



Wenn wir nachts den Sternenhimmel beobachten, tun wir etwas, was die Menschheit von Anfang an erstaunt und begeistert hat. Nachgelassen hat diese Faszination nie. Niemand dürfte unser Wissen über das Weltall, die Schwerkraft und über Raum und Zeit so umfassend erweitert, so sehr vertieft haben wie Stephen Hawking. Sein ganzes Leben war er auf der Suche danach, das Rätsel des Universums zu lösen: Dieses Geheimnis aufzuheben, gelingt ihm mit seinem epochemachenden Buch »Eine kurze Geschichte der Zeit«. Das weltweit bestverkaufteste Sachbuch der letzten Jahrzehnte macht anspruchsvolle physikalische und astronomische Zusammenhänge anschaulich und eröffnet ein völlig neues Verständnis unseres Universums. Er reist mit uns an den Rand des Kosmos, in die unendlichen Weiten, an die Ereignishorizonte der Schwarzen Löcher und darüber hinaus in das immer weiter expandierende Weltall – ein einmaliges, ein unvergessliches Leseerlebnis.

Stephen Hawking (1942–2018) war ein britischer Astrophysiker und Sachbuchautor. Von 1979 bis 2009 lehrte er als Professor für angewandte Mathematik und theoretische Physik an der University of Cambridge. Für seine bahnbrechenden Forschungsbeiträge zur Kosmologie, zur Allgemeinen Relativitätstheorie und zu Schwarzen Löchern wurde er mit zahlreichen Auszeichnungen geehrt. Er gehört zu den erfolgreichsten Sachbuch-Autoren aller Zeiten.

STEPHEN HAWKING

EINE KURZE GESCHICHTE DER ZEIT

Die Suche nach der Urkraft des Universums

Aus dem Englischen von
Hainer Kober unter Beratung
von Dr. Markus Pössel

KLETT-COTTA

Die deutschsprachige Ausgabe ist erstmals 1988 im Rowohlt Verlag, Hamburg, erschienen. Der Text der vorliegenden Ausgabe wurde vollständig überarbeitet und enthält in den deutschen Ausgaben bislang nicht veröffentlichte Erweiterungen von Stephen Hawking sowie eine aktualisierte Bildauswahl.

Klett-Cotta

www.klett-cotta.de

Die Originalausgabe erschien unter dem Titel

»A Brief History of Time. From the Big Bang to Black Holes«

© 1988, 1996, 2016 by Space Time Publications, London

Für die deutsche Ausgabe

© 2023, 2025 by J. G. Cotta'sche Buchhandlung Nachfolger GmbH,
gegr. 1659, Stuttgart

Alle deutschsprachigen Rechte vorbehalten

Cover: Rothfos und Gabler, Hamburg

unter Verwendung einer Abbildung von © Shutterstock,

Peter Hermes Furian

Gesetzt von Dörlemann Satz, Lemförde

Gedruckt und gebunden von C.H.Beck, Nördlingen

ISBN 978-3-608-98895-6

E-Book ISBN 978-3-608-12195-7

Vollständig überarbeitete und erweiterte Ausgabe.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

INHALT

Vorwort	7
1 Unsere Vorstellung vom Universum	11
2 Raum und Zeit	33
3 Das expandierende Universum	64
4 Die Unschärferelation	91
5 Elementarteilchen und Naturkräfte	104
6 Schwarze Löcher	131
7 Schwarze Löcher sind gar nicht so schwarz ..	160
8 Ursprung und Schicksal des Universums ...	182
9 Der Zeitpfeil	227
10 Wurmlöcher und Zeitreisen	244
11 Die Vereinheitlichung der Physik	263
12 Schluss	287

Einstein, Galilei, Newton	294
Ausblick (2016)	302
Anmerkungen	319
Dank	323
Glossar	329
Register	335
Bildnachweis	351

VORWORT

Für die Originalauflage von *Eine kurze Geschichte der Zeit* verfasste ich kein Vorwort. Das übernahm Carl Sagan. Stattdessen schrieb ich eine kurze Danksagung (siehe Seite 323), in der ich, wie man mir geraten hatte, allen dankte. Einige Stiftungen, die mich unterstützt hatten, waren über diese Erwähnung jedoch nicht sonderlich erfreut, weil sich dadurch die Zahl der Anträge vervielfachte.

Ich glaube nicht, dass irgendjemand – weder mein Verlag noch mein Agent noch ich selbst – im Entferntesten mit diesem Erfolg des Buchs gerechnet hatte. Auf der Bestsellerliste der Londoner *Sunday Times* stand es 237 Wochen, länger als irgendein anderes Buch (offenbar werden Bibel und Shakespeare nicht mitgezählt). Es wurde in etwa vierzig Sprachen übersetzt, und auf die Weltbevölkerung bezogen, kommt auf 750 Männer, Frauen und Kinder ein verkauftes Exemplar. Wie Nathan Myhrvold von Microsoft (ein ehemaliger Post-doc von mir) feststellte, habe ich über Physik mehr Bücher verkauft als Madonna über Sex.

Der Erfolg von *Eine kurze Geschichte der Zeit* lässt darauf schließen, dass ein weit verbreitetes Interesse an

den großen Fragen besteht wie etwa: Woher kommen wir? Warum ist das Universum so, wie es ist?

Außerdem habe ich die Gelegenheit genutzt, das Buch zu aktualisieren, indem ich neue theoretische Ansätze und Beobachtungsergebnisse berücksichtigte, die bei der ersten Auflage (1. April 1988) noch nicht vorlagen. Ich habe ein neues Kapitel über Wurmlöcher und Zeitreisen eingefügt. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie scheint die Möglichkeit zuzulassen, dass wir stabile Wurmlöcher konstruieren, kleine Röhren, die verschiedene Regionen der Raumzeit miteinander verbinden. Ginge das, könnten wir sie zu einer raschen Umrundung der Galaxis oder zu einer Reise zurück in der Zeit verwenden. Natürlich haben wir noch niemanden aus der Zukunft gesehen (oder doch?), aber ich erörtere eine mögliche Erklärung dafür.

Außerdem berichte ich von den Fortschritten, die wir in jüngerer Zeit bei der Suche nach »Dualitäten« oder »Korrespondenzen« zwischen scheinbar verschiedenen physikalischen Theorien gemacht haben. Diese Korrespondenzen sind ein starker Hinweis darauf, dass es eine vollständige vereinheitlichte Theorie der Physik gibt, aber sie lassen auch vermuten, dass sie sich nicht in einer einzigen fundamentalen Formulierung ausdrücken lässt. Stattdessen müssen wir in unterschiedlichen Situationen mit verschiedenen Aspekten der grundlegenden Theorie arbeiten. Das ähnelt unserer Unfähigkeit, die Erdoberfläche auf einer einzigen Karte darzustellen, und der daraus folgenden Notwendigkeit, in verschiedenen Regionen verschiedene Karten zu benutzen. Für

unsere Auffassung von der Vereinheitlichung der wissenschaftlichen Gesetze wäre es eine Revolution, würde an dem wichtigsten Punkt aber nichts ändern: dass das Universum von einer Reihe rationaler Gesetze bestimmt wird, die wir entdecken und verstehen können.

Was unsere Beobachtungen angeht, so war die bei Weitem wichtigste Entdeckung die Messung der Fluktuationen in der kosmischen Hintergrundstrahlung durch COBE (den NASA-Satelliten Cosmic Background Explorer) und andere Forschungsgruppen. Diese Fluktuationen sind die Fingerabdrücke der Schöpfung, winzige Unregelmäßigkeiten aus der Anfangszeit in dem ansonsten glatten und gleichförmigen frühen Universum, die sich später zu Galaxien, Sternen und allen anderen Strukturen entwickelten, die wir in unserer Umgebung sehen. Das deckt sich mit den Vorhersagen der Hypothese, nach der das Universum in der imaginären Zeitrichtung keine Grenzen hat; allerdings werden weitere Beobachtungen erforderlich sein, um diese Hypothese von anderen möglichen Erklärungen für die Fluktuationen in der Hintergrundstrahlung zu unterscheiden. Doch in wenigen Jahren sollten wir wissen, ob wir in einem Universum leben, das vollkommen in sich abgeschlossen ist und weder Anfang noch Ende hat.

(Mai 1996)

Richard Feynman hat einmal gesagt: »Wir haben das Glück, in einer Zeit zu leben, in der noch Entdeckungen gemacht werden. Und in dem Zeitalter, in dem wir leben, entdecken wir die fundamentalen Gesetze der Natur.« Zwischen der Erstveröffentlichung dieses Buchs am 1. April 1988 und seiner letzten Revision 1996 gab es etliche bemerkenswerte Entdeckungen in der Forschung. Zwar haben sich einige der Theorien, die ich im ursprünglichen Text erörtert habe, nicht verändert, doch andere entwerfen ein neues Bild der Wirklichkeit. Daher bin ich glücklich über die Gelegenheit, im Anhang der neuen Ausgabe manche Aktualisierungen von Themen aufnehmen zu können, die einige meiner stolzesten Leistungen als Physiker widerspiegeln: die mit Roger Penrose zusammen entwickelten Singularitäten-Theoreme, die sogenannte »Hawking-Strahlung« Schwarzer Löcher und meine Keine-Grenzen-Bedingung, ein Versuch, Einsteins Arbeit mit der Quantentheorie zu vereinheitlichen. Wie immer ist es mein Ziel, allen Lesern, die an den großen, grundlegenden Fragen des Universums interessiert sind, vor Augen zu führen, wie aufregend diese Entdeckungen sind.

Stephen Hawking
Cambridge, Juli 2016

1

UNSERE VORSTELLUNG VOM UNIVERSUM

Ein namhafter Wissenschaftler (man sagt, es sei Bertrand Russell gewesen) hielt einmal einen öffentlichen Vortrag über Astronomie. Er schilderte, wie die Erde um die Sonne und die Sonne ihrerseits um den Mittelpunkt einer riesigen Ansammlung von Sternen kreist, die wir unsere Galaxie nennen. Als der Vortrag beendet war, stand hinten im Saal eine kleine alte Dame auf und erklärte: »Was Sie uns da erzählt haben, stimmt alles nicht. In Wirklichkeit ist die Welt eine flache Scheibe, die von einer Riesenschildkröte auf dem Rücken getragen wird.« Mit einem überlegenen Lächeln hielt der Wissenschaftler ihr entgegen: »Und worauf steht die Schildkröte?« – »*Sehr schlau, junger Mann*«, parierte die alte Dame. »Ich werd's Ihnen sagen: Da stehen lauter Schildkröten aufeinander.«

Die meisten Menschen werden über die Vorstellung, unser Weltall sei ein unendlicher Schildkrötenturm, den Kopf schütteln. Doch woher nehmen wir die Überzeugung, es besser zu wissen? Was wissen wir vom Weltall

und wieso wissen wir es? Woher kommt das Universum und wohin entwickelt es sich? Hatte es wirklich einen Anfang? Und wenn, was geschah *davor*? Was ist die Zeit? Wird sie je ein Ende finden? Neuere Erkenntnisse in der Physik, die teilweise fantastischen neuen Technologien zu verdanken sind, legen einige Antworten auf diese alten Fragen nahe. Eines Tages werden uns diese Antworten vielleicht so selbstverständlich erscheinen wie die Tatsache, dass die Erde um die Sonne kreist – oder so lächerlich wie der Schildkrötenturm. Nur die Zukunft (was immer das sein mag) kann uns eine Antwort darauf geben.

Schon 340 v. Chr. brachte der griechische Philosoph Aristoteles in seiner Schrift »Vom Himmel« zwei gute Argumente für seine Überzeugung vor, dass die Erde keine flache Scheibe, sondern kugelförmig sei. Erstens verwies er auf seine Erkenntnisse über die Mondfinsternis. Sie werde, schrieb er, dadurch verursacht, dass die Erde zwischen Sonne und Mond trete. Der Erdschatten auf dem Mond sei immer rund, also müsse die Erde eine Kugel sein. Wäre sie eine Scheibe, hätte der Schatten eine längliche, elliptische Form, es sei denn, die Mondfinsternis trüte immer nur dann ein, wenn sich die Sonne direkt unter dem Mittelpunkt der Scheibe befände. Zweitens wussten die Griechen von ihren Reisen her, dass der Polarstern im Süden niedriger am Himmel erscheint als in nördlichen Regionen. (Aufgrund der Lage des Polarsterns über dem Nordpol scheint er sich dort direkt über einem Beobachter zu befinden, während er vom Äquator aus betrachtet knapp über dem

Horizont zu stehen scheint.) Aus der unterschiedlichen Position des Polarsterns für Beobachter in Ägypten und Griechenland glaubte Aristoteles sogar den Erdumfang errechnen zu können. Er kam auf 400 000 Stadien. Die exakte Länge eines Stadions ist nicht bekannt, sie dürfte aber über 180 Meter betragen haben, wonach Aristoteles' Schätzung doppelt so hoch läge wie der heute angenommene Wert. Die Griechen hatten noch ein drittes Argument dafür, dass die Erde eine Kugel sein muss. Wie sollte man es sich sonst erklären, dass man von einem Schiff, das am Horizont erscheint, zuerst die Segel und erst dann den Rumpf sieht?

Aristoteles glaubte, die Sonne, der Mond, die Planeten und die Sterne bewegten sich in kreisförmigen Umlaufbahnen um die Erde, während diese in einem unbewegten Zustand verharre – eine Auffassung, der seine mystische Überzeugung zugrunde lag, dass die Erde der Mittelpunkt des Universums und dass die kreisförmige Bewegung die vollkommenste sei. Diese Vorstellung gestaltete Ptolemäus im 2. Jahrhundert n. Chr. zu einem vollständigen kosmologischen Modell aus. In ihm bildet die Erde den Mittelpunkt, umgeben von acht Sphären, die den Mond, die Sonne, die Sterne und die fünf Planeten tragen, die damals bekannt waren – Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn (Abb. 1). Die Planeten selbst bewegen sich in kleineren Kreisen, die mit ihren jeweiligen Sphären verbunden sind. Diese Annahme war nötig, um die ziemlich komplizierten Bahnen zu erklären, die man am Himmel beobachtete. Die äußerste Sphäre trägt in diesem Modell die sogenannten »Fix-

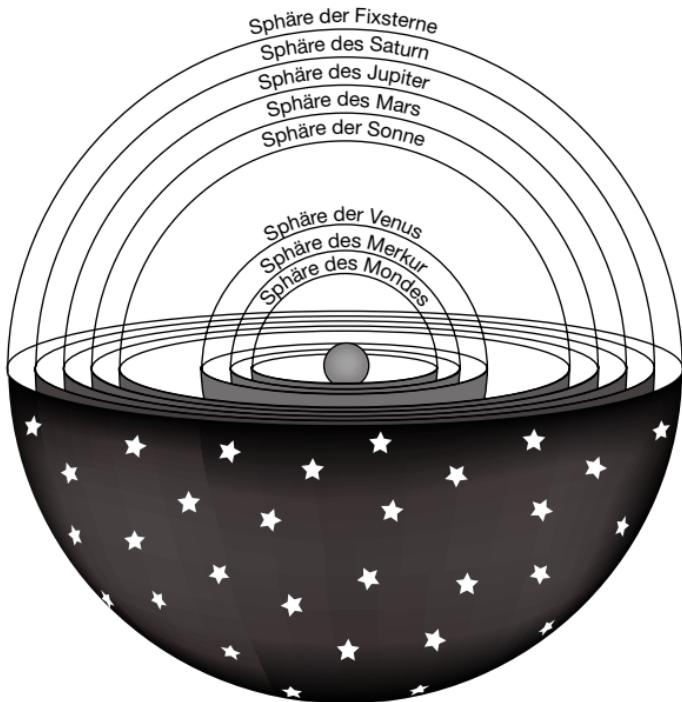


Abbildung 1

sterne«, die immer in der gleichen Position zueinander bleiben, aber gemeinsam am Himmel kreisen. Was jenseits der letzten Sphäre lag, wurde nie deutlich erklärt; mit Sicherheit aber gehörte es nicht zu dem Teil des Kosmos, der der menschlichen Beobachtung zugänglich war.

