Universum eine von möglicherweise sehr vielen »Scheiben« ist, die in einem höherdimensionalen Raum schweben wie eine Scheibe Brot in einem größeren kosmischen Brotlaib.¹ Wenn wir Glück haben, wird dieser Ansatz in nicht allzu ferner Zukunft im Large Hadron Collider, abgekürzt LHC, einem gigantischen Teilchenbeschleuni-

ger in Genf, beobachtbare Spuren hinterlassen. Eine zweite Variante ergibt sich aus der Vorstellung, dass Branwelten kollidieren, wobei alles, was sie enthalten, ausgelöscht und jeweils ein neuer, heftiger Urknall-ähnlicher Anfang in Gang gesetzt wird. Es ist, als würden zwei Riesenhände zusammenklatschen, und zwar womöglich immer wieder: Branen können zusammenstoßen, abprallen, einander durch Gravitation anziehen und erneut kollidieren – ein Kreislauf, durch den Universen entstehen, die nicht im Raum, sondern über die Zeit hinweg parallel existieren. Das dritte Szenario ist die Stringtheorie-»Landschaft«; ihre Grundlage bildet die ungeheure Zahl möglicher Formen und Größen für die zusätzlichen Raumdimensionen, welche die Stringtheorie erfordert. Wie wir noch genauer erfahren werden, lässt die String-Landschaft in Verbindung mit dem inflationären Multiversum auf eine riesige Ansammlung von Universen schließen, in denen alle möglichen Formen der zusätzlichen Dimensionen realisiert sind.

In Kapitel 6 konzentrieren wir uns auf die Frage, inwieweit diese Überlegungen neues Licht auf eine der erstaunlichsten Beobachtungen des letzten Jahrhunderts werfen: Der Raum scheint gleichmäßig mit einer ungewöhnlichen Sorte von Energie angefüllt zu sein, bei der es sich um eine Version von Einsteins berüchtigter kosmologischer Konstante handeln könnte. Diese Beobachtung inspirierte einen Großteil der neueren wissenschaftlichen Erforschung von Paralleluniversen und führte zu einer der hitzigsten Diskussionen über das Wesen akzeptabler wissenschaftlicher Erklärungen seit Jahrzehnten. Kapitel 7 erweitert das Thema und stellt die allgemeinere Frage, ob man die Beschäftigung mit Universen außerhalb unseres eigenen überhaupt noch als Teil der Naturwissenschaft ansehen kann. Lassen sich solche Überlegungen überprüfen? Haben wir einen Fortschritt erzielt, wenn wir mit ihrer Hilfe unerledigte Probleme lösen, oder haben wir damit diese Probleme nur unter einen kosmischen Teppich gekehrt, der bequemerweise nicht zugänglich ist? Ich habe mich bemüht, die wesentlichen Aspekte der konkurrierenden Sichtweisen darzulegen, und betone gleichzeitig meine eigene Ansicht, wonach Paralleluniversen unter bestimmten Voraussetzungen eindeutig zum Forschungsgebiet der Naturwissenschaft gehören.

Kapitel 8 hat die Quantenmechanik mit ihrer Viele-Welten-Version der Paralleluniversen zum Thema. Zu Beginn rekapituliere ich kurz die Grundzüge der Quantenmechanik, dann konzentriere ich mich auf ihr größtes Problem: Wie gewinnt man eindeutige Ergebnisse aus einer Theorie, deren grundlegende Aussage es erlaubt, dass einander widersprechende Wirklichkeit in einem amorphen, aber mathematisch präzise beschreibbaren, von Wahrscheinlichkeiten geprägten Dunst nebeneinander existieren? Ich führe Schritt für Schritt durch die Über-

legungen, mit denen man die Quantenrealität auf der Suche nach einer Antwort in einer eigenen Fülle von Parallelwelten verankert hat. Das Kapitel 9 führt uns noch weiter in die Quantenrealität hinein, und schließlich gelangen wir zu der nach meiner Einschätzung seltsamsten These über Paralleluniversen. Sie erwuchs im Laufe von dreißig Jahren aus theoretischen Untersuchungen zu den Quanteneigenschaften Schwarzer Löcher. Ihren Höhepunkt fanden die Arbeiten im letzten Jahrzehnt mit einem verblüffenden Befund aus der Stringtheorie: Er legt die bemerkenswerte Vermutung nahe, dass alles, was wir erleben, nichts anderes ist als eine holographische Projektion von Prozessen, die sich auf einer weit entfernten, uns umgebenden Oberfläche abspielen. Wir können uns in den Arm kneifen, und was wir dabei spüren, ist real; dennoch spiegelt sich darin ein paralleler Prozess, der in einer anderen, weit entfernten Wirklichkeit abläuft.

In Kapitel 10 schließlich steht die bisher noch eher fantastische Möglichkeit künstlicher Universen im Mittelpunkt der Betrachtung. Am Anfang stelle ich die Frage, ob die Gesetze der Physik uns in die Lage versetzen, neue Universen zu erzeugen. Dann wenden wir uns Universen zu, die nicht mit Hardware, sondern mit Software erschaffen wurden – die also in einem technisch extrem fortgeschrittenen Computer simuliert werden –, und gehen der Frage nach, ob wir mit Sicherheit behaupten können, dass wir nicht selbst in solch einer von anderen Wesen in Gang gesetzten Simulation leben. Dies führt uns zu dem umfassendsten Vorschlag im Zusammenhang mit Paralleluniversen, der seinen Ursprung in der Philosophie hat: Danach ist jedes mögliche Universum irgendwo realisiert und bildet einen Teil des größten aller denkbaren Multiversen. Eine solche Diskussion entwickelt sich zwangsläufig zu einer Untersuchung der Frage, welche Rolle die Mathematik bei der Aufdeckung naturwissenschaftlicher Rätsel spielt und ob wir letztlich in der Lage sind, zu einem immer tieferen Verständnis der Wirklichkeit zu gelangen oder nicht.

Die kosmische Ordnung

Paralleluniversen sind ein höchst spekulatives Thema. Mit keinem Experiment und keiner Beobachtung wurde bislang nachgewiesen, dass es sich bei Paralleluniversen um mehr handelt als um theoretische Überlegungen. Deshalb geht es mir in diesem Buch auch nicht darum, irgendjemanden davon zu überzeugen, dass wir Teil eines Multiversums sind. Ich bin von nichts überzeugt – und das ist ganz allgemein eine vernünftige Haltung –, das nicht durch handfeste Daten belegt ist. Dennoch finde ich es seltsam und zugleich aufschlussreich, dass zahl-

reiche Entwicklungen in der Physik, wenn man sie nur weit genug vorantreibt, uns zu irgendeiner Version paralleler Universen führen. Es ist nicht so, dass Physiker mit Multiversum-Netzen in der Hand bereitstünden und damit jede Theorie einfangen wollten, die ihnen über den Weg läuft und irgendwie – und sei es auch auf noch so seltsame Weise – zur Lehre von den Paralleluniversen passt. Vielmehr erwachsen alle Vermutungen über Paralleluniversen, die wir hier ernsthaft betrachten wollen, unverhofft aus der Mathematik von Theorien, mit denen man eigentlich herkömmliche Befunde und Beobachtungen erklären will.

Es ist also meine Absicht, klar und prägnant die gedanklichen Schritte und die Kette theoretischer Erkenntnisse darzulegen, die Physiker dazu veranlassen, aus verschiedenen Blickwinkeln die Möglichkeit zu betrachten, dass unser Universum eines von vielen ist. Ich möchte ein Gespür dafür vermitteln, wodurch moderne naturwissenschaftliche Forschung – und nicht ungezügelte Fantasien wie die Grübeleien meiner Kindheit über die Spiegel – auf ganz natürliche Weise diesen erstaunlichen Gedanken nahelegt. Ich möchte zeigen, wie manche ansonsten verwirrende Beobachtungen in diesem oder jenem Rahmen vor dem Hintergrund von Paralleluniversen in hohem Maße verständlich werden können; gleichzeitig werde ich die entscheidenden, ungelösten Fragen beschreiben, die dafür gesorgt haben, dass dieser Erklärungsansatz bis jetzt nicht vollständig realisiert werden konnte. Mein Ziel ist, Ihren Sinn für das, was sein könnte – Ihre Perspektive darauf, wie die Grenzen der Realität vielleicht eines Tages durch die derzeit laufenden wissenschaftlichen Entwicklungen neu gezogen werden –, zu schärfen, Ihnen durch die Lektüre ein anschauliches Bild der reichhaltigen Möglichkeiten zu vermitteln.

Manche Menschen schrecken vor der Vorstellung von Parallelwelten zurück; wenn wir Teil eines Multiversums wären, würden unser Platz und unsere Bedeutung im Kosmos aus ihrer Sicht an den Rand gedrängt. Ich gehe anders an die Sache heran. Ich sehe keinen Sinn darin, unsere Bedeutung nach unserer relativen Häufigkeit zu bemessen. Das Befriedigende am Menschsein, das Aufregende, wenn man am Unternehmen der Naturwissenschaft teilnimmt, ist etwas anderes: unsere Fähigkeit, mit analytischem Denken gewaltige Entfernungen zu überbrücken, in den Weltraum und innere Räume vorzudringen – und, sofern sich manche der Ideen, die uns in diesem Buch begegnen werden, als richtig erweisen sollten, sogar über unser eigenes Universum hinauszugehen. Aus meiner Sicht macht die Tiefgründigkeit unserer Erkenntnisse, die wir von unserem einsamen Standpunkt in der pechschwarzen Stille eines kalten, unwirtlichen Kosmos aus gewonnen haben, das aus, was über die Weiten der Wirklichkeit hinweg widerhallt und unser Dasein kennzeichnet.

KAPITEL 2

Endlos Doppelgänger: Das Patchwork-Universum

Angenommen, wir fliegen in den Kosmos hinaus und reisen immer weiter: Würden wir dann feststellen, dass der Raum sich unendlich fortsetzt, oder wäre er irgendwann plötzlich zu Ende? Oder würden wir am Ende vielleicht wieder am Ausgangspunkt landen wie Sir Francis Drake, als er die Erde umsegelte? Beide Möglichkeiten – ein Kosmos, der sich unendlich weit erstreckt, und ein riesiger, aber endlicher Kosmos – vertragen sich mit unseren Beobachtungen. Beide wurden in den letzten Jahrzehnten von führenden Wissenschaftlern eingehend untersucht, und trotzdem gibt es da noch eine atemberaubende Schlussfolgerung aus der Vorstellung eines unendlich ausgedehnten Universums, die bisher relativ wenig Aufmerksamkeit erregt hat.

Irgendwo in den weit entfernten Regionen eines unendlichen Kosmos dürfte es eine Galaxie geben, die genau wie die Milchstraße aussieht, mit einem Sonnensystem, das große Ähnlichkeit mit unserem hat, mit einem Planeten, der ein Doppelgänger der Erde ist, mit einem Haus, das von jenem, in dem Sie wohnen, nicht zu unterscheiden ist; in diesem Haus wohnt jemand, der genauso aussieht wie Sie, der gerade jetzt dieses Buch liest und sich vorstellt, wie Sie in einer weit entfernten Galaxie gerade jetzt zum Ende dieses Satzes gelangen. Und es gibt auch nicht nur eine solche Kopie. In einem unendlichen Universum sind es unendlich viele. In manchen davon liest Ihr Doppelgänger jetzt genau wie Sie gerade diesen Satz. In anderen ist er Ihnen ein wenig voraus, oder er will eine Kleinigkeit essen und hat das Buch beiseitegelegt. In wieder anderen ist er, nun ja, ein eher unsympathischer Zeitgenosse, und man würde ihm nicht in einer dunklen Gasse begegnen wollen.

Das wird auch nicht geschehen. Diese Kopien wären in Regionen zu Hause, die so weit entfernt sind, dass das Licht auf seinem Weg seit dem Urknall noch keine Zeit hatte, die räumlichen Weiten zwischen uns zu überwinden. Aber selbst wenn wir nicht in der Lage sind, diese Regionen zu beobachten, kann man, wie wir noch genauer erfahren werden, aus fundamentalen physikalischen Überlegungen heraus ableiten: Wenn der Kosmos unendlich groß ist, beherbergt er

auch unendlich viele Parallelwelten – von denen manche der unseren genau gleichen, während andere sich von unserer unterscheiden und viele keinerlei Ähnlichkeit mit ihr haben.

Um zu solchen Parallelwelten zu gelangen, müssen wir zunächst die Grundlagen der Kosmologie kennenlernen, das heißt der Wissenschaft von Ursprung und Entwicklung des Kosmos als Ganzem.

Also los!

Der Vater des Urknalls

»Die Mathematik ist richtig, aber Ihre Physik ist abscheulich.« Die Solvay-Tagung über Physik des Jahres 1927 war in vollem Gang, und mit diesen oder ähnlichen Worten reagierte Albert Einstein, als der Belgier Georges Lemaître ihm erklärte, die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, die Einstein mehr als ein Jahrzehnt zuvor veröffentlicht hatte, bedeuteten einen dramatischen Umbruch und man müsse die Schöpfungsgeschichte neu schreiben. In Lemaîtres Modell war das Universum am Anfang ein winziger Brocken von ungeheurer Dichte, ein »Uratom«, wie er es später nannte, das über gewaltige Zeiträume hinweg gewachsen und so zu dem Kosmos geworden war, den wir heute beobachten.

Lemaître war unter den Dutzenden angesehenen Physikern eine ungewöhnliche Erscheinung; das Gleiche galt für Einstein, der für eine Woche ins Hotel Metropole in Brüssel gekommen war, um eingehend über die Quantentheorie zu diskutieren. Im Jahr 1923 hatte Lemaître nicht nur seine Doktorarbeit abgeschlossen, sondern auch seine Studien am Seminar Saint Rombaut, und man hatte ihn zum Jesuitenpater geweiht. Während einer Konferenzpause wandte er sich, den Priesterkragen umgelegt, an den Mann, dessen Gleichungen nach Lemaîtres Überzeugung die Grundlage einer neuen wissenschaftlichen Theorie für den Ursprung des Kosmos bildeten. Einstein kannte die Theorie des Belgiers: Er hatte dessen Artikel über das Thema einige Monate zuvor gelesen und konnte in den Operationen, die er mit den Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie vorgenommen hatte, keinen Fehler finden. Es war auch nicht das erste Mal, dass Einstein von derartigen Befunden erfuhr. Der russische Mathematiker und Meteorologe Alexander Friedmann war schon 1921 auf eine Lösung für Einsteins Gleichungen gestoßen, in der der Raum sich mit der Zeit ausdehnte, das Universum als Ganzes also expandierte. Einstein schreckte vor diesen Lösungen zurück und hatte zunächst bestimmte Fehler in Friedmanns Berechnungen angemahnt. Damit hatte er Unrecht, und später zog er seine Behauptung zurück.

Aber Einstein wollte nicht die Marionette der Mathematik sein. Deshalb manipulierte er die Gleichungen im Sinne seiner intuitiven Vorstellungen davon, wie der Kosmos *sein sollte*: Er war zutiefst überzeugt, das Universum sei ewig und im größten Maßstab fest und unveränderlich. Das Universum, so belehrte Einstein den Belgier, dehne sich nicht aus und habe sich nie ausgedehnt.

Sechs Jahre später hörte Einstein in einem Seminarraum der Mount-Wilson-Sternwarte in Kalifornien konzentriert zu, als Lemaître eine genauer ausgearbeitete Version seiner Theorie erläuterte: Danach hatte das Universum in einem Urblitz seinen Anfang genommen, und die Galaxien waren brennende Holzscheite, die auf einem anschwellenden Meer des Raumes schwammen. Als das Seminar zu Ende ging, stand Einstein auf und erklärte, Lemaîtres Theorie sei die »schönste und befriedigendste Erklärung für die Schöpfung, die ich jemals gehört habe«.¹ Der berühmteste Physiker der Welt hatte sich also überzeugen lassen und vertrat nun eine andere Ansicht über eines der schwierigsten Rätsel der Welt. Dem allgemeinen Publikum blieb Lemaître weitgehend unbekannt, unter Wissenschaftlern aber gilt er als Vater des Urknalls.