Der Ptolemäische Kosmos lieferte ein Modell, das hinreichend genau war, um die Positionen der Himmelskörper vorherzusagen. Doch zur präzisen Vorherbestimmung dieser Positionen musste Ptolemäus von der Voraussetzung ausgehen, dass der Mond einer Bahn

folgte, die ihn manchmal doppelt so nahe an die Erde heranführte wie zu den anderen Zeiten. Das wiederum bedeutete, der Mond müsste manchmal doppelt so groß erscheinen wie sonst! Ptolemäus war sich dieser Schwäche seines Systems bewusst. Dennoch wurde es allgemein, wenn auch nicht ausnahmslos, akzeptiert, Die christliche Kirche übernahm es als Bild des Kosmos, da es sich in Einklang mit der Heiligen Schrift bringen ließ, denn es hatte den großen Vorteil, dass es jenseits der Sphäre der Fixsterne noch genügend Platz für Himmel und Hölle ließ. Ein einfacheres Modell schlug 1514 Nikolaus Kopernikus¹, Domherr in Frauenburg (Polen), vor. (Vielleicht aus Angst, von seiner Kirche als Ketzer gebrandmarkt zu werden, brachte er seine Thesen zunächst anonym in Umlauf.*) Er vertrat die Auffassung, die Sonne ruhe im Mittelpunkt, um den sich die Erde und die Planeten in kreisförmigen Umlaufbahnen bewegten. Fast ein Jahrhundert verging, bis man sein (heliozentrisches) Modell ernst zu nehmen begann. Den Anstoß gaben zwei Astronomen, Johannes Kepler in Deutschland und Galileo Galilei in Italien, die für die Kopernikanische Theorie öffentlich eintraten, und das, obwohl die von ihr vorhergesagten Umlaufbahnen mit den tatsächlich beobachteten nicht ganz

* Diese Neuausgabe enthält redaktionelle Anmerkungen, die über den veränderten Forschungsstand bzw. neue Forschungserkenntnisse seit der Erstausgabe im Jahr 1988 informieren. Die Fuß-/Endnoten verweisen jeweils auf den zugehörigen Anmerkungstext ab S. 319.

übereinstimmten. Zur endgültigen Widerlegung des Aristotelisch-Ptolemäischen (geozentrischen) Kosmos-Modells kam es 1609. In diesem Jahr begann Galilei, den Nachthimmel mit einem Fernrohr zu beobachten, das gerade erfunden worden war. Als er den Planeten Jupiter betrachtete, entdeckte er, dass dieser von einigen kleinen Satelliten oder Monden begleitet wird, die ihn umkreisen. Galileis Schlussfolgerung: Nicht alles muss direkt um die Erde kreisen, wie Aristoteles und Ptolemäus gemeint hatten. (Natürlich konnte man auch jetzt noch glauben, die Erde ruhe im Mittelpunkt des Weltalls und die Jupitermonde bewegten sich auf äußerst komplizierten Bahnen um die Erde, wobei sie lediglich den *Eindruck* erweckten, als ob sie um den Jupiter kreisten. Doch die Kopernikanische Theorie hatte einen entscheidenden Vorteil: Sie war weitaus einfacher.) Zur gleichen Zeit hatte Johannes Kepler an einer Abwandlung der Kopernikanischen Theorie gearbeitet und schlug vor, dass sich die Planeten nicht in Kreisen, sondern in Ellipsen bewegten (eine Ellipse ist ein länglicher Kreis). Jetzt deckten sich die Vorhersagen endlich mit den Beobachtungen.

Für Kepler waren die elliptischen Umlaufbahnen lediglich eine Ad-hoc-Hypothese und eine ziemlich abstoßende dazu, weil Ellipsen weit weniger vollkommen sind als Kreise. Nachdem er fast zufällig entdeckt hatte, dass elliptische Umlaufbahnen den Beobachtungen recht genau entsprachen, konnte er sie jedoch nicht mit seiner Vorstellung in Einklang bringen, dass magnetische Kräfte die Planeten um die Sonne bewegten. Eine

Erklärung wurde erst viel später geliefert, im Jahre 1687, als Sir Isaac Newton die »Philosophiae naturalis principia mathematica« veröffentlichte, wahrscheinlich das wichtigste von einem Einzelnen verfasste physikalische Werk, das jemals erschienen ist. Dort entwarf Newton nicht nur eine Theorie der Bewegung von Körpern in Raum und Zeit, sondern entwickelte auch das komplizierte mathematische Instrumentarium, das zur Analyse dieser Bewegungen erforderlich war. Darüber hinaus postulierte er ein allgemeines Gravitationsgesetz, nach dem jeder Körper im Weltall von jedem anderen Körper durch eine Kraft angezogen wird, die umso größer ist, je mehr Masse die Körper haben und je näher sie einander sind. Dieselbe Kraft bewirkt auch, dass Gegenstände zu Boden fallen. (Die Geschichte, ein Apfel, der Newton auf den Kopf gefallen sei, habe ihm zu dieser Eingebung verholfen, gehört wohl ins Reich der Legende. Newton selbst hat lediglich erklärt, der Gedanke an die Schwerkraft sei durch den Fall eines Apfels ausgelöst worden, als er »sinnend« dagesessen habe.) Daraus leitete Newton dann ab, dass nach seinem Gesetz die Schwerkraft den Mond zu einer elliptischen Bewegung um die Erde und diese sowie die anderen Planeten zu elliptischen Bahnen um die Sonne veranlasst.

Das Kopernikanische Modell löste sich von den Ptolemäischen Himmelssphären und damit von der Vorstellung, das Weltall habe eine natürliche Grenze. Da die »Fixsterne« ihre Positionen nicht zu verändern schienen – von einer Rotation am Himmel abgesehen, die durch die Drehung der Erde um ihre eigene Achse

verursacht wird –, lag die Annahme nahe, dass sie Himmelskörper wie die Sonne seien, nur sehr viel weiter entfernt.

Newton bemerkte, dass sich die Sterne seiner Gravitationstheorie zufolge gegenseitig anziehen mussten; also konnten sie doch nicht in weitgehender Bewegungslosigkeit verharren. Mussten sie nicht alle in irgendeinem Punkt zusammenstürzen? In einem Brief an Richard Bentley, einen anderen bedeutenden Gelehrten der Zeit, meinte Newton 1691, dies geschähe in der Tat, wenn es nur eine endliche Zahl von Sternen gebe, die über ein endliches Gebiet des Raums verteilt seien. Wenn hingegen, so fuhr er fort, die Anzahl der Sterne unendlich sei und sie sich mehr oder minder gleichmäßig über den unendlichen Raum verteilen, käme es nicht dazu, weil es keinen Mittelpunkt gebe, in den sie stürzen könnten.

Dieses Argument ist ein typisches Beispiel für die Fallen, die auf uns lauern, wenn wir über das Unendliche reden. In einem unendlichen Universum kann jeder Punkt als Zentrum betrachtet werden, weil sich von jedem Punkt aus eine unendliche Zahl von Sternen nach jeder Seite hin erstreckt. Erst sehr viel später erkannte man, dass der richtige Ansatz darin besteht, vom ersten Fall auszugehen, einem endlichen Raum, in dem alle Sterne ineinanderstürzen, um dann zu fragen, was sich verändert, wenn man mehr Sterne hinzufügt, die sich in etwa gleichmäßig außerhalb dieser Region verteilen. Nach Newtons Gesetz würden die äußeren Sterne im Mittel ohne Einfluss auf das Verhalten der inneren blei-

ben, die also genauso rasch ineinanderstürzen würden wie in der zuvor beschriebenen Situation. Wir können so viele Sterne hinzufügen, wie wir wollen, stets würden sie zusammenfallen. Heute wissen wir, dass kein unendliches, statisches Modell des Universums denkbar ist, in dem die Gravitation durchgehend anziehend wirkt.

Die Tatsache, dass bis dahin niemand den Gedanken vorgebracht hatte, das Universum könnte sich ausdehnen oder zusammenziehen, spiegelt das allgemeine geistige Klima vor Beginn des 20. Jahrhunderts in einer interessanten Facette wider. Man ging allgemein davon aus, das Weltall habe entweder seit jeher in unveränderter Form bestanden oder es sei zu einem bestimmten Zeitpunkt mehr oder weniger in dem Zustand erschaffen worden, den wir heute beobachten können. Zum Teil mag dies an der Neigung der Menschen gelegen haben, an ewige Wahrheiten zu glauben, und vielleicht ist es auch dem Trost zuzuschreiben, den sie in dem Gedanken fanden, dass sie selbst zwar alterten und starben, das Universum aber ewig unveränderlich sei.

Selbst diejenigen, die wissen mussten, dass nach Newtons Gravitationstheorie das Universum nicht statisch sein kann, kamen nicht auf die Idee, es könnte sich ausdehnen. Statt dessen versuchten sie, die Theorie zu modifizieren, indem sie die Gravitationskraft bei sehr großen Entfernungen zur Abstoßungskraft erklärten. Das hatte keine nennenswerten Auswirkungen auf ihre Vorhersagen über die Planetenbewegungen, gestattete es aber einer unendlichen Verteilung von Sternen, im Gleichgewicht zu verharren. Die Erklärung nach die-

ser Theorie: Die Abstoßungskräfte von den weiter entfernten Sternen heben die Anziehungskräfte zwischen nahe zusammenliegenden auf. Heute hat sich indessen die Auffassung durchgesetzt, dass ein solches Gleichgewicht instabil wäre: Wenn die Sterne in irgendeiner Region nur ein wenig näher rückten, würden sich die Anziehungskräfte zwischen ihnen verstärken und die Oberhand über die Abstoßungskräfte gewinnen, sodass das ineinanderfallen der Sterne nicht aufzuhalten wäre. Wenn sich die Sterne andererseits ein bisschen weiter voneinander entfernen, würden die Abstoßungskräfte überwiegen und die Sterne unaufhaltsam auseinanderstreiben.

Ein anderer Einwand gegen ein unendliches, statisches Universum wird meist dem deutschen Philosophen Heinrich Olbers zugeschrieben, der sich 1823 zu dieser Theorie äußerte. Tatsächlich aber haben schon verschiedene Zeitgenossen Newtons dazu Stellung genommen, und Olbers' Abhandlung war keineswegs die erste Zusammenstellung begründeter Gegenargumente. Doch fand er mit ihnen als Erster allgemeine Beachtung. Die Schwierigkeit liegt darin, dass in einem unendlichen, statischen Universum nahezu jeder Blick auf die Oberfläche eines Sterns treffen müsste. Deshalb müsste der Himmel selbst nachts so hell wie die Sonne sein. Olbers wandte dagegen ein, das Licht ferner Sterne würde infolge der Absorption durch dazwischenliegende Materie matt werden. Träfe dies jedoch zu, würde sich diese Materie erhitzen, sodass sie schließlich ebenso hell glühte wie die Sterne. Die Schlussfolgerung, dass

der gesamte Nachthimmel hell wie die Sonnenoberfläche sein müsste, ist nur durch die Annahme zu vermeiden, die Sterne leuchteten nicht seit jeher, sondern hätten zu irgendeinem Zeitpunkt in der Vergangenheit mit der Emission begonnen. Diese Annahme ließe die Erklärung zu, dass sich die absorbierende Materie noch nicht erhitzt oder dass das Licht ferner Sterne uns noch nicht erreicht habe. Und das bringt uns zu der Frage, was die Sterne ursprünglich zum Leuchten gebracht haben könnte.

Über den Beginn des Universums hatte man sich natürlich schon lange zuvor den Kopf zerbrochen. Einer Reihe früher Kosmologien und der jüdisch-christlich-islamischen Überlieferung zufolge entstand der Kosmos zu einem bestimmten und nicht sehr fernen Zeitpunkt in der Vergangenheit. Ein Grund für einen solchen Anfang war die Überzeugung, dass man eine »erste Ursache« brauche, um das Vorhandensein des Universums zu erklären. (Innerhalb des Kosmos erklärt man ein Ereignis immer als ursächliche Folge irgendeines früheren Ereignisses, doch das Vorhandensein des Universums ließe sich auf diese Weise nur erklären, wenn es einen Anfang hätte.) Ein anderes Argument trug Augustinus in seiner Schrift »Der Gottesstaat« vor. Unsere Kultur, schrieb er, entwickle sich ständig weiter, und wir erinnerten uns daran, wer diese Tat vollbracht und jene Technik entwickelt habe. Deshalb könne es den Menschen und vielleicht auch den Kosmos noch nicht allzu-lange geben. Ausgehend von der Genesis kam Augustinus zu dem Ergebnis, dass Gott die Welt ungefähr 5000

v. Chr. erschaffen habe. (Interessanterweise ist dieser Zeitpunkt nicht sehr weit vom Ende der letzten Eiszeit entfernt, das nach Auffassung der Archäologie der eigentliche Beginn der Zivilisation ist.)

Aristoteles und die meisten anderen griechischen Philosophen dagegen fanden keinen Gefallen an der Vorstellung einer Schöpfung, weil sie zu sehr nach göttlicher Intervention aussah. Der Mensch und die Welt um ihn her hätten schon immer existiert, behaupteten sie, und daran werde sich auch nichts ändern. Sie hatten sich bereits mit dem oben beschriebenen Fortschrittsargument auseinandergesetzt und es entkräftet, indem sie erklärten, es sei immer wieder zu großen Überschwemmungen und anderen Katastrophen gekommen, die die Menschen stets gezwungen hätten, wieder am Punkt Null zu beginnen.

Die Fragen, ob das Weltall einen Anfang in der Zeit habe und ob es räumlich begrenzt sei, behandelte später Immanuel Kant ausführlich in seinem monumentalen (und äußerst anspruchsvollen) Werk »Kritik der reinen Vernunft«, das 1781 erschien. Er bezeichnete diese Fragen als Antinomien (das heißt Widersprüche) der reinen Vernunft, weil nach seiner Meinung ebenso überzeugende Gründe für die These sprachen, dass das Weltall einen Anfang habe, wie für die Antithese, dass es seit jeher existiere. Sein Argument für die These: Wenn das Universum keinen Anfang hätte, läge ein unendlicher Zeitraum vor jedem Ereignis. Das hielt er für absurd. Das Argument für die Antithese: Wenn das Universum einen Anfang hätte, läge ein unendlicher Zeitraum vor

diesem Anfang. Warum aber sollte das Universum dann zu irgendeinem bestimmten Zeitpunkt begonnen haben? Kant bedient sich also des gleichen Argumentes, um These und Antithese zu begründen. Beide beruhen sie auf der stillschweigenden Voraussetzung, dass die Zeit unendlich weit zurückreicht, ganz gleich, ob das Universum einen Anfang hat oder nicht. Wie wir noch sehen werden, ist ein Zeitbegriff vor Beginn des Universums sinnlos. Darauf hat schon Augustinus hingewiesen. Als er gefragt wurde: Was hat Gott getan, bevor er das Universum erschuf?, erwiderte er nicht: Er hat die Hölle gemacht, um einen Platz für Leute zu haben, die solche Fragen stellen. Seine Antwort lautete: Die Zeit sei eine Eigenschaft des von Gott geschaffenen Universums und habe vor dessen Beginn nicht existiert.

Solange die meisten Menschen das Universum für weitgehend statisch und unveränderlich hielten, gehörte die Frage, ob es einen Anfang habe oder nicht, in den Bereich der Metaphysik und Theologie. Was man beobachtete, ließ sich mittels der Vorstellung von einem seit jeher existierenden Universum ebenso erklären wie anhand der Theorie, es sei zu einem bestimmten Zeitpunkt auf eine Weise in Bewegung gesetzt worden, dass es den Anschein ewigen Bestehens erwecke. Doch im Jahre 1929 machte Edwin Hubble die bahnbrechende Entdeckung, dass sich die fernen Galaxien, ganz gleich, wohin man blickt, rasch von uns fortbewegen. Mit anderen Worten: Das Universum dehnt sich aus, was wiederum bedeutet, dass in früheren Zeiten die Objekte näher beieinander waren. Es hat sogar den Anschein, als

hätten sie sich vor ungefähr zehn bis zwanzig Milliarden Jahren alle an ein und demselben Ort befunden und als sei infolgedessen die Dichte des Universums unendlich gewesen. Mit dieser Entdeckung rückte die Frage nach dem Anfang des Universums in den Bereich der Wissenschaft.