Die Allgemeine Relativitätstheorie

Die von Friedmann und Lemaître entwickelten kosmologischen Modelle basierten auf einem Fachartikel, dessen Manuskript Einstein am 25. November 1915 an die deutsche Fachzeitschrift *Annalen der Physik* geschickt hatte. Es stellte den Abschluss einer nahezu zehnjährigen mathematischen Odyssee dar, und das darin formulierte Ergebnis – die Allgemeine Relativitätstheorie – sollte sich als Einsteins vollständigste und weitest reichende wissenschaftliche Leistung erweisen. In der Allgemeinen Relativitätstheorie gelang es Einstein, mithilfe einer eleganten geometrischen Sprache eine völlig neue Beschreibung der Gravitation zu formulieren. Wer mit den Grundlagen und kosmologischen Anwendungen der Theorie bereits vertraut ist, kann die nächsten Unterkapitel bis »Modelle und Daten« ohne Weiteres überspringen. Wer sich dagegen kurz noch einmal an die wichtigsten Punkte erinnern will, sollte hier weiterlesen.

Mit der Arbeit an der Allgemeinen Relativitätstheorie begann Einstein ungefähr 1907. Zu jener Zeit glaubten die meisten Wissenschaftler, die Gravitation sei durch die Arbeiten Isaac Newtons schon seit Langem erklärt. Wie Oberschüler auf der ganzen Welt lernen, formulierte Newton Ende des siebzehnten Jahrhunderts das nach ihm benannte Gravitationsgesetz, das die erste mathematische Beschreibung dieser altvertrauten Naturkraft darstellt. Diese Beschrei-

bung ist so genau, dass die Ingenieure der NASA noch heute damit die Flugbahnen von Raumschiffen berechnen, und Astronomen sagen mit ihrer Hilfe die Bewegung von Kometen, Sternen und sogar ganzen Galaxien vorher.²

Angesichts dieser nachgewiesenen Leistungsfähigkeit ist es umso bemerkenswerter, dass Einstein in den ersten Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts erkannte: Newtons Gravitationsgesetz ist auf einer ganz fundamentalen Ebene falsch. Deutlich wurde dies an einer scheinbar einfachen Frage: Wie, so wollte Einstein wissen, funktioniert die Gravitation denn nun eigentlich? Wie greift beispielsweise die Sonne über rund 150 Millionen Kilometer hinweg durch den mehr oder weniger leeren Raum, um die Bewegung der Erde zu beeinflussen? Die beiden Himmelskörper sind nicht durch ein Seil verbunden, und an der Erde zieht keine Kette, während sie sich bewegt. Wie übt die Gravitation also ihren Einfluss aus?

Wie wichtig diese Frage ist, erkannte Newton selbst schon in seinen 1687 erschienenen *Principia*, und er räumte ein, dass sein eigenes Gesetz, was die Antwort angeht, dazu beunruhigend wenig zu sagen habe. Newton war sicher, dass irgendetwas die Gravitation von Ort zu Ort vermitteln muss, aber was dieses Etwas sein könnte, vermochte er nicht zu sagen. In den *Principia* überlässt er die Frage spöttisch »der Betrachtung des Lesers«, und mehr als zweihundert Jahre lang lasen alle, die diese Herausforderung zur Kenntnis genommen hatten, einfach weiter. Das konnte Einstein nicht.

Fast ein ganzes Jahrzehnt war Einstein damit beschäftigt, den Mechanismus der Gravitation zu finden; im Jahr 1915 schlug er schließlich eine Antwort vor. Seine Überlegungen stützten sich zwar auf hoch entwickelte mathematische Konzepte und erforderten begriffliche Sprünge, wie es sie in der Geschichte der Physik noch nie gegeben hatte, aber letztlich hatte sein Vorschlag die gleiche Aura der Einfachheit wie die Frage, die es zu beantworten galt. Durch welchen Prozess übt die Gravitation über den leeren Raum hinweg ihren Einfluss aus? Wegen der Leere des leeren Raumes standen scheinbar alle mit leeren Händen da. In Wirklichkeit gibt es aber im leeren Raum doch etwas: den Raum selbst. Dies veranlasste Einstein zu der Vermutung, der Raum selbst könne das Medium der Gravitation sein.

Der Grundgedanke war folgender: Stellen wir uns eine Murmel vor, die über einen langen Metalltisch rollt. Da die Oberfläche des Tisches glatt ist, rollt die Murmel entlang einer geraden Linie. Wenn der Tisch anschließend aber von Flammen ergriffen wird, so dass die Tischplatte sich ausbeult und wölbt, nimmt die rollende Murmel danach einen anderen Weg, denn sie wird von der verbogenen Oberfläche abgelenkt. Ein ähnlicher Gedanke, so Einstein, gilt auch für die

Struktur des Raumes. Völlig leerer Raum ähnelt einem flachen Tisch, auf dem Gegenstände ungehindert entlang gerader Linien rollen können. Große Körper jedoch haben Einfluss auf die Form des Raumes, ähnlich wie die Hitze, die sich auf die Form der Tischplatte auswirkt. Die Sonne beispielsweise lässt in ihrer Nachbarschaft eine Beule entstehen, ähnlich einer Metallblase, die sich auf dem heißen Tisch aufwölbt. Und wie die verbogene Tischoberfläche eine Kugel auf einen gebogenen Weg lenkt, so lenkt auch der Raum, der in der Umgebung der Sonne gekrümmt ist, die Erde und andere Planeten in ihre Umlaufbahnen.

Diese kurze Beschreibung geht über wichtige Einzelheiten hinweg. Nicht nur der Raum ist verzerrt, sondern auch die Zeit – daher redet man auch von Raumzeitkrümmung; die Gravitation der Erde selbst verschafft der Tischfläche erst ihren Einfluss, weil sie die Kugel an die Oberfläche drückt (Einstein behauptete, die Krümmung von Raum und Zeit brauche keine derartige Hilfestellung, weil sie selbst die Gravitation *ist*); der Raum ist dreidimensional und krümmt sich demnach ganz um einen Gegenstand herum und nicht nur »unter« ihm, wie man aufgrund des Vergleichs mit dem Tisch vermuten könnte. Dennoch fängt das Bild vom verbeulten Tisch einen wesentlichen Aspekt von Einsteins Gedanken ein. Zuvor hielt man die Gravitation für eine rätselhafte Kraft, die ein Körper auf irgendeine Weise durch den leeren Raum auf einen anderen Körper ausübt. Nach Einstein erkannte man, dass Gravitation eine Verzerrung der Umgebung ist, die von einem Objekt verursacht wird und die Bewegung anderer Objekte beeinflusst. Gerade jetzt sind Sie diesen Ideen zufolge fest auf dem Fußboden verankert, weil Ihr Körper eine Einbuchtung des Raumes (eigentlich: der Raumzeit) hinuntergleiten will, die von der Erde verursacht wird.* Einstein verwendete Jahre

* Einen gekrümmten Raum kann man sich leichter vorstellen als die gekrümmte Raumzeit; deshalb konzentrieren sich viele populäre Darstellungen der Einsteinschen Gravitation ausschließlich auf den Raum. Für den Löwenanteil der Gravitation, die von bekannten Objekten wie Erde und Sonne ausgeübt wird, ist aber nicht die Krümmung des Raumes, sondern die Verzerrung der Zeit verantwortlich. Zur Verdeutlichung kann man sich zwei Uhren vorstellen, von denen eine auf dem Erdboden steht, die andere auf dem Empire State Building. Da die Uhr am Boden dem Erdmittelpunkt näher ist, ist sie einer geringfügig stärkeren Gravitation ausgesetzt als die Uhr hoch über Manhattan. Wie man mithilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie zeigen kann, vergeht die Zeit deshalb für beide mit geringfügig unterschiedlicher Geschwindigkeit: Die Uhr am Erdboden läuft im Vergleich zu der hoch obenstehenden ein winziges Bisschen langsamer (Milliardstel Sekunden im Jahr). Diese zeitliche Diskrepanz ist ein Beispiel dafür, was hier mit der Verzerrung der Zeit gemeint ist. Weiter besagt die Allgemeine Relativitätstheorie, dass Gegenstände sich dorthin bewegen, wo die Zeit langsamer abläuft; in einem gewissen Sinn »wollen« alle Gegenstände so langsam wie möglich altern. Aus Einsteinscher Sicht erklärt dies, warum ein Objekt zu Boden fällt, wenn man es loslässt.

darauf, einen geeigneten mathematischen Rahmen für seine Ideen zu entwickeln. Das Ergebnis waren die *Einsteinschen Feldgleichungen*, das Kernstück der Allgemeinen Relativitätstheorie, die exakt beschreiben, wie Raum und Zeit sich durch die Gegenwart einer bestimmten Materiemenge verzerren (genauer gesagt, einer Menge von Materie und Energie, denn nach der berühmten Gleichung $E = mc^2$, wobei E die Energie und m die Masse ist, sind diese beiden Größen austauschbar).³ Ebenso genau zeigt die Theorie dann auch, wie eine solche Verzerrung der Raumzeit sich auf die Bewegungen von allem, was sich darin bewegt – Sterne, Planeten, Kometen, das Licht selbst – auswirkt; auf diese Weise können die Physiker präzise Vorhersagen über die Bewegung im Kosmos treffen.