Hubbles Beobachtungen legten die Vermutung nahe, dass das Universum zu einem bestimmten Zeitpunkt, Urknall genannt, unendlich klein und unendlich dicht gewesen ist. Unter solchen Bedingungen würden alle Naturgesetze ihre Geltung verlieren, und damit wäre auch keine Voraussage über die Zukunft mehr möglich. Wenn es Ereignisse gegeben hat, die vor diesem Zeitpunkt lagen, so können sie doch nicht beeinflussen, was gegenwärtig geschieht. Man kann sie außer acht lassen, weil sie sich nicht auf unsere Beobachtungen auswirken. Man kann sagen, dass die Zeit mit dem Urknall beginnt – in dem Sinne, dass frühere Zeiten einfach nicht definiert sind. Es sei betont, dass sich dieser Zeitbeginn grundlegend von jenen Vorstellungen unterscheidet, mit deren Hilfe man ihn sich früher ausgemalt hat. In einem unveränderlichen Universum muss ein Anfang in der Zeit von einem Wesen außerhalb dieser Welt veranlasst werden – es gibt keine physikalische Notwendigkeit für einen Anfang. Die Erschaffung des Universums durch Gott ist buchstäblich zu jedem Zeitpunkt in der Vergangenheit vorstellbar. Wenn sich das Universum hingegen ausdehnt, könnte es physikalische Gründe für einen Anfang geben. Man könnte sich noch immer vorstellen, Gott habe die Welt im Augenblick des Ur-

knalls erschaffen oder auch danach, indem er ihr den Anschein verlieh, es habe einen Urknall gegeben. Aber es wäre sinnlos anzunehmen, sie sei *vor* dem Urknall geschaffen worden. Das Modell eines expandierenden Universums schließt einen Schöpfer nicht aus, grenzt aber den Zeitpunkt ein, da er sein Werk verrichtet haben könnte!

Wenn wir uns mit der Beschaffenheit des Universums befassen und Fragen erörtern wollen wie die nach seinem Anfang oder seinem Ende, müssen wir eine klare Vorstellung davon haben, was eine wissenschaftliche Theorie ist. Ich werde hier von der einfachen Auffassung ausgehen, dass eine Theorie aus einem Modell des Universums oder eines seiner Teile sowie aus einer Reihe von Regeln besteht, die Größen innerhalb des Modells in Beziehung zu unseren Beobachtungen setzen. Eine Theorie existiert nur in unserer Vorstellung und besitzt keine andere Wirklichkeit (was immer das bedeuten mag). Gut ist eine Theorie, wenn sie zwei Voraussetzungen erfüllt: Sie muss eine große Klasse von Beobachtungen auf der Grundlage eines Modells beschreiben, das nur einige wenige beliebige Elemente enthält, und sie muss bestimmte Voraussagen über die Ergebnisse künftiger Beobachtungen ermöglichen. So war beispielsweise die Aristotelische Theorie, dass alles aus den vier Elementen Erde, Luft, Feuer und Wasser bestehen, einfach genug, um den genannten Bedingungen zu genügen, führte aber zu keinen deutlichen Voraussagen. Newtons Gravitationstheorie dagegen, die auf

einem noch einfacheren Modell beruht – Körper ziehen sich mit einer Kraft an, die ihrer Masse proportional und dem Quadrat der Entfernung zwischen ihnen umgekehrt proportional ist –, sagt die Bewegungen der Sonne, des Mondes und der Planeten mit großer Präzision voraus.

Jede physikalische Theorie ist insofern vorläufig, als sie nur eine Hypothese darstellt: Man kann sie nie beweisen. Wie häufig auch immer die Ergebnisse von Experimenten mit einer Theorie übereinstimmen, man kann nie sicher sein, dass das Ergebnis nicht beim nächsten Mal der Theorie widersprechen wird. Dagegen ist eine Theorie widerlegt, wenn man nur eine einzige Beobachtung findet, die nicht mit den aus ihr abgeleiteten Voraussagen übereinstimmt. In seiner »Logik der Forschung« nennt Karl Popper als Merkmal einer guten Theorie, dass sie eine Reihe von Vorhersagen macht, die sich im Prinzip auch jederzeit durch Beobachtungsergebnisse widerlegen, falsifizieren, lassen müssen. Immer wenn die Beobachtungen aus neuen Experimenten mit den Vorhersagen übereinstimmen, überlebt die Theorie und man fasst ein bisschen mehr Vertrauen zu ihr; doch sobald man auch nur auf eine Beobachtung stößt, die von den Vorhersagen abweicht, muss man die Theorie aufgeben oder modifizieren. Zumindest sollte das der Fall sein, doch es sind natürlich stets Zweifel erlaubt an der Fähigkeit derer, die die Experimente durchführen.

In der Praxis sieht dies oft so aus, dass man eine neue Theorie entwickelt, die in Wahrheit nur eine Erweite-

rung der vorigen ist. Beispielsweise ergaben sehr genaue Beobachtungen des Planeten Merkur, dass seine Bewegung geringfügig von den Vorhersagen der Newtonschen Gravitationstheorie abweicht. Genau diese Abweichung sagte Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie voraus. Die Übereinstimmung der Einsteinschen Vorhersagen mit dem, was man sah, und die Unstimmigkeit der Newtonschen Vorhersagen gehörten zu den entscheidenden Bestätigungen der neuen Theorie. Für alle praktischen Zwecke verwenden wir jedoch nach wie vor Newtons Theorie, weil der Unterschied zwischen ihren Vorhersagen und denen der Allgemeinen Relativität in den Situationen, mit denen wir normalerweise zu tun haben, verschwindend klein ist. (Newtons Theorie hat überdies den großen Vorteil, dass es sich mit ihr sehr viel einfacher arbeiten lässt als mit der Einsteinschen!)

Letztlich ist es das Ziel der Wissenschaft, eine einzige Theorie zu finden, die das gesamte Universum beschreibt. In der Praxis aber zerlegen die meisten Wissenschaftler das Problem in zwei Teile: Erstens gibt es die Gesetze, die uns mitteilen, wie sich das Universum im Laufe der Zeit verändert. (Wenn wir wissen, wie das Universum zu einem gegebenen Zeitpunkt aussieht, so teilen uns diese physikalischen Gesetze mit, wie es zu irgendeinem späteren Zeitpunkt aussehen wird.) Zweitens gibt es die Frage nach dem Anfangszustand des Universums. Manche Menschen finden, dass sich die Wissenschaft nur mit dem ersten Teil des Problems befassen sollte – sie halten die Frage nach der Anfangssituation für eine Angelegenheit der Metaphysik oder

Religion. Sie würden vorbringen, dass Gott in seiner Allmacht die Welt in jeder von ihm gewünschten Weise hätte beginnen lassen können. Das mag zutreffen, doch dann hätte er auch ihre Entwicklung in völlig beliebiger Weise gestalten können. Aber anscheinend hat er sich für eine sehr regelmäßige Entwicklung des Universums, für eine Entwicklung in Übereinstimmung mit bestimmten Gesetzen entschieden. Deshalb scheint es genauso vernünftig, Gesetze anzunehmen, die den Anfangszustand bestimmt haben.

Es hat sich als eine sehr schwierige Aufgabe erwiesen, eine Theorie zu entwickeln, die in einem einzigen Entwurf das ganze Universum beschreibt. Statt dessen zerlegen wir das Problem in einzelne Segmente und arbeiten Teiltheorien aus. Jede dieser Teiltheorien beschreibt eine eingeschränkte Klasse von Beobachtungen und trifft jeweils nur über sie Voraussagen, wobei die Einflüsse anderer Größen außer acht gelassen oder durch eine Hand voll Zahlenwerten repräsentiert werden. Vielleicht ist dieser Ansatz völlig falsch. Wenn im Universum grundsätzlich alles von allem abhängig ist, könnte es unmöglich sein, einer Gesamtlösung dadurch näher zu kommen, dass man Teile des Problems isoliert untersucht. Trotzdem haben wir in der Vergangenheit auf diesem Wege zweifellos Fortschritte erzielt. Das klassische Beispiel ist abermals die Newtonsche Gravitationstheorie, nach der die Schwerkraft zwischen zwei Körpern außer vom Abstand nur von einer mit jedem Körper verknüpften Zahl abhängt, ihrer Masse, sonst aber unabhängig von deren Beschaffenheit ist. So

braucht man keine Theorie über den Aufbau und Zustand der Sonne und der Planeten, um ihre Umlaufbahnen zu berechnen.

Heute beschreibt die Physik das Universum anhand zweier grundlegender Teiltheorien: der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik. Sie sind die großen geistigen Errungenschaften aus der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts. Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Schwerkraft und den Aufbau des Universums im Großen, das heißt in der Größenordnung von ein paar Kilometern bis hin zu einer Million Million Million Million (einer 1 mit 24 Nullen) Kilometern, der Größe des beobachtbaren Universums. Die Quantenmechanik dagegen beschäftigt sich mit Erscheinungen in Bereichen von außerordentlich geringer Ausdehnung wie etwa einem millionstel millionstel Zentimeter. Leider sind diese beiden Theorien nicht miteinander in Einklang zu bringen – sie können nicht beide richtig sein. Eine der Hauptanstrengungen in der heutigen Physik gilt der Suche nach einer neuen Theorie, die beide Teiltheorien enthält – nach einer Quantentheorie der Gravitation. Über eine solche Theorie verfügen wir bislang nicht, und möglicherweise sind wir noch weit von ihr entfernt, aber wir kennen bereits viele der Eigenschaften, die sie aufweisen muss. Und wir werden in späteren Kapiteln sehen, dass wir schon recht genau die Voraussagen bestimmen können, die eine Quantentheorie der Gravitation liefern muss.

Wenn man der Meinung ist, dass das Universum nicht vom Zufall, sondern von bestimmten Gesetzen re-

giert wird, muss man die Teiltheorien zu einer vollständigen einheitlichen Theorie zusammenfassen, die alles im Universum beschreibt. Es gibt jedoch ein grundlegendes Paradoxon bei der Suche nach einer vollständigen einheitlichen Theorie. Die Vorstellungen über wissenschaftliche Theorie, wie sie oben dargelegt wurden, setzen voraus, dass wir vernunftbegabte Wesen sind, die das Universum beobachten und aus dem, was sie sehen, logische Schlüsse ziehen können. Diese Vorstellung erlaubt es uns, davon auszugehen, dass wir die Gesetze, die unser Universum regieren, immer umfassender verstehen. Doch wenn es tatsächlich eine vollständige einheitliche Theorie gibt, würde sie wahrscheinlich auch unser Handeln bestimmen. Deshalb würde die Theorie selbst die Suche nach ihr determinieren! Und warum sollte sie bestimmen, dass wir aus den Beobachtungsdaten die richtigen Folgerungen ableiten? Könnte sie nicht ebensogut festlegen, dass wir die falschen oder überhaupt keine Schlüsse ziehen?

Die einzige Antwort, die ich auf dieses Problem weiß, beruht auf Darwins Prinzip der natürlichen Selektion. Danach wird es in jeder Population sich selbst fortpflanzender Organismen bei den verschiedenen Individuen Unterschiede in der Erbanlage und in der Aufzucht geben. Diese Unterschiede bewirken, dass einige Individuen besser als andere in der Lage sind, die richtigen Schlussfolgerungen über die Welt um sie her zu ziehen und entsprechend zu handeln. Für diese Individuen ist die Wahrscheinlichkeit größer, dass sie überleben und sich fortpflanzen, und deshalb werden sich ihr Verhal-

ten und Denken durchsetzen. Für die Vergangenheit trifft sicherlich zu, dass Intelligenz und wissenschaftliche Entdeckungen von Vorteil für unser Überleben waren. Weniger sicher ist, ob dies noch immer der Fall ist: Unsere wissenschaftlichen Entdeckungen könnten uns vernichten, und selbst wenn sie es nicht tun, so wird eine vollständige einheitliche Theorie unsere Überlebenschancen nicht wesentlich verbessern. Doch von der Voraussetzung ausgehend, das Universum habe sich in regelmäßiger Weise entwickelt, können wir erwarten, dass sich die Denk- und Urteilsfähigkeit, mit der uns die natürliche Selektion ausgestattet hat, auch bei der Suche nach einer vollständigen einheitlichen Theorie bewähren und uns nicht zu falschen Schlüssen führen wird.

Da die Teiltheorien, die wir bereits haben, von ganz außergewöhnlichen Situationen abgesehen, ausreichen, um genaue Vorhersagen zu liefern, scheint sich die Suche nach der endgültigen Theorie des Universums aus praktischer Sicht nur schwer rechtfertigen zu lassen. (Hier lässt sich allerdings anmerken, dass man ähnliche Einwände auch gegen die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik hätte vorbringen können, und dann haben uns diese beiden Theorien die Kernenergie und die mikroelektronische Revolution gebracht!) Möglicherweise wird also die Entdeckung einer vollständigen einheitlichen Theorie keinen Beitrag zum Überleben der Menschheit liefern, ja sie wird sich noch nicht einmal auf unsere Lebensweise auswirken. Doch seit den ersten Anfängen ihrer Kultur haben die Menschen es

nie ertragen können, das unverbundene und unerklärliche Nebeneinander von Ereignissen hinzunehmen. Stets waren sie bemüht, die der Welt zugrunde liegende Ordnung zu verstehen. Nach wie vor haben wir ein unstillbares Bedürfnis zu wissen, warum wir hier sind und woher wir kommen. Das tiefverwurzelte Verlangen der Menschheit nach Erkenntnis ist Rechtfertigung genug für unsere fortwährende Suche. Und wir haben dabei kein geringeres Ziel vor Augen als die vollständige Beschreibung des Universums, in dem wir leben.

2

RAUM UND ZEIT

Unsere gegenwärtigen Vorstellungen über die Bewegung von Körpern gehen zurück auf Galilei und Newton. Vorher hielt man sich an Aristoteles, der sagte, der natürliche Zustand eines Körpers sei die Ruhe und er bewege sich nur, wenn eine Triebkraft auf ihn einwirke. Danach müsse ein schwerer Körper schneller als ein leichter fallen, weil er stärker zur Erde gezogen würde.

Nach aristotelischer Tradition war man davon überzeugt, dass man alle Gesetze, die das Universum bestimmen, allein durch das Denken ausfindig machen könne und dass es nicht notwendig sei, sie durch Beobachtungen zu überprüfen. So war vor Galilei niemand daran interessiert festzustellen, ob Körper von verschiedenem Gewicht tatsächlich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten fallen. Es heißt, Galilei habe die Überzeugung des Aristoteles dadurch widerlegt, dass er Gewichte vom Schiefen Turm von Pisa habe fallen lassen. Die Geschichte ist wahrscheinlich erfunden, aber Galilei tat etwas Vergleichbares: Er ließ verschiedene schwere Kugeln eine glatte Schräge hinunterrollen. Die Situation ist

ähnlich wie bei senkrecht fallenden schweren Körpern, aber leichter zu beobachten, weil die Geschwindigkeiten geringer sind. Galileis Messungen waren eindeutig: Die Geschwindigkeit aller Körper nahm in gleichem Maße zu, unabhängig von ihrem Gewicht. Wenn man beispielsweise einen Ball einen Hügel hinunterrollen lässt, der auf zehn Meter ein Gefälle von einem Meter aufweist, so wird sich der Ball nach einer Sekunde mit einer Geschwindigkeit von ungefähr einem Meter pro Sekunde bewegen, nach zwei Sekunden zwei Meter pro Sekunde zurücklegen und so fort, ganz gleich, wie schwer er ist. Natürlich fällt ein Bleigewicht schneller als eine Feder, aber das ist nur darauf zurückzuführen, dass der Fall der Feder durch den Luftwiderstand gebremst wird. Wenn man zwei Körper ohne erheblichen Luftwiderstand fallen lässt – zum Beispiel zwei Bleigewichte –, fallen sie mit gleicher Geschwindigkeit. (Da es auf dem Mond keine Luft gibt, die fallende Körper abbremst, führte der Astronaut David R. Scott einen Versuch mit Feder und Hammer durch und stellte fest, dass sie den Boden in der Tat gleichzeitig berührten.)

Galileis Messungen bildeten die Grundlage der Bewegungsgesetze, die Newton entwickelte. Wenn in Galileis Experimenten ein Körper den Abhang hinunterrollte, wirkte stets dieselbe Kraft auf ihn ein (sein Gewicht), mit dem Effekt, dass seine Geschwindigkeit konstant zunahm. Dies zeigte, dass die wirkliche Wirkung einer Kraft stets darin besteht, die Geschwindigkeit eines Körpers zu verändern, ihn also nicht nur in Bewegung zu versetzen, wie man früher gedacht hatte. Und es be-

deutete zugleich, dass ein Körper, auf den keine Kraft einwirkt, sich in gerader Linie und mit konstanter Geschwindigkeit fortbewegt. Diesen Gedanken entwickelte erstmals Newton 1687 in seinen »Principia mathematica«, und er wird als das erste Newtonsche Gesetz bezeichnet. Was mit einem Körper geschieht, wenn eine Kraft auf ihn einwirkt, gibt das zweite Newtonsche Gesetz an: Es besagt, dass der Körper beschleunigt wird, das heißt seine Geschwindigkeit verändert, und zwar proportional zur Kraft. (Bei doppelt so großer Kraft verdoppelt sich auch die Beschleunigung.) Zugleich ist die Beschleunigung umso kleiner, je größer die Masse (oder Materiemenge) des Körpers ist. (Wenn die gleiche Kraft auf einen Körper von doppelter Masse einwirkt, wird die Beschleunigung auf die Hälfte reduziert.) Ein vertrautes Beispiel ist das Auto: Je stärker der Motor, desto größer die Beschleunigung, doch je schwerer das Auto, desto geringer die Beschleunigung bei gleichem Motor.

Neben den Bewegungsgesetzen entdeckte Newton auch ein Gesetz, das die Gravitation beschreibt. Es besagt, dass jeder Körper jeden anderen mit einer Kraft anzieht, die der Masse jedes Körpers proportional ist. Die Kraft zwischen zwei Körpern A und B wäre also zweimal so groß, würde sich die Masse eines der Körper (sagen wir von A) verdoppeln. Das entspricht auch der Erwartung, denn man kann sich vorstellen, der neue Körper A sei aus zwei Körpern der ursprünglichen Masse entstanden. Jeder würde Körper B mit der ursprünglichen Kraft anziehen. Und wenn einer der Kör-

per die doppelte und der andere die dreifache Masse hätte, dann wäre die Kraft sechsmal so groß. Nun wird ersichtlich, warum alle Körper gleich schnell fallen: Ein Körper mit doppeltem Gewicht wird mit doppelter Schwerkraft zu Boden gezogen, aber er besitzt auch die doppelte Masse, was nur die halbe Beschleunigung bedeutet. Nach dem zweiten Newtonschen Gesetz heben sich diese beiden Wirkungen exakt auf, sodass die Beschleunigung in allen Fällen gleich ist.

Ferner ist nach Newtons Gravitationsgesetz die Kraft umso kleiner, je weiter die Körper voneinander entfernt sind. Newtons Gravitationsgesetz sagt aus, dass die Massenanziehung eines Sterns genau ein Viertel derjenigen eines ähnlichen Sterns beträgt, der halb so weit entfernt ist. Es sagt die Umlaufbahnen der Erde, des Mondes und der Planeten mit großer Genauigkeit vorher. Gäbe es ein Gesetz, dem zufolge die Anziehung rascher mit der Entfernung abnähme, wären die Umlaufbahnen der Planeten nicht elliptisch, sondern würden spiralförmig auf die Sonne zulaufen. Nähmen die Anziehungskräfte langsamer ab, würde sich die Gravitation ferner Sterne gegenüber der der Erde durchsetzen.

Der große Unterschied zwischen den Vorstellungen des Aristoteles auf der einen und denen Galileis und Newtons auf der anderen Seite liegt darin, dass jener an einen bevorzugten Ruhezustand glaubte, den jeder Körper einnehmen würde, wenn nicht irgendeine Kraft, irgendein Impuls auf ihn einwirkte. Vor allem meinte er, die Erde befände sich im Ruhezustand. Doch aus den Newtonschen Gesetzen folgt, dass es keinen ein-

deutigen Ruhezustand gibt. Man kann mit gleichem Recht sagen, dass sich Körper A im Ruhezustand befindet, während sich Körper B, bezogen auf Körper A, mit gleichbleibender Geschwindigkeit bewegt, oder dass Körper B unbeweglich verharrt, während Körper A sich bewegt. Wenn wir beispielsweise die Erdumdrehung und die Kreisbahn unseres Planeten um die Sonne einen Moment lang unberücksichtigt lassen, so könnten wir entweder sagen, dass die Erde sich in Ruhe befindet, während ein Zug auf ihrer Oberfläche mit 150 Stundenkilometern nordwärts fährt, oder dass der Zug sich im Ruhezustand befindet, während sich die Erde mit 150 Stundenkilometern südwärts bewegt. Auch bei Experimenten mit sich bewegenden Körpern im Zug blieben Newtons Gesetze gültig. Bei einem Tischtennismatch im Zug würde man zum Beispiel feststellen können, dass der Ball den Newtonschen Gesetzen genauso gehorcht wie ein Ball draußen auf einer Tischtennisplatte, die an der Eisenbahnstrecke aufgestellt ist. Es lässt sich also nicht entscheiden, ob sich der Zug oder die Erde bewegt.

Das Fehlen eines absoluten Zustands der Ruhe bedeutet, dass man nicht bestimmen kann, ob zwei Ereignisse, die zu verschiedenen Zeitpunkten stattfanden, am gleichen Ort im Raum passierten. Nehmen wir an, der Tischtennisball im Zug springt senkrecht hoch und runter, sodass er im Abstand von einer Sekunde zweimal an derselben Stelle des Tisches aufprallt. Für jemanden, der am Gleis steht, würden die beiden Reflexionen des Balles etwa fünfzig Meter auseinanderliegen, weil

der Zug diese Strecke in der Zwischenzeit zurückgelegt hätte. Das Nichtvorhandensein eines absoluten Ruhezustandes bedeutet also, dass man einem Ereignis entgegen der Auffassung des Aristoteles keine absolute Position im Raum zuweisen kann. Die Positionen von Ereignissen und die Abstände zwischen ihnen wären verschieden, je nachdem, ob sich der Beobachter im Zug oder am Gleis befindet, und es gibt keinen Grund, die eine Beobachterposition der anderen vorzuziehen.

Dieses Fehlen einer absoluten Position oder eines absoluten Raumes, wie man sagte, machte Newton schwer zu schaffen, weil es nicht in Einklang zu bringen war mit seiner Vorstellung von einem absoluten Gott. Ja, er weigerte sich, diesen Mangel hinzunehmen, obwohl er sich aus seinen Gesetzen ergab. Wegen dieser irrationalen Überzeugung wurde er von vielen kritisiert, vor allem von George Berkeley, einem Theologen und Philosophen, der alle materiellen Gegenstände ebenso wie Zeit und Raum für bloße Täuschung hielt. Als der berühmte Dr. Johnson von Berkeleys Ansichten hörte, rief er aus: »Das widerlege ich so!« und stieß mit seinem Zeh gegen einen großen Stein.

Aristoteles wie Newton glaubten an eine absolute Zeit. Das heißt, sie glaubten, man könnte das Zeitintervall zwischen zwei Ereignissen eindeutig bestimmen und diese Zeit bliebe stets die Gleiche, wer auch immer sie messe – vorausgesetzt, die Uhr geht richtig. Nach dieser Auffassung ist Zeit getrennt und unabhängig vom Raum. Die meisten Leute würden ihr wohl stimmen; aus der Sicht des gesunden Menschenverstan-

des spricht nichts dagegen. Doch wir waren gezwungen, unsere Vorstellungen von Zeit und Raum zu ändern. Zwar kommen wir mit den alltäglichen, vom gesunden Menschenverstand anscheinend nahegelegten Begriffen zurecht, wenn wir uns mit Dingen wie Äpfeln oder Planeten beschäftigen, die sich verhältnismäßig langsam bewegen, doch sie lassen uns im Stich, wenn wir uns Objekten zuwenden, die sich mit (oder fast mit) Lichtgeschwindigkeit bewegen.

Dass Licht sich mit einer endlichen, wenn auch sehr hohen Geschwindigkeit bewegt, wurde erstmals 1676 von dem dänischen Astronomen Ole Christensen Rømer entdeckt. Er beobachtete, dass zwischen den Zeitpunkten, zu denen die Jupitermonde auf ihren Umlaufbahnen um den Jupiter hinter diesem Planeten verschwinden, keine gleichmäßigen Intervalle liegen, wie zu erwarten gewesen wäre, vorausgesetzt natürlich, die Monde umkreisen ihren Planeten mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Während Erde und Jupiter ihren Bahnen um die Sonne folgen, verändert sich ständig der Abstand zwischen ihnen. Rømer stellte fest, dass die Verfinsterungen der Jupitermonde umso später aufzutreten schienen, je weiter die Erde vom Jupiter entfernt war. Seine Erklärung für dieses Phänomen: Das Licht der Monde braucht länger, uns zu erreichen, wenn wir weiter von ihnen entfernt sind. Allerdings hat er die Entfernungsschwankungen zwischen Erde und Jupiter nicht sehr genau gemessen; so kam er auf eine Lichtgeschwindigkeit von 224 000 Kilometern pro Sekunde, während man heute von 300 000 Kilometern pro Se-

kunde ausgeht. Doch dies soll die bemerkenswerte Leistung Rømers, der nicht nur bewies, dass sich das Licht mit endlicher Geschwindigkeit bewegt, sondern diese Geschwindigkeit auch maß, keineswegs schmälern – veröffentlichte er doch seine Ergebnisse elf Jahre vor Newtons »Principia mathematica«.

Eine eigentliche Theorie über die Ausbreitung des Lichts schlug erst 1865 der englische Physiker James Clerk Maxwell vor, dem es gelang, die Teiltheorien zu vereinigen, mit denen man bis dahin die Kräfte der Elektrizität und des Magnetismus beschrieben hatte. Maxwells Gleichungen sagten voraus, dass es zu wellenartigen Störungen im zusammengesetzten elektromagnetischen Feld kommen könne und dass diese sich mit einer konstanten Geschwindigkeit wie Wellen in einem Teich bewegen würden. Wenn die Länge dieser Wellen (der Abstand zwischen zwei Wellenkämmen) einen Meter oder mehr beträgt, so handelt es sich um Radiowellen, wie wir heute sagen. Kürzere Wellen werden als Mikrowellen (ein paar Zentimeter lang) oder Infrarot (länger als ein zehntausendstel Zentimeter) bezeichnet. Sichtbares Licht hat eine Wellenlänge zwischen vierzig und achtzig millionstel Zentimeter. Und es sind noch kürzere Wellenlängen bekannt, zum Beispiel Ultraviolet, Röntgen- und Gammastrahlen.

Aus Maxwells Theorie folgt, dass sich Radio- oder Lichtwellen mit einer bestimmten konstanten Geschwindigkeit bewegen. Aber Newtons Theorie ließ die Vorstellung von einem absoluten Ruhezustand nicht mehr zu. Wenn man also annahm, dass das Licht sich

mit einer bestimmten Geschwindigkeit fortbewege, so musste man angeben, in Bezug worauf diese Geschwindigkeit zu messen sei. Deshalb kam man auf die Idee, es gäbe eine Substanz, »Äther« genannt, die allgegenwärtig sei, auch im »leeren« Raum. Die Lichtwellen, so glaubte man, bewegten sich durch den Äther wie die Schallwellen durch die Luft, und ihre Geschwindigkeit sei infolgedessen relativ zu diesem Äther. Beobachter, die sich wiederum jeweils relativ zum Äther bewegten, würden das Licht mit verschiedenen Geschwindigkeiten auf sich zukommen sehen, doch die Lichtgeschwindigkeit relativ zum Äther bliebe immer gleich. Vor allem bei der Bewegung der Erde durch den sie umgebenden Äther müsste die Lichtgeschwindigkeit, gemessen in Richtung der Erdbewegung (wie es der Fall wäre, wenn wir uns auf die Lichtquelle zubewegten), größer sein als die Lichtgeschwindigkeit, gemessen im rechten Winkel zu dieser Bewegung (wie es der Fall wäre, wenn wir uns nicht auf die Quelle zubewegten). 1887 führten Albert Michelson (der später als erster Amerikaner den Nobelpreis für Physik erhielt) und Edward Morley an der Case School of Applied Science in Cleveland mit großer Sorgfalt ein Experiment durch, bei dem sie die Lichtgeschwindigkeit in Richtung der Erdbewegung mit der im rechten Winkel zur Erdbewegung verglichen. Zu ihrer großen Überraschung stellten sie fest, dass die beiden Geschwindigkeiten völlig identisch waren!

Zwischen 1887 und 1905 wurden mehrere Versuche unternommen – insbesondere durch den holländischen Physiker Hendrik Lorentz –, die Ergebnisse des

Michelson-Morley-Experiments dadurch zu erklären, dass sich Gegenstände zusammenziehen und Uhren langsamer gehen, wenn sie sich durch den Äther bewegen. Doch im Jahre 1905 erklärte ein bis dahin unbekannter Beamter des Eidgenössischen Patentamtes Bern – Albert Einstein – in seinem berühmten Aufsatz, die ganze Vorstellung vom Äther sei überflüssig, vorausgesetzt, man sei bereit, die Vorstellung von der absoluten Zeit aufzugeben. Den gleichen Gedanken äußerte ein paar Wochen später Henri Poincaré, ein führender französischer Mathematiker. Einsteins Argumente waren überwiegend an der Physik ausgerichtet, während Poincaré das Problem mehr aus mathematischer Sicht betrachtete. Gewöhnlich wird Einstein die neue Theorie zugeschrieben, doch auch Poincarés Name bleibt mit einem wichtigen Teil von ihr verknüpft.