Belege für die Allgemeine Relativitätstheorie ließen nicht lange auf sich warten. In der Astronomie wusste man schon seit Langem, dass die Umlaufbahn des Merkur um die Sonne geringfügig von den Vorhersagen der Newtonschen Mathematik abweicht. Im Jahr 1915 berechnete Einstein die Bahn des Merkur mit seinen neuen Gleichungen noch einmal, und nun konnte er die Diskrepanz erklären – eine Erkenntnis, die er später gegenüber seinem Kollegen Adrian Fokker als so aufregend beschrieb, dass er angeblich mehrere Stunden lang Herzklopfen hatte. Im Jahr 1919 konnten Arthur Eddington und seine Kollegen durch astronomische Beobachtungen zeigen, dass das Licht weit entfernter Sterne, das auf seinem Weg zur Erde dicht an der Sonne vorbeiläuft, ein wenig abgelenkt wird, und zwar genauso, wie es den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie entspricht.⁴ Nach dieser Bestätigung – die *New York Times* behauptete in einer Schlagzeile: »Lights askew in heavens, men of science more or less agog over results of eclipse observations« (»Lichter am Himmel schief, Ergebnisse der Finsternis-Beobachtungen versetzt Männer der Wissenschaft in ziemliche Aufregung«) – gelangte Einstein als neues wissenschaftliches Genie der Welt und rechtmäßiger Erbe Isaac Newtons zu internationalem Ruhm.

Die beeindruckendsten experimentellen Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie standen aber noch bevor. In den siebziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts konnte man mithilfe von Wasserstoff-Maseruhren (ein Maser funktioniert ähnlich wie ein Laser, arbeitet aber im Mikrowellenbereich des Spektrums) experimentell die Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie zur Raumzeitkrümmung in unmittelbarer Nachbarschaft der Erde mit einer Messunsicherheit von weniger als 0,1 Promille bestätigen. Im Jahr 2003 nutzte man die Cassini-Huygens-Raumsonde zu einer genauen Vermessung der Ausbreitung von Radiowellen, die auf ihrem Weg zur Erde nahe an der Sonne vorbeilaufen; die damals gesammelten Daten bestätigen die Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie

mit einer Genauigkeit von 0,02 Promille. Und wie es sich für eine Theorie, die mittlerweile wirklich erwachsen geworden ist, gehört, laufen viele von uns mit der Allgemeinen Relativitätstheorie in der Hand herum. Das Global Positioning System (GPS), zu dem wir beiläufig mit unserem Smartphone Zugang haben, bedient sich der Kommunikation mit Satelliten, deren eingebaute Zeitmessgeräte ganz automatisch die Verzerrung der Raumzeit berücksichtigen, der sie auf ihrer Umlaufbahn um die Erde ausgesetzt sind. Würden die Satelliten dies nicht tun, wären die von ihnen erzeugten Positionsbestimmungen schon nach kurzer Zeit ungenau. Was 1916 noch eine Reihe abstrakter mathematischer Gleichungen war, die Einstein als neue Beschreibung für Raum, Zeit und Gravitation eingeführt hatte, wird heute routinemäßig von Geräten genutzt, die in unsere Hosentasche passen.

Das Universum und die Teekanne

Einstein hauchte der Raumzeit Leben ein. Er stellte die jahrtausendealte, auf Alltagserfahrungen aufgebaute Intuition infrage, dass Raum und Zeit als unveränderlicher Hintergrund zu betrachten seien. Wer hätte sich jemals vorzustellen vermocht, dass die Raumzeit sich winden und biegen kann und damit den unsichtbaren Meisterchoreografen für die Bewegungen im Kosmos darstellt? Diesen revolutionären Tanz malte Einstein sich aus, und später wurde er durch Beobachtungen bestätigt. Dennoch geriet Einstein schon wenig später unter dem Gewicht uralter, aber unbegründeter Vorurteile in Zweifel.

In dem Jahr nach Veröffentlichung der Allgemeinen Relativitätstheorie wandte Einstein sie im größten nur vorstellbaren Maßstab an: auf das Universum als Ganzes. Das mag man für eine schwindelerregende Aufgabe halten, aber die Kunst der theoretischen Physik besteht gerade darin, das entsetzlich Komplizierte so zu vereinfachen, dass die wesentlichen physikalischen Aspekte erhalten bleiben, während die theoretische Analyse gleichzeitig handhabbar wird. Es ist die Kunst zu wissen, was man außer Acht lassen kann. Mit dem sogenannten *kosmologischen Prinzip* formulierte Einstein einen vereinfachenden Rahmen, der zum Ausgangspunkt für die Kunst und Wissenschaft der Kosmologie wurde.

Die Aussage des kosmologischen Prinzips lautet: Auf großen Längenskalen betrachtet ist das Universum gleichförmig. Denken wir einmal an unseren Frühstückstee. Im mikroskopischen Maßstab ist er unregelmäßig und weist viele verschiedene Strukturen auf: hier ein paar H_2O -Moleküle, da ein wenig leerer Raum, hier einige Polyphenol- und Tanninmoleküle, wieder leerer Raum, und

so weiter. Im makroskopischen, dem bloßen Auge zugänglichen Maßstab jedoch ist der Tee gleichförmig goldbraun. Einstein glaubte, das Universum sei wie eine solche Tasse Tee. Die Unterschiede, die wir beobachten – hier die Erde, da leerer Raum, dann der Mond, wieder leerer Raum, gefolgt von Venus, Merkur und weiterem leerem Raum, dann die Sonne –, sind Unregelmäßigkeiten auf vergleichsweise kleinen Größenskalen. Im kosmologischen Maßstab, so vermutete er, kann man solche Abweichungen außer Acht lassen, weil sie sich wie im Tee gegenseitig ausmitteln, so dass sich ein Universum ergibt, das im Durchschnitt überall die gleichen Eigenschaften hat.

Die Belege für das kosmologische Prinzip waren zu Einsteins Zeit im besten Falle dürftig (selbst die Frage, ob es andere Galaxien gibt, war noch umstritten), aber er ließ sich von der festen Überzeugung leiten, dass kein Ort im Kosmos etwas Besonderes sei. Im Durchschnitt, so glaubte er, sollte jede Region des Universums mit jeder anderen gleichberechtigt sein, und deshalb sollten sie im Wesentlichen die gleichen physikalischen Eigenschaften besitzen. In den Jahren, die seither verstrichen sind, hat man mit astronomischen Beobachtungen stichhaltige Belege für das kosmologische Prinzip gewonnen – zumindest wenn man Raumregionen mit einem Durchmesser von mindestens 100 Millionen Lichtjahren betrachtet (was ungefähr dem Tausendfachen der Länge unserer Milchstraße von einem Ende zum anderen entspricht). Stellen wir uns vor, dass wir im Weltall einen gigantischen Würfel mit einer Kantenlänge von 100 Millionen Lichtjahren abgrenzen und dann (beispielsweise in einer Entfernung von einer Milliarde Lichtjahren) einen zweiten solchen Würfel definieren. Dann bestimmen wir die durchschnittlichen Eigenschaften des Weltalls in jedem der beiden Würfel, etwa die durchschnittliche Zahl von Galaxien, die durchschnittliche Materiemenge und die durchschnittliche Temperatur. Dass auf Größenskalen von mehr als 100 Millionen Lichtjahren das kosmologische Prinzip gilt, heißt, dass diese Durchschnittswerte für unsere beiden imaginären Würfel dieselben sein werden. Oder, kurz gesagt: Hat man ein Stück des Kosmos mit einem Durchmesser von 100 Millionen Lichtjahren gesehen, weiß man auch mehr oder weniger, wie der Rest des Weltalls aussieht.