Das entscheidende Postulat der Relativitätstheorie, wie sie genannt wurde, besagt, dass die Naturgesetze für alle bewegten Beobachter unabhängig von ihrer Geschwindigkeit gleich sein müssen. Das traf zwar schon auf Newtons Bewegungsgesetze zu, doch nun wurde das Prinzip auch auf Maxwells Theorie und die Lichtgeschwindigkeit ausgedehnt: Alle Beobachter müssen die gleiche Lichtgeschwindigkeit messen, wie schnell auch immer sie sich bewegen. Dieser einfache Gedanke hat einige bemerkenswerte Folgen. Am bekanntesten sind wohl die Äquivalenz von Masse und Energie, zusammengefasst in Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$ (wobei E die Energie ist, m die Masse und c die Lichtgeschwindigkeit), und das Gesetz, nach dem nichts

sich schneller fortbewegen kann als das Licht. Infolge der Äquivalenz von Energie und Masse muss die Energie, die ein Objekt aufgrund seiner Bewegung besitzt, zu seiner Masse hinzugerechnet werden. Mit anderen Worten: Sie erschwert es ihm, seine Geschwindigkeit zu steigern. Von ausschlaggebender Bedeutung ist dieser Effekt allerdings nur bei Objekten, deren Geschwindigkeit der des Lichtes nahekommt. Beispielsweise ist bei 10 Prozent der Lichtgeschwindigkeit die Masse eines Objektes nur 0,5 Prozent größer als normal, während sie bei 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit mehr als doppelt so groß wie normal wäre. Je mehr sich das Objekt der Lichtgeschwindigkeit nähert, desto rascher wächst seine Masse, sodass mehr und mehr Energie erforderlich ist, es noch weiter zu beschleunigen. Tatsächlich kann es die Lichtgeschwindigkeit niemals erreichen, weil es dazu einer unendlichen Energie bedürfte. Aus diesem Grund ist jedes normale Objekt durch die Relativitätstheorie dazu verurteilt, sich mit Geschwindigkeiten unterhalb der Lichtgeschwindigkeit fortzubewegen. Nur das Licht oder andere Wellen, die keine Ruhmasse haben, können sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Eine ebenso gewichtige Konsequenz hat die Relativitätstheorie für unsere Vorstellung von Raum und Zeit. Schickte man einen Lichtimpuls von einem Ort zu einem anderen, so würden nach Newtons Theorie verschiedene Beobachter hinsichtlich der Dauer der Reise Einigkeit erzielen (da die Zeit absolut ist), nicht aber hinsichtlich der Länge des Weges (da der Raum nicht absolut ist). Weil man die Geschwindigkeit des Lich-

tes errechnet, indem man die zurückgelegte Entfernung durch die benötigte Zeit teilt, würden verschiedene Beobachter auf verschiedene Werte für die Lichtgeschwindigkeit kommen. In der Relativitätstheorie hingegen *müssen* sich alle Beobachter über die Geschwindigkeit des Lichtes einig sein. Aber sie gehen doch von verschiedenen Entfernungen aus, die das Licht zurückgelegt hat. Wie sollen sie sich da über die Zeit einigen, die es dazu benötigt hat? (Denn die benötigte Zeit ist ja die zurückgelegte Strecke, für die verschiedene Angaben vorliegen, dividiert durch die konstante Lichtgeschwindigkeit, über die sich die Beobachter einig sind.) Mit anderen Worten: Die Relativitätstheorie macht der Vorstellung den Garaus, es gebe eine absolute Zeit! Es sieht so aus, als hätte jeder Beobachter sein eigenes Zeitmaß, seine eigene Uhr, und als würden auch dieselben Uhren, von verschiedenen Beobachtern benutzt, in ihren Angaben nicht unbedingt übereinstimmen.

Jeder Beobachter könnte ein Radargerät verwenden und einen Lichtimpuls oder Radiowellen aussenden, um festzustellen, wo und wann ein Ereignis stattgefunden hat. Ein Teil des Impulses wird direkt bei dem Ereignis reflektiert, und der Beobachter misst die Zeit bis zum Eintreffen des Echos. Als Zeitpunkt des Ereignisses gilt dann der Zeitpunkt genau in der Mitte zwischen dem Aussenden und dem Empfangen des Impulses; die Entfernung des Ereignisses ist die Hälfte der Zeit, die er für den Hin- und Rückweg benötigt, multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit. (Ein Ereignis ist hier etwas, das an einem einzigen Punkt im Raum und zu einem

einzigsten Zeitpunkt stattfindet.) Diese Überlegung ist in Abbildung 2, einem Beispiel für ein Raumzeitdiagramm, dargestellt. Bei diesem Verfahren werden Beobachter, die sich relativ zueinander bewegen, ein und denselben Ereignis verschiedene Zeiten und Positionen zuweisen. Es gibt keinen Beobachter, dessen Messungen richtiger wären als die irgendeines anderen, aber alle Messungen stehen zueinander in Beziehung. Jeder Beobachter kann genau ermitteln, welche Zeit und welche Position irgendein anderer Beobachter – vorausgesetzt, er kennt dessen relative Geschwindigkeit – dem Ereignis zuweisen wird.

Heute benutzen wir diese Methode, um Entfernungen exakt zu bestimmen, weil wir Zeit genauer messen können als Länge. So ist der Meter definiert als die Strecke, die vom Licht in 0,00000003335640952 Sekunden zurückgelegt wird, gemessen von einer Cäsiumuhr. (Zu dieser besonderen Zahl kommt es, weil sie der historischen Definition des Meters entspricht – den beiden Markierungen auf dem in Paris aufbewahrten Platinstab.) Wir können aber auch eine neue, bequemere Längeneinheit verwenden: die Lichtsekunde. Sie wird einfach definiert als die Entfernung, die das Licht in einer Sekunde zurücklegt. In der Relativitätstheorie definieren wir Entfernung durch die Zeit und die Lichtgeschwindigkeit, woraus automatisch folgt, dass jeder Beobachter zu dem gleichen Ergebnis kommen wird, wenn er die Geschwindigkeit des Lichtes misst (definitionsgemäß ein Meter pro 0,00000003335640952 Sekunden). Es besteht keine Notwendigkeit, einen Äther

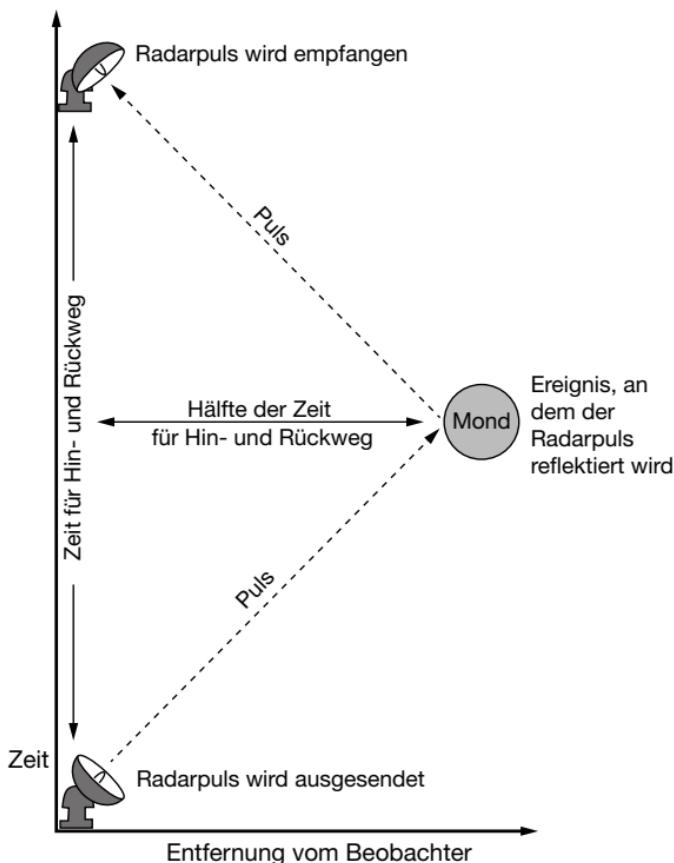


Abbildung 2: Die Zeit wird senkrecht und der Abstand vom Beobachter waagerecht gemessen. Den Weg des Beobachters durch Raum und Zeit gibt die senkrechte Linie auf der linken Seite wieder. Die diagonalen Linien stellen die Wege der Lichtstrahlen zum und vom Ereignis dar.

anzunehmen, dessen Existenz sowieso nicht nachgewiesen werden könnte, wie das Michelson-Morley-Experiment gezeigt hat. Die Relativitätstheorie zwingt uns jedoch, unsere Vorstellungen von Raum und Zeit

grundlegend zu verändern. Wir müssen uns mit dem Gedanken anfreunden, dass die Zeit nicht völlig losgelöst und unabhängig vom Raum existiert, sondern sich mit ihm zu einer Entität verbindet, die wir Raumzeit nennen.

Aus der alltäglichen Erfahrung wissen wir, dass man die Position eines Punktes im Raum durch drei Zahlen – Koordinaten – angeben kann. Beispielsweise kann man sagen, dass ein Punkt in einem Zimmer vier Meter von der einen Wand, drei Meter von einer anderen und zwei Meter vom Fußboden entfernt ist. Oder man kann einem Punkt eine geographische Breite, eine geographische Länge und eine Höhe über dem Meeresspiegel zuweisen. So lassen sich immer jeweils drei geeignete Koordinaten verwenden, auch wenn sie nur von eingeschränkter Gültigkeit sind. Sicherlich würde man die Position des Mondes nicht in Kilometern nördlich und westlich vom Kölner Dom und in Metern über dem Meeresspiegel angeben. Statt dessen könnte man sie durch die Entfernung von der Sonne bestimmen, durch den Abstand von der Bahnebene der Planeten und durch den Winkel, den die Verbindungsgeraden von Mond und Sonne und die Verbindungsgeraden zwischen der Sonne und einem nahe gelegenen Stern wie Alpha Centauri bilden. Selbst diese Koordinaten wären nicht von großem Nutzen, wollte man die Position der Sonne in unserer Galaxie oder die Position unserer Galaxie in der lokalen Gruppe bestimmen. Man könnte das ganze Universum als eine Reihe einander überschneidender Flecken beschreiben. In jedem von ihnen ließe sich ein

anderer Satz von drei Koordinaten benutzen, um die Position eines Punktes anzugeben.

Ein Ereignis ist etwas, das an einem bestimmten Punkt im Raum und zu einer bestimmten Zeit geschieht. Deshalb kann man es durch vier Zahlen oder Koordinaten bestimmen. Wiederum ist die Wahl der Koordinaten beliebig: Jedes System von drei hinreichend definierten Raumkoordinaten und jedes Zeitmaß ist zulässig. Die Relativitätstheorie unterscheidet im Grunde nicht zwischen Raum- und Zeitkoordinaten, wie es auch keinen wirklichen Unterschied zwischen zwei beliebigen Raumkoordinaten gibt. Man könnte ein neues Koordinatensystem wählen, in dem etwa die erste Raumkoordinate eine Kombination der ersten und zweiten aus dem alten System ist. Statt beispielsweise die Position eines Punktes auf der Erde in Kilometern nördlich und westlich vom Kölner Dom zu messen, könnte man auch die Kilometerzahl nordwestlich und nordöstlich von ihm verwenden. Entsprechend könnte man in der Relativitätstheorie die alte Zeit (in Sekunden) und die nördliche Entfernung (in Lichtsekunden) vom Kölner Dom zu einer neuen Zeitkoordinate kombinieren.

Oft hilft es, sich zu vergegenwärtigen, dass die vier Koordinaten eines Ereignisses seine Position in einem vierdimensionalen Raum festlegen, Raumzeit genannt. Es ist unmöglich, sich einen vierdimensionalen Raum vorzustellen – ich habe in dieser Hinsicht schon Schwierigkeiten mit dem dreidimensionalen Raum. Dagegen ist es leicht, Diagramme von zweidimensionalen Räu-

men zu zeichnen, wie zum Beispiel der Erdoberfläche. (Die Oberfläche der Erde ist zweidimensional, weil sich die Position eines Punktes durch zwei Koordinaten angeben lässt, Länge und Breite.) Ich werde grundsätzlich Diagramme verwenden, in denen die Zeit nach oben hin zunimmt und die räumlichen Dimensionen horizontal abgebildet werden. Die beiden anderen Dimensionen des Raumes bleiben unberücksichtigt oder werden – gelegentlich – perspektivisch angedeutet. (Dann handelt es sich um sogenannte Raumzeitdiagramme wie in Abbildung 2.) Beispielsweise ist in Abbildung 3 die Zeit nach oben hin in Jahren eingetragen, während die Entfernung entlang der waagerechten Verbindungsgeraden zwischen Sonne und Alpha Centauri in Kilometern gemessen wird. Senkrechte Linien links und rechts geben die Bahnen von Sonne und Alpha Centauri durch die Raumzeit wieder. Ein Lichtstrahl von der Sonne folgt der diagonalen Linie und braucht vier Jahre, um zu Alpha Centauri zu gelangen.

Wie gezeigt, sagen Maxwells Gleichungen voraus, dass die Lichtgeschwindigkeit stets gleich bleibt, unabhängig von der Geschwindigkeit, mit der die Lichtquelle sich bewegt, und diese Vorhersage konnte durch genaue Messungen bestätigt werden. Daraus folgt, dass ein Lichtimpuls, der zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort im Raum ausgesendet wird, sich in Form einer Lichtkugel ausbreiten wird, deren Größe und Position unabhängig von der Geschwindigkeit der Lichtquelle ist. Nach einer millionstel Sekunde wird sich das Licht zu einer Kugeloberfläche mit einem

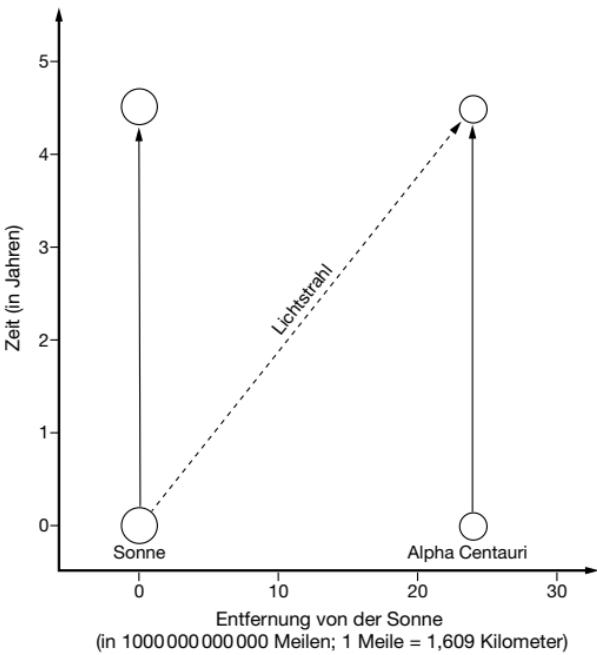


Abbildung 3

Radius von 300 Metern ausgebreitet haben, nach zwei millionstel Sekunden betrüge der Radius 600 Meter und so fort. Der Vorgang gliche der Ausbreitung von Wellen auf der Oberfläche eines Teiches, in den man einen Stein geworfen hat. Die Wellen breiten sich in einem Kreis aus, der im Laufe der Zeit größer wird. Stellt man sich ein dreidimensionales Modell vor, das aus der zweidimensionalen Oberfläche des Teiches und der einen Dimension der Zeit besteht, so bildet der sich ausbreitende Wellenkreis einen Kegel, dessen Spitze den Ort und Zeitpunkt bezeichnet, an dem der Stein ins Wasser fiel (Abb. 4). Entsprechend bildet das von einem Ereignis ausgehende, sich ausbreitende Licht einen drei-

dimensionalen Kegel in der vierdimensionalen Raumzeit. Dieser Kegel wird als Zukunftslichtkegel des Ereignisses bezeichnet. In gleicher Weise können wir einen zweiten Kegel zeichnen, den Vergangenheitslichtkegel, das heißt, die Gesamtheit der Ereignisse, von denen aus ein Lichtpuls das betreffende Ereignis erreichen kann (Abb. 5).

Bei einem Ereignis P kann man die anderen Ereignisse des Universums in drei Klassen unterteilen. Die Ereignisse, die durch das Ereignis P durch ein Teilchen oder eine Welle, die mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs ist, erreicht werden können, liegen in der Zukunft von P. Sie befinden sich in oder auf der expandierenden Lichkugel, die von dem Ereignis P emittiert wird. Folglich liegen sie in oder auf dem Zukunftslichtkegel von P in dem Raumzeitdiagramm. Nur Ereignisse in der Zukunft von P können durch das beeinflusst werden, was P zustößt, weil nichts schneller als das Licht sein kann. Entsprechend lässt sich die Vergangenheit von P als die Gesamtheit aller Ereignisse definieren, von denen aus Signale, die sich mit Lichtgeschwindigkeit oder geringeren Geschwindigkeiten ausbreiten, P erreichen können. Also umfasst dieser Bereich alle Ereignisse, die beeinflussen können, was in P geschieht. Die Ereignisse, die nicht in der Zukunft oder Vergangenheit von P liegen, befinden sich, wie wir sagen, im »Anderswo« von P. Ereignisse im »Anderswo« können die Ereignisse in P weder beeinflussen noch von ihnen beeinflusst werden. Würde beispielsweise die Sonne in diesem Augenblick zu scheinen aufhören, würde dies das Geschehen auf

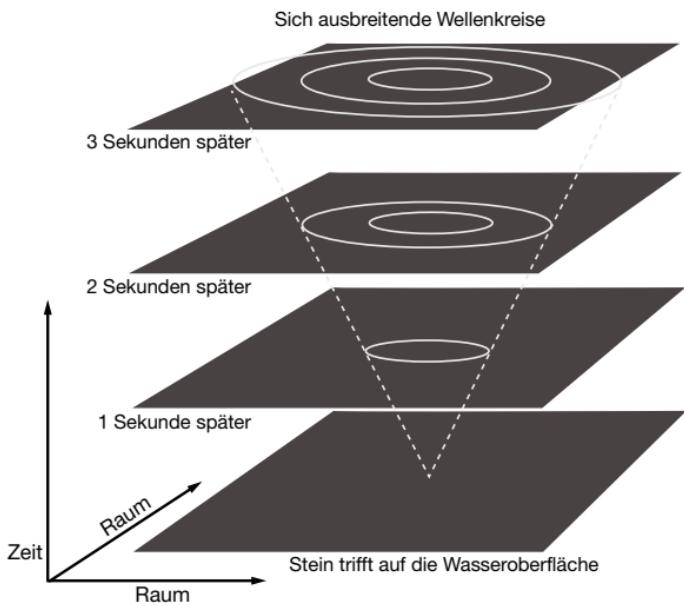


Abbildung 4

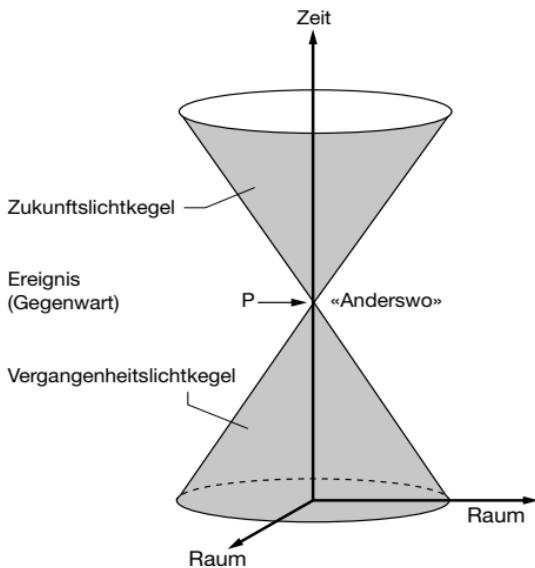


Abbildung 5

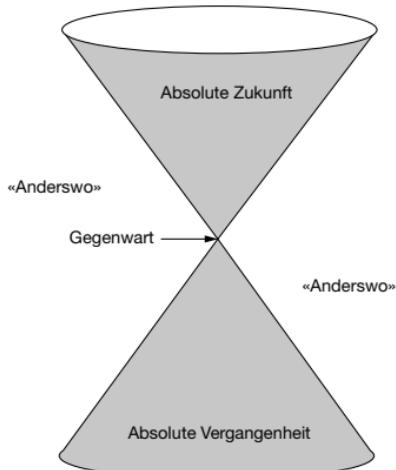


Abbildung 6

der Erde zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht beeinflussen, da es sich in dem Moment, da die Sonne verlöschen würde, für uns im »Anderswo« des Ereignisses befände (Abb. 7). Erst acht Minuten später würden wir davon erfahren – nach Ablauf der Zeit, die das Licht braucht, um von der Sonne zur Erde zu gelangen. Erst dann würden die Ereignisse auf der Erde im Zukunftslichtkegel des Ereignisses »Die Sonne erlischt« liegen. Ebensowenig wissen wir, was in diesem Augenblick in fernen Regionen des Universums geschieht: Das Licht entfernter Galaxien, das wir erblicken, verließ diese vor Jahrmillionen – im Falle des am weitesten entfernten Objektes, das wir bisher gesehen haben, vor etwa acht Milliarden Jahren.² Wir können also immer nur ein vergangenes Stadium des Universums betrachten.

Wenn man die Einflüsse der Gravitation vernachlässigt, wie es Einstein und Poincaré 1905 taten, so er-

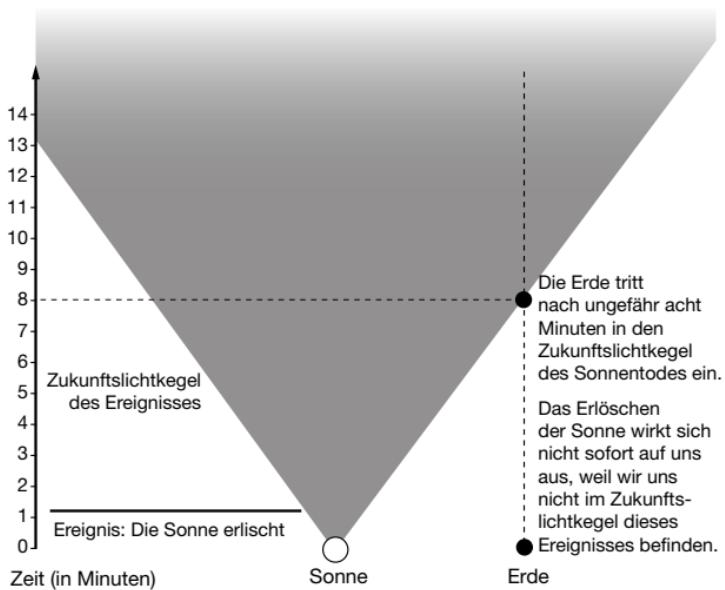


Abbildung 7

hält man die Spezielle Relativitätstheorie. Für jedes Ereignis in der Raumzeit können wir einen Lichtkegel konstruieren (die Gesamtheit aller möglichen Wege, die das von dem Ereignis ausgesandte Licht in der Raumzeit zurücklegen kann), und da die Lichtgeschwindigkeit bei jedem Ereignis und in jede Richtung gleich bleibt, werden alle Lichtkegel identisch sein und in dieselbe Richtung zeigen. Die Theorie besagt, dass nichts schneller als das Licht sein kann. Daraus folgt, dass jeder Weg eines Objektes durch Raum und Zeit durch eine Linie repräsentiert werden muss, die innerhalb des Lichtkegels eines jeden Ereignisses auf dieser Bahn liegt (Abb. 8).

Die Spezielle Relativitätstheorie bewährte sich, weil

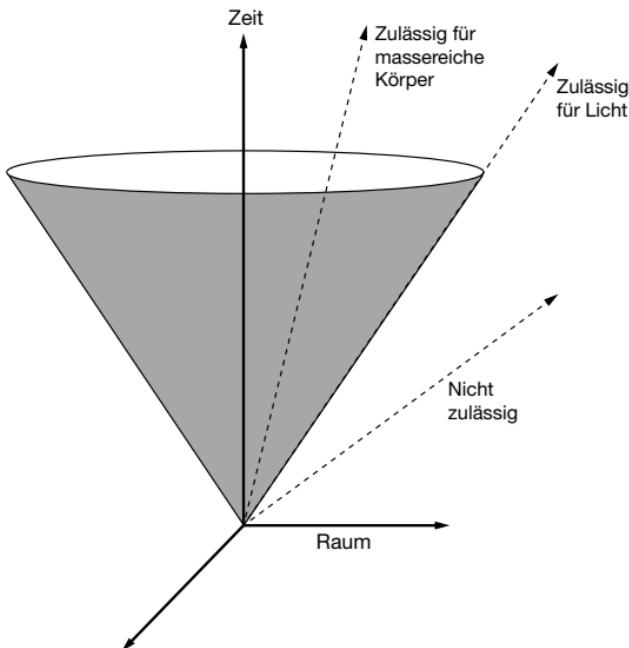


Abbildung 8

sie erklärte, warum die Lichtgeschwindigkeit allen Beobachtern gleich erscheint (wie das Michelson-Morley-Experiment gezeigt hatte), und sie war gut geeignet zu beschreiben, was geschieht, wenn sich Objekte mit Geschwindigkeiten nahe der des Lichtes bewegen. Sie stand jedoch im Widerspruch zur Newtonschen Gravitationstheorie, nach der sich Objekte mit einer Kraft anziehen, deren Größe von der Entfernung zwischen ihnen abhängt. Das heißt: Wenn man eines der Objekte bewegt, müsste sich die Kraft, die auf das andere einwirkt, sofort verändern. Oder mit anderen Worten: Die Gravitation müsste mit unendlicher Geschwindigkeit wirken und nicht mit Lichtgeschwindigkeit oder lang-

samer, wie es die Spezielle Relativitätstheorie verlangt. Zwischen 1908 und 1914 unternahm Einstein eine Reihe erfolgloser Versuche, eine neue Gravitationstheorie in Einklang mit der Speziellen Relativität zu entwickeln. 1915 trat er schließlich mit einer Arbeit an die Öffentlichkeit, die das zum Inhalt hatte, was wir heute als Allgemeine Relativitätstheorie bezeichnen.

Einstein ging von dem revolutionären Vorschlag aus, dass die Gravitation nicht eine Kraft wie andere Kräfte sei. Man müsse sie vielmehr als eine Folge des Umstandes betrachten, dass die Raumzeit nicht eben sei, wie man bisher angenommen hätte, sondern gekrümmmt oder »verzerrt« durch die Verteilung der Massen und Energien in ihr. Körper wie die Erde würden nicht durch eine Kraft, Gravitation genannt, dazu gebracht, sich auf gekrümmten Bahnen zu bewegen; sie folgten vielmehr der besten Annäherung an eine geradlinige Bahn, die in einem gekrümmten Raum möglich sei – einer sogenannten Geodäte. Eine Geodäte ist die kürzeste (oder längste) Verbindung zwischen zwei nahe gelegenen Punkten. Die Oberfläche der Erde ist beispielsweise ein zweidimensionaler gekrümmter Raum. Eine Geodäte auf der Erde wird Großkreis genannt und ist die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten (Abb. 9). Da die Geodäte die kürzeste Verbindung zwischen zwei beliebigen Flugplätzen ist, wird jeder Navigator dem Piloten diese Route angeben. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie folgen Körper in der vierdimensionalen Raumzeit immer geraden Linien, doch für uns scheinen sie sich in unserem dreidimen-

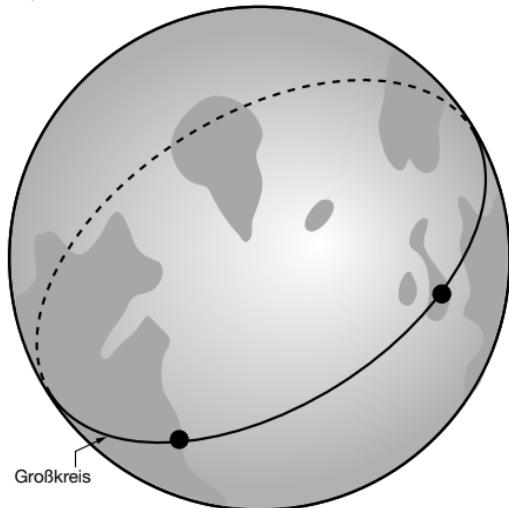


Abbildung 9

sionalen Raum auf gekrümmten Bahnen zu bewegen. (Stellen Sie sich vor, Sie beobachten ein Flugzeug, das über hügeliges Gebiet fliegt. Obwohl es im dreidimensionalen Raum einer geraden Linie folgt, beschreibt sein Schatten auf der zweidimensionalen Erdoberfläche eine gekrümmte Bahn.)

Die Masse der Sonne krümmt die Raumzeit derart, dass sich die Erde, obwohl sie in der vierdimensionalen Raumzeit einem geraden Weg folgt, im dreidimensionalen Raum auf einer kreisförmigen Umlaufbahn zu bewegen scheint. Tatsächlich sind die von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Umlaufbahnen der Planeten fast identisch mit denen, die sich aus Newtons Gravitationstheorie ergaben. Im Falle des Merkur jedoch, der – von allen Planeten der Sonne am nächsten – der stärksten Gravitationswirkung

unterworfen ist und dessen Umlaufbahn nicht perfekt kreisförmig, sondern etwas in die Länge gestreckt ist, prognostiziert die Allgemeine Relativitätstheorie, dass die lange Achse der Bahnellipse sich mit einer Geschwindigkeit von ungefähr einem Grad pro zehntausend Jahren um die Sonne drehen müsste. So geringfügig dieser Effekt ist, war er den Astronomen doch schon vor 1915 aufgefallen. Er wurde zu einer der ersten Bestätigungen der Einsteinschen Theorie. Später sind mit Hilfe von Radar die noch geringfügigeren Abweichungen der anderen Planeten von Newtons Vorhersagen gemessen worden, und sie deckten sich alle mit den Berechnungen auf der Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Auch Lichtstrahlen müssen in der Raumzeit geodätschen Linien folgen. Wiederum bewirkt die Krümmung der Raumzeit, dass sich das Licht nicht mehr geradlinig durch den Raum zu bewegen scheint. Deshalb sagt die Allgemeine Relativitätstheorie voraus, dass das Licht durch Gravitationsfelder abgelenkt werde. Beispielsweise müsste der Theorie zufolge die Sonne kraft ihrer Masse Lichtkegel von Punkten in ihrer Nähe leicht nach innen biegen. Das heißt, das Licht eines fernen Sterns, das auf seiner Reise durchs Universum in die Nähe der Sonne geriete, würde um einen kleinen Winkel abgelenkt werden, sodass der Stern für einen Beobachter auf der Erde in einer anderen Position zu stehen schiene (Abb. 10). Käme das Licht des Sterns stets nahe an der Sonne vorbei, könnten wir nicht entscheiden, ob es abgelenkt wird oder ob der Stern tatsächlich dort ist, wo

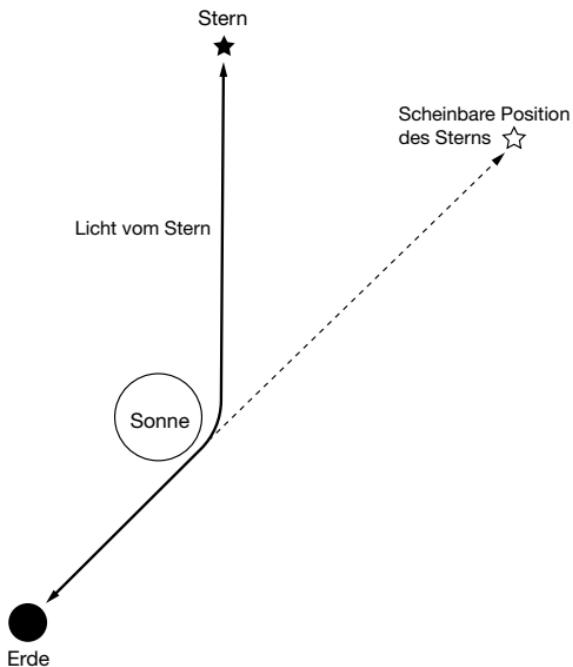


Abbildung 10

wir ihn sehen. Da die Erde jedoch um die Sonne kreist, verschwinden einige Sterne scheinbar hinter der Sonne. Dabei wird ihr Licht abgelenkt – ihre Position im Verhältnis zu anderen Sternen scheint sich zu verändern.