Eine solche Homogenität ist entscheidend, wenn wir mit den Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie das gesamte Universum untersuchen wollen. Warum? Stellen wir uns einmal einen schönen, glatten Strand vor, und ich bitte Sie, seine Eigenschaften im kleinen Maßstab zu beschreiben – das heißt die Eigenschaften jedes einzelnen Sandkorns. Dann sind Sie aufgeschmissen – die Aufgabe ist zu umfangreich. Bitte ich Sie aber, nur die Gesamtmerkmale des Strandes zu beschreiben (beispielsweise das Durchschnittsgewicht eines Kubik-

meters Sand, die durchschnittliche Lichtreflexion der Oberfläche je Quadratmeter, und so weiter), ist die Aufgabe beträchtlich besser zu lösen. Und lösbar wird sie, weil der Strand überall im Durchschnitt die gleichen Eigenschaften hat. Wir messen das durchschnittliche Gewicht des Sandes, die Temperatur und die Lichtreflexion an einer Stelle, und schon sind wir fertig. Nehmen wir die gleichen Messungen an einer anderen Stelle vor, gelangen wir im Wesentlichen zu den gleichen Ergebnissen. In einem gleichförmigen Universum ist es genauso. Jeden Planeten, jeden Stern und jede Galaxie beschreiben zu wollen, wäre eine hoffnungslose Aufgabe. Die durchschnittlichen Eigenschaften eines gleichförmigen Kosmos zu beschreiben, ist sehr viel einfacher – und seit es die Allgemeine Relativitätstheorie gibt, ist es machbar.

Das geht folgendermaßen: In groben Zügen kann man den Inhalt eines großen Raumvolumens durch die Angabe beschreiben, wie viel Material es enthält; genauer gesagt: durch die Dichte der Materie oder, noch genauer: durch die Dichte der Materie und Energie, die in dem betreffenden Volumen enthalten sind. Die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie beschreiben, wie sich diese Dichte im Laufe der Zeit verändert. Aber wenn man nicht das kosmologische Prinzip zu Hilfe nimmt, ist die Analyse der Gleichungen hoffnungslos kompliziert. Insgesamt sind es zehn, und jede Gleichung hängt auf komplizierte Weise von den anderen ab – insgesamt bilden sie einen festen mathematischen gordischen Knoten. Wie Einstein glücklicherweise herausfand, vereinfachen sich die mathematischen Verhältnisse, wenn man die Gleichungen auf ein homogenes Universum anwendet; dann reduzieren sich die zehn Gleichungen letztlich auf eine einzige. Das kosmologische Prinzip durchschlägt den gordischen Knoten, indem es die mathematische Beschreibung der Auswirkungen der im Kosmos enthaltenen Materie und Energie auf eine einzige Gleichung zusammenschnurren lässt (die in den Anmerkungen abgedruckt ist).⁵

Weniger glücklich war aus Einsteins Sicht etwas anderes: Als er diese Gleichung untersuchte, stieß er auf etwas Unerwartetes und für ihn Unverdauliches. Nach der allgemein herrschenden wissenschaftlichen und philosophischen Überzeugung war das Universum auf großen Skalen nicht nur homogen, sondern auch unveränderlich. Ganz ähnlich wie die schnellen Molekülbewegungen in unserem Tee, die sich im Durchschnitt zu einer unbeweglich aussehenden Flüssigkeit summieren, sollten auch die astronomischen Bewegungen – beispielsweise der Planeten, die um die Sonne kreisen, und der Sonne, die in der Galaxis kreist – einen im Durchschnitt unveränderlichen Kosmos ergeben. Einstein hielt an dieser Sichtweise fest, merkte jedoch zu seiner Bestürzung, dass sie im Widerspruch zur Allgemeinen Relativitätstheorie stand. Die Gleichungen

zeigten, dass die Dichte von Materie und Energie im Laufe der Zeit nicht konstant bleiben *kann*. Die Dichte wird mit der Zeit entweder größer oder geringer.

Die mathematische Analyse, die zu dieser Schlussfolgerung führt, ist kompliziert, aber die dahinter stehenden physikalischen Verhältnisse sind leicht zu begreifen. Stellen wir uns einen Baseball vor, der vom Standort des Schlagmanns aus in Richtung des Spielfeldzauns fliegt. Anfangs steigt der Ball aufwärts; dann verlangsamt er seinen Flug, erreicht den höchsten Punkt seiner Bahn und fällt schließlich wieder nach unten. Dass er nicht träge wie ein Luftschiff in der Luft schweben bleibt, liegt an der Schwerkraft: Sie ist eine Anziehungskraft, wirkt nur in einer Richtung und zieht den Ball zur Erdoberfläche. Eine Situation des Stillstandes, beispielsweise ein Patt beim Tauziehen, erfordert gleich große, entgegengesetzt gerichtete Kräfte, die sich gegenseitig aufheben. Beim Luftschiff stammt der Auftrieb, die Gegenkraft zu der abwärts gerichteten Gravitation, vom Luftdruck (das Luftschiff ist mit Helium gefüllt, das leichter ist als Luft); auf den Ball in der Luft dagegen wirkt keine Gegenkraft zur Gravitation ein (der Luftwiderstand bremst den in Bewegung befindlichen Ball zwar ab, würde aber, sobald sich der Ball nicht mehr bewegt, keine Rolle mehr spielen), und deshalb kann der Ball nicht in einer festen Höhe verbleiben.

Wie Einstein feststellte, ähnelt das Universum einem Baseball stärker als einem Luftschiff. Da es keine nach außen gerichtete Kraft gibt, die der Anziehung der Schwerkraft entgegenwirkt, lässt sich mit der Allgemeinen Relativitätstheorie zeigen, dass das Universum nicht unbeweglich sein kann. Der Raum expandiert entweder, oder er zieht sich zusammen, aber er kann nicht einfach unverändert bleiben: Galaxien, die sich heute gemeinsam in einem Raumvolumen mit 100 Millionen Lichtjahren Seitenlänge befinden, können sich morgen nicht in einem gleich großen Raumvolumen befinden. Stattdessen ist das Volumen entweder größer, und die Dichte der darin enthaltenen Materie hat sich entsprechend vermindert (weil die gleiche Anzahl von Galaxien nun auf ein größeres Volumen verteilt ist), oder es ist kleiner, und die Dichte der Materie ist angestiegen (weil die gleiche Anzahl von Galaxien jetzt in ein kleineres Volumen gepackt ist).⁶

Vor diesem Gedanken schreckte Einstein zurück. Den mathematischen Aussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie zufolge verändert sich das Universum auf großen Skalen, weil sein Substrat – der Raum selbst – sich verändert. Der ewige, unbewegliche Kosmos, der sich nach Einsteins Erwartungen aus seinen Berechnungen ergeben sollte, war schlicht und einfach nicht vorhanden. Einstein hatte die Wissenschaft der Kosmologie begründet, war aber zutiefst bekümmert darüber, wohin die Mathematik ihn geführt hatte.

Die Gravitations-Steuererklärung

Häufig hört man, Einstein sei der Frage ausgewichen – er habe sich wieder zu seinen Notizbüchern begeben und die wunderschönen Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie in seiner Verzweiflung so manipuliert, dass sie nicht nur zu einem gleichförmigen, sondern auch zu einem unveränderlichen Universum passten. Das stimmt nur zum Teil. Einstein wandelte seine Gleichungen tatsächlich so ab, dass sie mit einem statischen Kosmos vereinbar waren. Die Veränderung war aber geringfügig und durchaus sinnvoll.

Um ein Gefühl für seine mathematische Vorgehensweise zu bekommen, können wir uns vorstellen, wir würden eine Steuererklärung ausfüllen. Zwischen den Zeilen, in die wir Zahlen eintragen müssen, gibt es andere, die wir leer lassen. Mathematisch bedeutet die leere Zeile, dass dort die Zahl Null eingetragen ist, psychologisch verbindet sich damit indes noch eine umfassendere Bedeutung. Sie besagt, dass wir die Zeile leer gelassen haben, weil wir zu dem Schluss gelangt sind, dass sie für unsere finanzielle Situation keine Bedeutung hat.