Normalerweise ist es sehr schwer, diesen Effekt zu beobachten, weil das Licht der Sonne die Sterne, die in ihrer Nähe am Himmel erscheinen, nicht erkennen lässt. Anders verhält es sich bei einer Sonnenfinsternis, wenn der Mond das Sonnenlicht abfängt. Einsteins Voraussagen zur Lichtablenkung konnten im Jahre 1915 noch nicht überprüft werden. Der Erste Weltkrieg eskalierte, und man war mit anderen Problemen beschäftigt. Erst

1919 stellte eine britische Expedition bei einer Sonnenfinsternis in Westafrika fest, dass das Licht tatsächlich von der Sonne abgelenkt wird, wie es die Theorie vorhersagt. Dieser Beweis für die Theorie eines Deutschen durch englische Wissenschaftler wurde pompös als ein Akt der Versöhnung der einstigen Kriegsgegner gefeiert. Insofern lag eine besondere Ironie darin, dass man bei einer späteren Überprüfung der Fotos, die auf dieser Expedition gemacht worden waren, auf Fehler stieß, die genauso groß waren wie der Effekt, den man hatte messen wollen: Das Ergebnis war purer Zufall gewesen oder einer jener – in der Wissenschaft gar nicht so seltenen – Fälle, in denen man erkennt, was man erkennen will. In einer Reihe späterer Beobachtungen ist die Lichtablenkung dann jedoch exakt bestätigt worden.

Nach einer anderen Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie müsste die Zeit in der Nähe eines massiven Körpers wie der Erde langsamer verstreichen. Dies beruht auf einer bestimmten Beziehung zwischen der Energie des Lichtes und seiner Frequenz (das heißt der Anzahl von Lichtwellen pro Sekunde): Je größer die Energie, desto höher die Frequenz. Wenn sich das Licht im Gravitationsfeld der Erde aufwärts bewegt, verliert es an Energie, und damit nimmt auch seine Frequenz ab (das heißt, der Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wellenkämmen wird länger). Jemand, der aus großer Höhe auf die Erde hinabblickte, hätte den Eindruck, dass dort unten alle Ereignisse langsamer vonstatten gingen. Diese Vorhersage wurde 1962 überprüft, indem man zwei sehr präzise Uhren oben und unten an

einem Wasserturm anbrachte. Man stellte fest, dass die Uhr am Fuße des Turms in genauer Übereinstimmung mit der Relativitätstheorie langsamer ging. Die unterschiedliche Gangart von Uhren in verschiedenen Höhen über der Erde hat beträchtliche praktische Bedeutung gewonnen, seit es sehr genaue Navigationssysteme gibt, die von Satellitensignalen gesteuert werden. Blieben die Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie unberücksichtigt, würden sich bei den Positionsrechnungen Fehler von mehreren Kilometern ergeben!

Newton's Bewegungsgesetze machten der Vorstellung von einer absoluten Position im Raum ein Ende. Die Relativitätstheorie räumte mit der Idee der absoluten Zeit auf. Stellen Sie sich ein Zwillingspaar vor. Der eine Zwilling lebt auf einem Berggipfel, der andere auf Meereshöhe. Der Erste würde rascher altern als der Zweite. Wenn sie sich wieder trafen, wäre der eine älter als der andere. In diesem Fall wäre der Altersunterschied sehr gering, aber er könnte sehr viel größer sein, wenn einer der Zwillinge eine lange Reise in einem Raumschiff unternähme, das sich beinahe mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegte. Bei seiner Rückkehr wäre er sehr viel jünger als der auf der Erde gebliebene Zwillingsbruder. Dieser Effekt wird als Zwillingsparadoxon bezeichnet, doch er ist nur paradox, wenn man noch die Vorstellung von der absoluten Zeit im Hinterkopf hat. Eine einzige, absolute Zeit gibt es in der Relativitätstheorie nicht. Nach ihr hat jedes Individuum sein eigenes Zeitmaß, das davon abhängt, wo es sich befindet und wie es sich bewegt.

Vor 1915 stellte man sich Raum und Zeit als den festgelegten Rahmen vor, in dem die Ereignisse stattfinden können, der aber durch das, was in ihm geschieht, nicht beeinflusst wird. Das galt sogar noch für die Spezielle Relativitätstheorie. Körper bewegen sich, Kräfte ziehen an oder stoßen ab, doch Zeit und Raum dauern einfach fort, unberührt von dem, was geschieht. Man ging ganz selbstverständlich davon aus, dass Zeit und Raum ewigen Bestand hätten.

In der Allgemeinen Relativitätstheorie stellt sich die Situation jedoch grundlegend anders dar. Raum und Zeit sind nun dynamische Größen: Wenn ein Körper sich bewegt oder eine Kraft wirkt, so wird dadurch die Krümmung von Raum und Zeit beeinflusst – und umgekehrt beeinflusst die Struktur der Raumzeit die Bewegung von Körpern und die Wirkungsweise von Kräften. Raum und Zeit wirken nicht nur auf alles ein, was im Universum geschieht, sondern werden auch davon beeinflusst. So wie man ohne die Begriffe von Raum und Zeit nicht über Ereignisse im Universum sprechen kann, so ist es in der Allgemeinen Relativitätstheorie sinnlos, über Raum und Zeit zu sprechen, die außerhalb der Grenzen des Universums liegen.

Dieses neue Verständnis von Raum und Zeit veränderte in den folgenden Jahrzehnten unsere Auffassung vom Universum von Grund auf. An die Stelle der alten Vorstellung von einem im Wesentlichen unveränderlichen, ewig bestehenden Universum trat das Modell eines dynamischen, expandierenden Universums, das einen zeitlich fixierbaren Anfang zu haben scheint und

zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft enden könnte. Diese Umwälzung unserer Begriffe ist Thema des nächsten Kapitels. Und Jahre später war sie auch der Ausgangspunkt meiner Beiträge zur theoretischen Physik: Aus Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie folgt, so wiesen Roger Penrose und ich nach, dass das Universum einen Anfang hat – und möglicherweise auch ein Ende.

3

DAS EXPANDIERENDE UNIVERSUM

Blickt man in einer klaren, mondlosen Nacht zum Himmel auf, so sind wahrscheinlich die hellsten Objekte, die man wahrnimmt, die Planeten Venus, Mars, Jupiter und Saturn. Außerdem wird eine große Zahl von Sternen zu sehen sein, die unserer Sonne gleichen, aber sehr viel weiter entfernt sind. Einige dieser Sterne scheinen indessen während des Umlaufs der Erde um die Sonne ihre Stellung zueinander geringfügig zu verändern: Sie sind also keineswegs fixiert! Das liegt daran, dass sie uns vergleichsweise nahe sind. Während die Erde die Sonne umkreist, sehen wir sie aus verschiedenen Positionen gegen den Hintergrund fernerer Sterne. Dies ist ein günstiger Umstand, denn er ermöglicht es uns, unseren Abstand von diesen Sternen direkt zu messen: Je näher sie sind, desto mehr scheinen sie sich zu bewegen. Es stellte sich heraus, dass die Entfernung zum nächsten Stern, Proxima Centauri, ungefähr 40 Millionen Millionen (= 40 Billionen) Kilometer oder vier Lichtjahre beträgt (das Licht braucht ungefähr vier Jahre, um von dort zur Erde zu gelangen). Die meisten anderen Sterne,

die mit bloßem Auge zu erkennen sind, befinden sich nicht weiter als ein paar hundert Lichtjahre entfernt. Zum Vergleich: Der Abstand zu unserer Sonne beträgt nur acht Lichtminuten! Die sichtbaren Sterne scheinen über den ganzen Nachthimmel ausgebreitet zu sein, konzentrieren sich aber vor allem in einem Streifen, den wir Milchstraße nennen. Schon 1750 vertraten einige Astronomen die Auffassung, dass das Erscheinungsbild der Milchstraße erklärbar sei, wenn man von einer scheibenförmigen Anordnung der meisten sichtbaren Sterne ausgehe – ein Beispiel für das, was wir heute Spiralgalaxis nennen. Nur ein paar Jahrzehnte später stellte der Astronom Sir William Herschel diese Hypothese auf eine solide Basis, indem er in mühseliger Arbeit die Positionen einer ungeheuren Zahl von Sternen katalogisierte. Dennoch wurde diese Vorstellung erst Anfang unseres Jahrhunderts endgültig anerkannt.

Unser heutiges Bild vom Universum nahm erst 1924 Konturen an, als der amerikanische Astronom Edwin Hubble zeigte, dass es neben unserer eigenen Galaxie noch viele andere gibt, zwischen denen weite Strecken leeren Raums liegen. Um dies zu beweisen, musste er die Distanzen zu den anderen Galaxien bestimmen, die so weit entfernt sind, dass sie, anders als nahe gelegene Sterne, tatsächlich »fixiert« erscheinen. Deshalb war Hubble gezwungen, die Entfernung indirekt zu messen. Die scheinbare Helligkeit eines Sterns hängt von zwei Faktoren ab: Wie viel Licht er ausstrahlt (seiner Leuchtkraft) und wie weit er von uns entfernt ist. Die scheinbare Helligkeit und Entfernung naher Sterne

können wir messen, und aufgrund unserer Ergebnisse errechnen wir ihre Leuchtkraft. Wenn wir umgekehrt die Leuchtkraft der Sterne in anderen Galaxien kennen würden, könnten wir durch Messung ihrer scheinbaren Helligkeit ihre Entfernung ermitteln. Hubble stellte fest, dass bestimmte Sternarten alle die gleiche Leuchtkraft besitzen, wenn sie nahe genug sind, um Messungen vorzunehmen. Wenn wir also solche Sterne in einer anderen Galaxie entdecken, können wir bei ihnen die gleiche Leuchtkraft voraussetzen und von ihr ausgehend die Entfernung der Galaxie errechnen. Wenn dies bei mehreren Sternen in der Galaxie möglich ist und unsere Berechnungen immer die gleiche Entfernung ergeben, kann unsere Schätzung als recht verlässlich gelten.

Auf diese Weise ermittelte Hubble die Entfernung von neun verschiedenen Galaxien. Wir wissen heute, dass unsere eigene Galaxie nur eine von einigen hundert Milliarden ist, die man mit Hilfe moderner Teleskope erkennen kann, und jede dieser Galaxien umfasst einige hundert Milliarden Sterne. Abbildung II zeigt einen Spiralnebel, der etwa dem Anblick entsprechen dürfte, den unsere Milchstraße dem Bewohner einer anderen Galaxie böte. Unsere eigene Galaxie hat einen Durchmesser von ungefähr hunderttausend Lichtjahren und dreht sich langsam um sich selbst; die Sterne in ihren Spiralarmen benötigen für eine Umlaufbewegung des Mittelpunkts mehrere hundert Millionen Jahre. Unsere Sonne ist ein ganz gewöhnlicher gelber Stern durchschnittlicher Größe am inneren Rand einer der Spiralarme. Wir haben einen weiten Weg zurückgelegt seit den Zei-



Abbildung 11

ten des Aristoteles und Ptolemäus, als wir die Erde noch für den Mittelpunkt des Universums hielten!

Sterne sind so weit entfernt, dass sie uns nur noch als Lichtpunkte erscheinen. Wir können weder ihre Größe noch ihre Form erkennen. Wie sollen wir da zwischen verschiedenen Sternarten unterscheiden? Die allermeisten Sterne haben nur eine charakteristische Eigenschaft, die wir beobachten können – die Farbe ihres Lichtes. Newton hat entdeckt, dass sich das Sonnenlicht durch ein Glasstück mit zwei oder mehr zueinander geneigten Flächen – ein sogenanntes Prisma – in die Farben des Regenbogens (sein Spektrum) zerlegen lässt, aus denen es sich zusammensetzt. Wenn man ein Teleskop auf einen einzelnen Stern oder eine Galaxie einstellt, kann man in ähnlicher Weise das Lichtspektrum dieses Sterns

oder dieser Galaxie feststellen. Die Spektren von Sternen unterscheiden sich voneinander, aber die relative Helligkeit der verschiedenen Farben entspricht immer genau derjenigen, die man im Licht eines glühenden Objektes erwarten würde. (Das Licht eines glühenden, undurchsichtigen Objektes hat ein charakteristisches Spektrum, das nur von seiner Temperatur abhängt – ein thermisches Spektrum. Das heißt, wir können aus dem Lichtspektrum eines Sterns auf seine Temperatur schließen.) Ferner ist zu beobachten, dass einige sehr spezifische Farben in den Spektren von Sternen fehlen und dass diese fehlenden Farben von Stern zu Stern variieren können. Da wir wissen, dass jedes chemische Element ganz bestimmte Farben absorbiert, können wir durch Vergleich dieser Farben mit denen, die im Spektrum eines Sterns fehlen, genau bestimmen, welche Elemente in seiner Atmosphäre vorhanden sind.

Als die Astronomen in den 1920er Jahren anfingen, die Spektren von Sternen in anderen Galaxien zu untersuchen, machten sie eine höchst seltsame Entdeckung: Es zeigten sich dieselben typischen fehlenden Farben wie bei den Sternen in unserer eigenen Galaxie, aber sie waren alle um den gleichen relativen Betrag zum roten Ende des Spektrums hin verschoben. Um die Bedeutung dieser Beobachtung zu verstehen, müssen wir zunächst wissen, was es mit dem Doppler-Effekt auf sich hat. Wie erwähnt, besteht das Licht aus Schwingungen oder Wellen des elektromagnetischen Feldes. Die Wellenlänge (Abstand von Wellenkamm zu Wellenkamm) ist beim Licht außerordentlich klein – sie liegt

zwischen vier und sieben Zehnmillionstel Meter. Die unterschiedlichen Wellenlängen nimmt das menschliche Auge als verschiedene Farben wahr, wobei die längsten Wellenlängen am roten Ende des Spektrums und die kürzesten am blauen Ende auftreten. Stellen wir uns eine Lichtquelle vor – etwa einen Stern –, die sich in gleichbleibender Entfernung von uns befindet und Lichtwellen von gleichbleibender Wellenlänge aussendet. Natürlich wird dann die Länge der Wellen, die wir empfangen, gleich der Länge sein, mit der sie ausgestrahlt worden sind (das Gravitationsfeld der Galaxie ist nicht groß genug, um eine nennenswerte Wirkung auszuüben). Nehmen wir nun an, die Lichtquelle fange an, sich auf uns zuzubewegen. Wenn sie den nächsten Wellenkamm aussendet, ist sie uns bereits ein Stückchen nähergerückt, daher wird der Abstand zwischen den Wellenkämmen kleiner sein, als zu dem Zeitpunkt, da sich der Stern noch nicht bewegte. Das heißt, die Wellenlänge der Wellen, die wir empfangen, ist kürzer als zu dem Zeitpunkt, da der Stern noch unbewegt verharrte. Entsprechend wäre die Wellenlänge der Wellen geringer, wenn sich die Lichtquelle von uns fortbewegte. Im Falle des Lichtes bedeutet dies also, dass die Spektren von Sternen, die sich von uns fortbewegen, zum roten Ende hin verschoben (rotverschoben) sind und dass die Sterne, die sich auf uns zubewegen, blauverschobene Spektren aufweisen. Diese Beziehung zwischen Wellenlänge und Geschwindigkeit, die Doppler-Effekt genannt wird, ist eine alltägliche Erfahrung. Denken wir an ein Auto, das auf der Straße vorbeifährt:

Wenn es sich nähert, hört sich sein Motorengeräusch höher an (was einer kürzeren Wellenlänge bzw. einer höheren Frequenz der Schallwellen entspricht); wenn es dagegen vorbeifährt und sich entfernt, wird das Motorengeräusch tiefer. Licht- oder Radiowellen verhalten sich ähnlich. So benutzt beispielsweise die Polizei den Doppler-Effekt, um die Geschwindigkeit von Autos festzustellen: Sie misst die Frequenz von Radiowellen, die von den Fahrzeugen reflektiert werden.

Nachdem Hubble die Existenz anderer Galaxien nachgewiesen hatte, beschäftigte er sich jahrelang damit, ihre Entfernungen zu katalogisieren und ihre Spektren zu beobachten. Damals erwartete man allgemein, dass die Bewegungen der Galaxien vom Zufall bestimmt seien und man also auf etwa gleich viele blau- wie rotverschobene Spektren stoßen würde. Deshalb war die Überraschung groß, als man bei den meisten Galaxien eine Rotverschiebung feststellte. Sie bewegen sich fast alle von uns fort! Noch überraschender war eine Entdeckung, die Hubble 1929 veröffentlichte: Sogar das Ausmaß der Rotverschiebung ist nicht zufällig, sondern direkt proportional zur Entfernung der Galaxie von uns. Mit anderen Worten: Je weiter eine Galaxie entfernt ist, desto schneller bewegt sie sich von uns fort! Folglich kann das Universum nicht statisch sein, wie man vor Hubble allgemein glaubte, sondern muss sich ausdehnen: Der Abstand zwischen den verschiedenen Galaxien nimmt ständig zu.