Wären die mathematischen Inhalte der Allgemeinen Relativitätstheorie wie eine Steuererklärung aufgebaut, hätte sie drei Zeilen. Die erste würde die Geometrie der Raumzeit – ihre Krümmung und Verzerrung – beschreiben, in der sich die Gravitation verkörpert. Eine zweite enthielte Angaben über die Verteilung der Materie im Raum und damit der Quelle der Gravitation – also über die Ursache der Krümmung und Verzerrung. In zehnjähriger, eifriger Forschungsarbeit hatte Einstein die mathematische Beschreibung für diese beiden Aspekte ausgearbeitet und so die beiden Zeilen mit großer Sorgfalt ausgefüllt. Zur Vervollständigung der Allgemeinen Relativitätstheorie fehlt aber noch eine dritte Zeile, die mathematisch genau den gleichen Status hat wie die beiden anderen, aber eine weniger offensichtliche physikalische Bedeutung. Als die Allgemeine Relativitätstheorie den Raum und die Zeit zu dynamischen Mitwirkenden bei der Entfaltung des Kosmos erklärte, erhob sie beide von rein sprachlichen Beschreibungen darüber, wo und wann etwas geschieht, zu physikalischen Gebilden mit eigenen charakteristischen Eigenschaften. Die dritte Zeile in der Steuererklärung der Allgemeinen Relativitätstheorie erfasst die quantitative Beschreibung eines besonderen, der Raumzeit innewohnenden Merkmals, das für die Gravitation von Bedeutung ist: *der Energiemenge, die in das Gewebe des Raumes selbst verwoben ist*. Genau wie jeder Kubikmeter Wasser eine bestimmte Energiemenge enthält, die sich zusammenfassend in der Temperatur des Wassers verkörpert, so enthält auch jeder Kubikmeter des Raumes automatisch eine bestimmte Menge an Energie, und die wird durch die Zahl in der dritten Zeile summiert.

In dem Fachartikel, in dem er die Allgemeine Relativitätstheorie veröffentlichte, berücksichtigte Einstein diese dritte Zeile nicht. Mathematisch bedeutet das, dass er ihren Wert für null erklärte, praktisch dürfte Einstein sie wie eine leere Zeile in der Steuererklärung einfach übergangen haben.

Als sich herausstellte, dass die Allgemeine Relativitätstheorie sich nicht mit einem unveränderlichen Universum verträgt, beschäftigte Einstein sich noch einmal mit der Mathematik, und dieses Mal sah er sich die dritte Zeile genauer an. Dabei wurde ihm klar, dass weder Beobachtungen noch Experimente eine Rechtfertigung dafür boten, dort eine Null einzutragen. Außerdem erkannte er, dass sie bemerkenswerte physikalische Auswirkungen haben konnte.

Wenn er in der dritten Zeile statt der Null eine positive Zahl einsetzte und so den Raum mit einer einheitlichen, positiven Energie ausstattete, dann ergibt sich (aus Gründen, die ich im nächsten Kapitel erläutern werde), dass jede Raumregion jede andere abstößt, so dass wir es mit etwas zu tun haben, das die meisten Physiker für unmöglich gehalten hatten: *abstoßender* Gravitation. Und noch etwas anderes fand Einstein heraus: Wenn man für die Zahl in der dritten Zeile einen ganz bestimmten Wert wählt, dann bildet die abstoßende Gravitationskraft, die insgesamt im Kosmos entsteht, ein genaues Gegengewicht zu der bekannten Gravitationsanziehung, die von der im Raum enthaltenen Materie ausgeht; insgesamt folgt daraus ein unbewegliches Universum. Wie ein schwebendes Luftschiff, das weder steigt noch sinkt, wäre das Universum damit unveränderlich.

Einstein bezeichnete den Eintrag in der dritten Zeile als *kosmologisches Glied* oder *kosmologische Konstante*; nachdem er sie eingeführt hatte, konnte er aufatmen. Oder wenigstens leichter atmen. Wenn es im Universum eine kosmologische Konstante der richtigen Größe gab – das heißt, wenn der Raum mit der richtigen Menge an innerer Energie ausgestattet war –, stand Einsteins Gravitationstheorie im Einklang mit der allgemein herrschenden Überzeugung, dass das Universum sich auf großen Skalen nicht verändert. Warum der Raum genau die richtige Energiemenge enthalten und seinen Balanceakt damit überhaupt erst möglich machen sollte, konnte er nicht erklären, aber zumindest hatte er gezeigt, dass die Allgemeine Relativitätstheorie, ergänzt um eine kosmologische Konstante der richtigen Größe, den Kosmos erklärte, den er und andere erwartet hatten.⁷

Das Uratom

Vor diesem Hintergrund wandte sich Lemaître 1927 in Brüssel bei der Solvay-Konferenz an Einstein und erläuterte ihm seinen Befund, wonach sich auf Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie ein neues kosmologisches Modell eines expandierenden Universums aufbauen ließe. Einstein, der sich bereits eingehend mit der für ein unveränderliches Universum nötigen Mathematik herumgeschlagen und ganz ähnliche Behauptungen von Friedmann abgetan hatte, brachte wenig Geduld dafür auf, sich noch einmal mit einem expandierenden Kosmos auseinanderzusetzen. Deshalb warf er Lemaître vor, dieser sei blind nur der Mathematik gefolgt und habe »abscheuliche Physik« praktiziert, indem er sich mit einer offenkundig absurden Schlussfolgerung abgefunden habe.

Ein Rüffel von einer angesehenen Persönlichkeit ist ein nicht geringer Rückschlag, aber für Lemaître war er nur von kurzer Dauer. Schon 1929 sammelte der amerikanische Astronom Edwin Hubble mit dem damals größten Teleskop der Welt in der Mount-Wilson-Sternwarte überzeugende Belege dafür, dass alle weit entfernten Galaxien sich von der Milchstraße entfernen. Die von dort kommenden Photonen, die Hubble analysierte, waren mit einer eindeutigen Botschaft zur Erde gelangt: Das Universum ist nicht unbeweglich. Es expandiert tatsächlich. Die Begründung, mit der Einstein die kosmologische Konstante eingeführt hatte, war falsch. Seit jener Zeit wurde das Urknallmodell, wonach der Kosmos in einem Zustand enorm hoher Dichte begann und seither stetig expandiert, zur allgemein anerkannten wissenschaftlichen Schöpfungsgeschichte.⁸

Damit waren Lemaître und Friedmann bestätigt. Friedmann wurde das Verdienst zuerkannt, als Erster die Lösungen der Einsteinschen Gleichungen untersucht zu haben, die das expandierende Universum beschreiben, und Lemaître gestand man zu, dass er sie unabhängig davon zu einem soliden kosmologischen Szenario entwickelt hatte. Zu Recht wurden ihre Arbeiten als triumphale mathematische Einsichten in die Funktionsweise des Kosmos gepriesen. Einstein dagegen wünschte sich später, er hätte sich nie mit der dritten Zeile in der Steuererklärung der Allgemeinen Relativitätstheorie herumgeschlagen. Hätte er nicht seine unbegründete Überzeugung eingebracht, das Universum sei unbeweglich, dann hätte er auch nicht die kosmologische Konstante formuliert, sondern die Expansion des Kosmos vielleicht schon zehn Jahre, bevor man sie beobachtete, vorhergesagt.

Dennoch: Die Geschichte der kosmologischen Konstante war damit noch lange nicht zu Ende.

Modelle und Daten

Zum Urknallmodell der Kosmologie gehört ein Detail, das sich als entscheidend erweisen wird. Das Modell liefert nicht nur ein einziges kosmologisches Szenario, sondern eine ganze Handvoll; in all diesen Szenarien dehnt sich das Universum aus, sie unterscheiden sich jedoch in der großräumigen Geometrie des Raumes – und insbesondere im Hinblick auf die Frage, ob der Raum insgesamt endliche oder unendliche Ausmaße hat. Da die Unterscheidung zwischen endlich und unendlich für unsere Gedanken über Parallelwelten von zentraler Bedeutung ist, möchte ich hier die Möglichkeiten genauer erläutern.

Das kosmologische Prinzip – die unterstellte Gleichförmigkeit des Kosmos – bedeutet für die Geometrie des Raumes eine Einschränkung, denn die meisten Räume sind nicht gleichförmig genug, um als Baustein der kosmologischen Modelle infrage zu kommen: Sie haben hier eine Ausbeulung, dort eine Abflachung oder hier und da eine Verzerrung. Nun ist es zwar nicht so, als ließe sich aus dem kosmologischen Prinzip eine *einzige* Geometrie unserer drei Raumdimensionen ableiten, aber immerhin werden die Möglichkeiten auf eine stark eingeschränkte Kandidatengruppe reduziert. Selbst Profis haben Schwierigkeiten, sich diese Raumformen bildlich vorzustellen. Hilfreich ist aber die Tatsache, dass die Situation in zwei Dimensionen mathematisch genau analog ist und sich tatsächlich bildlich wiedergeben lässt.

Betrachten wir zu diesem Zweck zunächst einmal eine vollkommen runde Billardkugel. Ihre Oberfläche ist zweidimensional (genau wie auf der Erdoberfläche können wir jeden Ort auf der Oberfläche der Billardkugel durch zwei Zahlenwerte – beispielsweise analog zur geografischen Länge und Breite – beschreiben; das meinen wir, wenn wir die Oberfläche zweidimensional nennen) und völlig gleichförmig in dem Sinn, dass jede Stelle genau wie jede andere aussieht. Mathematiker bezeichnen die Oberfläche der Billardkugel als *zweidimensionale Kugelfläche*, die eine *konstante positive Krümmung* aufweist. Salopp ausgedrückt, bedeutet »positiv«, dass unser Spiegelbild auf einem solchermaßen gekrümmten Spiegel in die Länge und in die Breite gezerzt wäre, und »konstant« heißt, dass die Verzerrung überall gleich aussieht, unabhängig davon, an welcher Stelle der Kugel sich die Spiegelung abspielt.

Als Nächstes stellen wir uns eine völlig glatte Tischplatte vor. Wie die Billardkugel, so hat auch sie eine gleichförmige Oberfläche. Wenn wir Ameisen wären und über die Tischplatte kriechen würden, würde sich uns tatsächlich von jeder Stelle der Platte die gleiche Aussicht bieten wie von jeder anderen. Das gilt allerdings nur, solange wir uns von der Tischkante fernhalten, aber es ist nicht

schwer, diese unschöne Einschränkung zu beseitigen: Wir brauchen uns bloß eine Tischplatte ohne Kanten vorzustellen. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten: Die erste wäre eine Tischplatte, die sich nach rechts, links, vorn und hinten unendlich weit fortsetzt. Eine solche unendlich große Oberfläche ist ungewöhnlich, aber damit ist das Ziel der Vermeidung von Kanten, an denen man herunterfallen könnte, erreicht. Die zweite Möglichkeit wäre eine Tischplatte, die einem Bildschirm aus der Frühzeit der Videospiele ähnelt. Wenn Ms. Pacman den linken Rand überschreitet, taucht sie am rechten wieder auf; verschwindet sie am unteren Rand, ist sie plötzlich oben zu sehen. Eine wirkliche Tischplatte kann man zwar nicht in dieser Weise umbauen. Aber das, was ich hier beschrieben habe, ist ein völlig zulässiger geometrischer Raum, der als zweidimensionaler *Torus* bezeichnet wird. Ausführlicher erörtere ich diese Form in den Anmerkungen;⁹ hier brauche ich nur auf zwei Eigenschaften hinzuweisen: Wie die unendlich große Tischplatte ist auch der Videospiel-Bildschirm gleichförmig und eben, und er hat keine Kanten oder Ränder. Die scheinbaren Grenzen, an die Ms. Pacman stößt, sind Fiktionen; sie können überschritten werden, und trotzdem bleibt man im Spiel.

In der Sprache der Mathematiker haben die unendliche Tischplatte und der Videospiel-Bildschirm eine *konstante Krümmung null*. »Null« bedeutet in diesem Zusammenhang: Würden wir unser Spiegelbild in einer spiegelblanken Tischplatte oder einem Videospiel-Bildschirm betrachten, wäre dieses Bild in keiner Richtung verzerrt, und »konstant« bedeutet wie zuvor, dass das Bild immer gleich aussieht, ganz gleich, an welcher Stelle wir es betrachten. Der Unterschied zwischen den beiden Gebilden wird nur aus einer globalen Perspektive deutlich: Wenn wir uns auf einer unendlichen Tischplatte auf den Weg machen und immer die gleiche Richtung beibehalten, kommen wir nie mehr nach Hause; auf einem Videospiel-Bildschirm dagegen können wir nach einer Weile wieder an unseren Ausgangspunkt zurückkehren, obwohl wir während der Fahrt nie am Lenkrad gedreht haben und immer geradeaus gefahren sind.

Schließlich – und sich das auszumalen, ist ein wenig schwieriger – ist auch ein Pringles-Kartoffelchip, den man unendlich erweitert, ein vollkommen gleichförmiges Gebilde, und zwar eines mit einer Eigenschaft, die der Mathematiker als *konstante negative Krümmung* bezeichnet. Das bedeutet: Wenn wir unser Spiegelbild an einer beliebigen Stelle eines spiegelglatten Pringles-Chips betrachten, sieht das Bild so aus, als wäre es in alle Richtungen zusammengestaucht.

Glücklicherweise lassen sich diese Beschreibungen zweidimensionaler Flächen konstanter Krümmung mühelos auf den eigentlichen Gegenstand unseres Interesses übertragen: den dreidimensionalen Raum des Kosmos. Positive,

negative und Null-Krümmungen – eine gleichmäßige Streckung nach außen, eine Schrumpfung nach innen oder überhaupt keine Verzerrung – charakterisieren ebenso gut auch dreidimensionale Raumformen. Eigentlich haben wir sogar doppeltes Glück: Dreidimensionale Raumformen darzustellen, ist zwar schwierig (wenn wir uns geometrische Gebilde vorstellen, platziert unser Geist sie stets in einer dreidimensionalen Umgebung – ein Flugzeug *im* Raum, ein Planet *im* Weltraum –, aber wenn es um den Raum selbst geht, gibt es keine äußere Umgebung, in der er enthalten sein könnte); die gleichförmigen dreidimensionalen Räume sind aber so unmittelbare mathematische Entsprechungen zu ihren zweidimensionalen Vettern, dass man ohne Bedenken das Gleiche tun kann wie die meisten Physiker: Man benutzt in der geistigen Bilderwelt die zweidimensionalen Beispiele.

In der Tabelle unten habe ich die möglichen Raumformen zusammengefasst und auch angegeben, dass manche von ihnen (die Kugel, der Videospiel-Bildschirm) eine endliche Ausdehnung haben, während andere (die endlose Tischplatte, der endlose Pringles-Chip) unendlich sind. So wie die Tabelle 2.1 hier steht, ist sie unvollständig. Es gibt weitere Möglichkeiten mit so hübschen Namen wie *binärer Tetraederraum* oder *Poincaré-Dodekaeder-Raum*, die ebenfalls konstante Krümmung aufweisen. Ich habe sie hier nicht mit aufgenommen, weil es schwieriger ist, sie mithilfe von Alltagsgegenständen bildlich darzustellen. Durch geeignetes Zerschneiden und Verkleben kann man sie aus den in der Liste aufgeführten Raumformen gewinnen; die Tabelle 2.1 führt also eine gute repräsentative Stichprobe auf. Aber solche Einzelheiten sind nur von untergeordneter Bedeutung für die wichtigste Erkenntnis: *Die Gleichförmigkeit des Kosmos, wie sie im kosmologischen Prinzip formuliert ist, bedeutet für die möglichen Raumformen des Universums eine erhebliche Einschränkung. Manche der möglichen Räume haben eine unendliche räumliche Ausdehnung, andere nicht.*¹⁰

Raumformen	Art der Krümmung	Räumliche Ausdehnung
Kugel	positiv	endlich
Tischplatte	null (»flach«)	unendlich
Videospiel-Bildschirm	null (»flach«)	endlich
Pringles-Chip	negativ	unendlich

Tabelle 2.1 Mögliche Raumformen unter der Annahme, dass alle Orte im Universum gleichberechtigt sind (kosmologisches Prinzip).

Unser Universum

Die kosmische Expansion, wie sie von Friedmann und Lemaître mathematisch formuliert wurde, lässt sich direkt auf jedes Universum übertragen, das eine der hier beschriebenen einfachen Formen hat. Eine positive Krümmung kann man sich in der zweidimensionalen geistigen Bilderwelt als Oberfläche eines Ballons vorstellen, der mit Luft gefüllt wird und sich ausdehnt. Die Null-Krümmung ist mit einem flachen Gummituch vergleichbar, das gleichmäßig immer weiter in alle Richtungen gedehnt wird. Und wenn wir uns die negative Krümmung vorstellen wollen, geben wir diesem Gummituch die Form eines Pringles-Chips und machen uns noch mal ans Drehen. Wenn man sich die Galaxien in diesem Modell als Glitter vorstellt, der gleichmäßig auf einer solchen Oberfläche verstreut ist, führt die Ausdehnung des Raumes dazu, dass die einzelnen Glitterpünktchen – die Galaxien – sich voneinander entfernen, genau wie Hubble es 1929 bei der Beobachtung weit entfernter Galaxien entdeckt hatte.

Das ist ein überzeugendes kosmologisches Ordnungsschema, aber wenn wir es verwenden wollen, um ein Modell unseres Kosmos zu konstruieren, dann müssen wir feststellen, welche der gleichförmigen Raumformen unser Universum tatsächlich beschreibt. Die Form eines bekannten Gegenstandes, beispielsweise eines Donuts, eines Balls oder eines Eisblocks, können wir leicht ermitteln: Wir nehmen ihn in die Hand und drehen ihn hin und her. Die Schwierigkeit besteht darin, dass wir so mit dem Universum nicht verfahren können, das heißt, wir müssen seine Form mit indirekten Methoden herausfinden. Eine mathematische Vorgehensweise bieten die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Sie zeigen, dass die Krümmung des Raumes sich auf eine einzige beobachtbare Größe zurückführen lässt: auf die Dichte der Materie (genauer gesagt, die Dichte von Materie und Energie) im Raum. Ist hinreichend viel Materie vorhanden, dann sorgt die Gravitation dafür, dass sich der Raum in sich selbst zurückkrümmt, so dass sich eine Kugelform ergibt. Bei wenig Materie steht es dem Raum frei, sich in der Form des Pringles-Chips nach außen auszudehnen. Und wenn genau die richtige Menge an Materie vorhanden ist, hat der Raum die Krümmung null.*

* Vor dem Hintergrund der früheren Erläuterungen darüber, wie Materie die Region, in der sie sich befindet, krümmt, fragt sich manch einer vielleicht, wie überhaupt keine Krümmung vorhanden sein kann, obwohl es Materie gibt. Die Erklärung liegt darin, dass gleichmäßig verteilte Materie wie andere Materieverteilungen auch ganz allgemein zur Krümmung der Raumzeit führt; in diesem besonderen Fall ist die Krümmung des Raumes zwar gleich null, die der Raumzeit aber nicht.

Die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie liefern auch eine genaue zahlenmäßige Abgrenzung zwischen den drei Möglichkeiten. Wie man aus den mathematischen Berechnungen entnehmen kann, liegt »genau die richtige Materiemenge«, die sogenannte kritische Dichte, heute bei rund 2×10^{-29} Gramm pro Kubikzentimeter, das entspricht ungefähr sechs Wasserstoffatomen pro Kubikmeter oder, um vertrautere Begriffe zu gebrauchen, einem einzigen Regentropfen in einem Volumen von der Größe der Erde.¹¹ Wenn man sich umsieht, könnte man den Eindruck bekommen, als würde das Universum oberhalb der kritischen Dichte liegen, aber das wäre ein voreiliger Schluss. Die mathematische Berechnung der kritischen Dichte geht davon aus, dass die Materie gleichmäßig im Raum verteilt ist. Man muss sich also vorstellen, dass Erde, Mond, Sonne und alles andere auseinandergenommen werden und ihre Atome sich gleichmäßig im Kosmos verteilen. Dann stellt sich die Frage, ob jeder Kubikmeter mehr oder weniger wiegen würde als sechs Wasserstoffatome.

Da sich aus der durchschnittlichen Dichte der Materie im Universum so wichtige kosmologische Folgerungen ergeben, bemühen sich die Astronomen schon seit Jahrzehnten, sie zu messen. Dazu bedienen sie sich einer einfachen Methode. Mit leistungsfähigen Teleskopen beobachten sie eingehend große Volumina des Raumes und addieren die Masse der Sterne, die sie sehen können, sowie die Masse der übrigen Materie, auf deren Gegenwart man durch Analyse der Bewegungen von Sternen und Galaxien schließen kann. Bis vor Kurzem deuteten die Beobachtungen darauf hin, dass die durchschnittliche Dichte niedrig ist und nur rund 27 Prozent der kritischen Dichte beträgt. Das wären etwa zwei Wasserstoffatome in jedem Kubikmeter, und dieser Wert würde auf ein negativ gekrümmtes Universum schließen lassen.

Ende der neunziger Jahre jedoch geschah etwas Außergewöhnliches. Durch einige großartige Beobachtungen und einen Gedankengang, den wir in Kapitel 6 genauer betrachten werden, gelangten die Astronomen zu der Erkenntnis, dass sie in der Bilanz einen entscheidenden Bestandteil außer Acht gelassen hatten: eine diffuse Energie, die offenbar gleichmäßig im Raum verteilt ist. Dieser Befund war für fast alle ein Schock. Eine Energie, die den Raum durchdringt? Das hört sich nach der kosmologischen Konstante an, die Einstein, wie wir erfahren haben, acht Jahrzehnte zuvor zunächst eingeführt und dann wieder zurückgezogen hatte. War die kosmologische Konstante durch moderne Beobachtungen wieder auferstanden?

Mit Sicherheit können wir das bis heute nicht sagen. Selbst jetzt, etwas mehr als ein Jahrzehnt nach den ersten Beobachtungen, haben die Astronomen noch nicht eindeutig nachgewiesen, ob die Energie konstant ist oder ob ihre

Menge in einer bestimmten Raumregion sich im Laufe der Zeit verändert. Eine kosmologische Konstante wäre, wie der Name schon sagt (und wie man auch aus ihrer mathematischen Darstellung als einzelne, festgelegte Zahl in der Steuererklärung der Allgemeinen Relativitätstheorie ableiten kann) unveränderlich. Um die allgemeinere Möglichkeit zu berücksichtigen, dass die Energiedichte eine Entwicklung durchmacht, und auch um deutlich zu machen, dass diese Energie kein Licht abgibt (was die Erklärung dafür ist, dass sie dem Nachweis solange entging), haben die Astronomen einen neuen Begriff geprägt: *Dunkle Energie*. »Dunkel« sind bislang auch unsere Erkenntnisse auf diesem Gebiet. Die Entstehung, die grundlegende Zusammensetzung und die detaillierten Eigenschaften der Dunklen Energie kann niemand erklären – diese Themen sind Gegenstand aktueller Forschung; wir werden in späteren Kapiteln darauf zurückkommen.

Aber trotz der vielen offenen Fragen ist man durch eingehende Beobachtungen mit dem Hubble-Weltraumteleskop und mit Observatorien am Boden zu einer einheitlichen Ansicht über die *Menge* der Dunklen Energie gelangt, die heute den Raum erfüllt. Das Ergebnis weicht von dem ab, das Einstein vor langer Zeit vorgeschlagen hatte (er hatte einen Wert postuliert, der zu einem statischen Universum führen würde, während unser Universum in Wirklichkeit expandiert). Das ist nicht verwunderlich. Bemerkenswert ist vielmehr das Ergebnis, zu dem man mit den Messungen gelangt ist: Die Dunkle Energie, die den Raum ausfüllt, trägt rund 73 Prozent zur kritischen Dichte bei. *Addiert man dies zu den 27 Prozent, die man zuvor bereits gemessen hatte, so gelangt man als Summe zu 100 Prozent der kritischen Dichte, also zu genau der richtigen Materie- und Energiemenge für ein Universum mit der Raumkrümmung null.*

Derzeit sprechen die Daten also für ein Universum, das stetig expandiert und wie die dreidimensionale Version der unendlichen Tischplatte oder des endlichen Videospiel-Bildschirms geformt ist.

Wirklichkeit in einem unendlichen Universum

Am Anfang dieses Kapitels habe ich erklärt, wir wüssten nicht, ob das Universum endlich oder unendlich ist. Wie ich dann in den vorangegangenen Abschnitten dargelegt habe, ergeben sich beide Möglichkeiten ganz natürlich aus unseren theoretischen Überlegungen, und beide vertragen sich mit den Ergebnissen genauester astrophysikalischer Messungen und Beobachtungen. Wie können wir vielleicht eines Tages durch Beobachtungen feststellen, welche der beiden Möglichkeiten die richtige ist?