Die Entdeckung, dass sich das Universum ausdehnt, war eine der großen geistigen Revolutionen des 20. Jahr-

hundreds. In der Rückschau kann man sich natürlich leicht fragen, warum niemand vorher darauf gekommen ist. Newton und anderen hätte doch klar sein müssen, dass sich ein statisches Universum schon bald unter dem Einfluss der Gravitation zusammenziehen würde. Doch man stelle sich stattdessen vor, das Universum expandiere. Verlief die Ausdehnung eher langsam, so würde die Schwerkraft die Expansion schließlich zum Stillstand bringen und zu einer Kontraktion führen. Läge die Expansionsrate hingegen über einem bestimmten kritischen Wert könnte die Gravitation die Bewegung nicht aufhalten und das Universum würde ewig mit der Expansion fortfahren. Der Vorgang hat eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Start einer Rakete, die von der Erdoberfläche abhebt. Ist ihre Geschwindigkeit zu niedrig, wird die Schwerkraft sie schließlich bremsen und auf die Erdoberfläche zurückfallen lassen. Wenn die Rakete dagegen eine bestimmte kritische Geschwindigkeit überschreitet (ungefähr 11 Kilometer pro Sekunde), reicht die Schwerkraft nicht mehr aus, die Rakete zurückzuhalten, sodass sie sich unentwegt von der Erde entfernt. Dieses expandierende Verhalten des Universums hätte aufgrund der Newtonschen Gravitationstheorie jederzeit im 19., im 18., ja sogar im ausgehenden 17. Jahrhundert vorhergesagt werden können. Doch der Glaube an ein statisches Universum war so tief verwurzelt, dass er sich bis ins 20. Jahrhundert hinein hielt. Selbst als Einstein 1915 die Allgemeine Relativitätstheorie formulierte, glaubte er noch so fest an die statische Beschaffenheit des Universums, dass er eine sogenannte

kosmologische Konstante in seine Gleichungen einführte, um diese Überzeugung zu retten. Er postulierte eine neue »Anti-Gravitationskraft«. Sie habe, anders als andere Kräfte, keinen bestimmten Ursprung, schrieb er, sondern sei in die Textur der Raumzeit eingewoben. Er behauptete, der Raumzeit wohne eine Expansionstendenz inne, die durch die Anziehungskräfte der Materie im Universum exakt aufgewogen werde. Das Ergebnis war ein statisches Universum. Zu jener Zeit schien es nur einen Einzigen zu geben, der willens war, die Allgemeine Relativitätstheorie beim Wort zu nehmen. Während Einstein und andere Physiker nach Wegen und Möglichkeiten suchten, sich vor ihrer Konsequenz zu drücken – vor der Erkenntnis also, dass das Universum nicht statisch ist –, machte es sich der russische Physiker und Mathematiker Alexander Friedmann zur Aufgabe, sie zu erklären.

Er ging von zwei sehr einfachen Annahmen über das Universum aus: Dass es stets gleich aussehe, in welche Richtung auch immer wir blicken, und dass diese Voraussetzung auch dann gälte, wenn wir das Universum von einem beliebigen anderen Punkt aus betrachteten. Allein anhand dieser beiden Vorstellungen bewies Friedmann, dass das Universum nicht statisch sein kann. Bereits 1922, ein paar Jahre vor Edwin Hubbles Entdeckung, sagte er exakt voraus, was dieser dann aufgrund von Beobachtungen fand!

In Wirklichkeit stimmt die Annahme, das Universum sehe in jeder Richtung gleich aus, natürlich nicht. Zum Beispiel bilden die anderen Sterne, wie wir gese-

hen haben, einen gut unterscheidbaren Lichtstreifen am Nachthimmel – unsere Milchstraße. Doch wenn wir fernere Galaxien beobachten, zeigen diese sich überall in mehr oder minder gleicher Anzahl. So wirkt das Universum im Großen und Ganzen nach jeder Richtung hin gleich, wenn man es, bezogen auf die Entfernung zwischen Galaxien, im großen Maßstab betrachtet und die Unterschiede außer Acht lässt, die sich in kleinerem Maßstab zeigen. Lange Zeit hielt man dies für eine hinreichende Rechtfertigung der Friedmannschen Annahmen und ließ sie als grobe Annäherung an das reale Universum gelten. Doch vor Kurzem hat ein glücklicher Zufall offenbart, dass sie in Wahrheit eine bemerkenswert genaue Beschreibung des Universums liefert.

1965 waren die beiden amerikanischen Physiker Arno Penzias und Robert Wilson in den Bell Telephone Laboratories (New Jersey) damit beschäftigt, einen sehr empfindlichen Mikrowellendetektor zu testen. (Mikrowellen gleichen Lichtwellen, nur haben sie eine niedrigere Frequenz, in der Größenordnung von zehn Milliarden Wellen pro Sekunde.) Eine lästige Störung widersetzte sich all ihren Bemühungen, sie zu beheben: Das Rauschen, das ihr Detektor empfing, war stärker, als es sein sollte, und es schien nicht aus einer bestimmten Richtung zu kommen. Ihre Suche nach der Fehlerquelle – zum Beispiel entdeckten sie Vogelexkreme auf dem Gerät – blieb ohne Ergebnis. Bald waren alle denkbaren Möglichkeiten ausgeschlossen. Wilson und Penzias wussten, dass jedes Geräusch aus der Atmosphäre stärker sein musste, wenn der Detektor nicht di-

rekt nach oben zeigte, weil Lichtstrahlen einen sehr viel längeren Weg durch die Atmosphäre zurücklegen, wenn sie aus einer Richtung nahe des Horizontes statt direkt von oben empfangen werden. Das Rauschen veränderte sich jedoch nicht, ganz gleich, in welche Richtung der Detektor zeigte. Es musste also von *außerhalb* der Atmosphäre kommen. Es war Tag und Nacht das ganze Jahr hindurch gleich, obwohl die Erde sich doch um ihre Achse dreht und die Sonne umkreist. Also musste die Strahlung von jenseits des Sonnensystems und sogar von jenseits unserer Galaxie kommen, denn sonst hätte sie sich entsprechend dem stetigen Richtungswechsel verändert, dem der Detektor durch die Erdbewegung unterworfen war. Wir wissen heute, dass die Strahlung den größten Teil des beobachtbaren Universums durchquert haben muss, bevor sie zu uns gelangt, und da sie in den verschiedensten Richtungen gleich zu sein scheint, muss das Universum folglich – zumindest in großem Maßstab – nach jeder Richtung hin gleich sein. Darüber hinaus wissen wir, dass sich dieses Rauschen bei einem Richtungswechsel nie um mehr als einen winzigen Bruchteil verändert. Penzias und Wilson stießen also unabsichtlich auf ein Phänomen, das die erste Friedmannsche Annahme exakt bestätigt. Doch da das Universum nicht in allen Richtungen dieselben Eigenschaften hat, sondern nur im Durchschnitt und auf großen Größenskalen, können auch die Mikrowellen, die uns aus all den verschiedenen Richtungen erreichen, nicht exakt dieselben Eigenschaften haben. Es muss je nach Beobachtungsrichtung kleine Unterschiede geben.

Diese wurden 1992 erstmals von dem Satelliten Cosmic Background Explorer (COBE) entdeckt: Abweichungen von der Größenordnung eines Hunderttausendstels. So klein diese Abweichungen auch sind, sie sind von großer Bedeutung, wie in Kapitel 8 erklärt wird.

Ungefähr zu der Zeit, als Penzias und Wilson das Rauschen in ihrem Detektor untersuchten, begannen sich auch Bob Dicke und Jim Peebles, zwei amerikanische Physiker an der nahe gelegenen Princeton University, für Mikrowellen zu interessieren. Ausgangspunkt ihrer Arbeit war eine Hypothese von George Gamow (einem ehemaligen Schüler Alexander Friedmanns), nach der das frühe Universum sehr dicht und sehr heiß – weiß glühend – gewesen sei. Dicke und Peebles meinten, wir müssten diese Glut des frühen Universums noch sehen können, weil das Licht sehr ferner Teile des frühen Universums uns erst jetzt erreiche. Infolge der Expansion des Universums sei dieses Licht aber so stark rotverschoben, dass es als Mikrowellenstrahlung bei uns eintreffe. Sie machten sich auf die Suche nach dieser Strahlung. Als Penzias und Wilson von dem Projekt ihrer beiden Kollegen erfuhren, fiel es ihnen wie Schuppen von den Augen: Die Strahlung *war* bereits entdeckt – und sie selbst waren die Entdecker! Dafür erhielten sie 1978 den Nobelpreis (was Dicke und Peebles gegenüber ein bisschen ungerecht erscheint, von Gamow ganz zu schweigen).

Alle diese Indizien sprechen dafür, dass das Universum aus jeder Blickrichtung, die wir wählen, gleich aussieht, und legen uns auf den ersten Blick nahe, dass wir

einen besonderen Standort im Universum innehaben. Vor allem könnte es so scheinen, als befänden wir uns im Mittelpunkt des Universums, da uns die Beobachtung zeigt, dass sich alle anderen Galaxien von uns fortbewegen. Es gibt jedoch noch eine andere Erklärung: Das Universum könnte auch von jeder anderen Galaxie aus in jeder Richtung gleich aussehen. Dies war, wie erwähnt, Friedmanns zweite Annahme. Wir haben keine wissenschaftlichen Beweise für oder gegen sie. Wir glauben einfach aus Gründen der Bescheidenheit an sie: Es wäre höchst erstaunlich, böte das Universum von anderen Punkten als der Erde aus betrachtet einen Anblick, der von dem sich uns offenbarenden Bild abwiche. In Friedmanns Modell bewegen sich alle Galaxien direkt voneinander fort. Die Situation entspricht weitgehend dem gleichmäßigen Aufblasen eines Luftballons, auf den man Punkte gemalt hat. Während der Ballon sich ausdehnt, wächst der Abstand zwischen jedem beliebigen Punktpaar, ohne dass man einen der Punkte zum Zentrum der Ausdehnung erklären könnte. Ferner bewegen sich die Punkte umso rascher auseinander, je weiter sie voneinander entfernt sind. Entsprechend ist auch in Friedmanns Modell die Geschwindigkeit, mit der zwei Galaxien auseinanderdriften, der Entfernung zwischen ihnen proportional. Deshalb sagt das Modell voraus, dass auch die Rotverschiebung einer Galaxie direkt proportional ihrer Entfernung von uns sein muss, was sich genau mit Hubbles Beobachtungen deckt. Obwohl dieses Modell erfolgreich war und Hubbles Beobachtungen vorhersagte, blieb Friedmanns Arbeit im

Westen weitgehend unbekannt, bis 1935, nach der Entdeckung der gleichförmigen Expansion des Universums durch Hubble, ähnliche Modelle von dem amerikanischen Physiker Howard Robertson und dem britischen Mathematiker Arthur Walker entwickelt wurden.

Es gibt drei verschiedene Modelle, die den beiden Grundannahmen Friedmanns entsprechen. Im ersten expandiert das Universum so langsam, dass die Massenanziehung zwischen den verschiedenen Galaxien die Expansion bremst und schließlich zum Stillstand bringt. Daraufhin bewegen sich die Galaxien aufeinander zu, und das Universum zieht sich zusammen. Abbildung 12 zeigt, wie sich der Abstand zwischen zwei benachbarten Galaxien in stetigem Zeitverlauf verändert. Er beginnt bei Null, wächst auf einen Maximalwert an und schrumpft wieder auf Null. Im zweiten Modell dehnt sich das Universum so rasch aus, dass die Schwerkraft dem Vorgang nicht Einhalt zu gebieten vermag, wenn sie ihn auch ein wenig verlangsamt. Abbildung 13 zeigt das Auseinanderdriften zweier benachbarter Galaxien nach diesem Modell. Es beginnt bei Null und wächst so lange, bis sich die Galaxien mit gleichmäßiger Geschwindigkeit auseinanderbewegen. Schließlich gibt es eine dritte Lösung, der zufolge das Universum gerade so rasch expandiert, dass die Umkehr der Bewegung in den Kollaps vermieden wird. Auch hier beginnt der Abstand, wie in Abbildung 14 dargestellt, bei Null und setzt sich endlos fort. Indessen wird die Geschwindigkeit, mit der die Galaxien auseinanderdriften, kleiner und kleiner, ohne allerdings jemals ganz auf Null zurückzugehen.

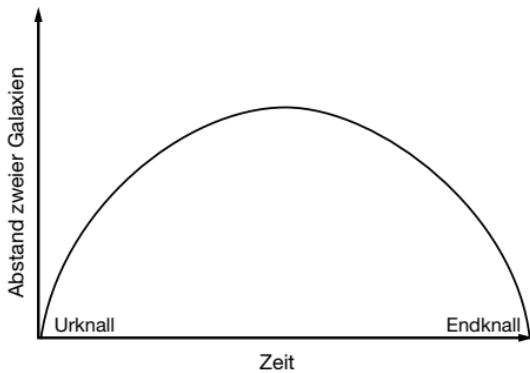


Abbildung 12

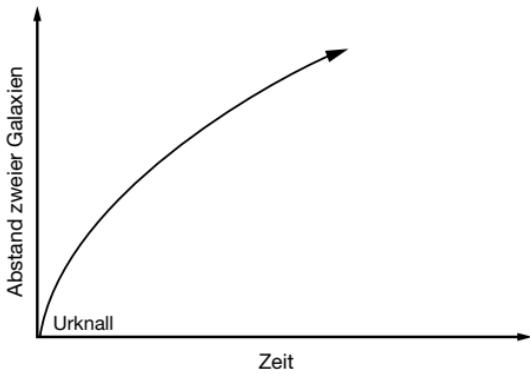


Abbildung 13

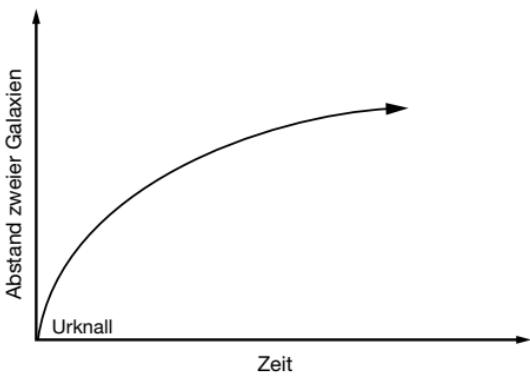


Abbildung 14

Bemerkenswert am ersten Friedmannschen Modell ist der Umstand, dass das Universum nicht unendlich im Raum ist, der Raum aber auch keine Grenze hat. Die Gravitation ist so stark, dass der Raum in sich selbst zurückgekrümmt wird, sodass er Ähnlichkeit mit der Erdoberfläche bekommt. Wenn man sich auf der Erdoberfläche ständig in eine bestimmte Richtung bewegt, kommt man schließlich wieder an seinen Ausgangspunkt zurück, ohne auf ein unüberwindliches Hindernis gestoßen oder über den Rand gefallen zu sein. Genauso ist nach dem ersten Friedmannschen Modell der Raum beschaffen, nur dass er drei Dimensionen hat, nicht zwei wie die Erdoberfläche. Auch die vierte Dimension, die Zeit, ist von endlicher Ausdehnung, aber sie ist wie eine Linie mit zwei Enden oder Grenzen, einem Anfang und einem Ende. Wenn man die Allgemeine Relativitätstheorie und die Unschärferelation der Quantenmechanik kombiniert, können Raum und Zeit, wie wir später sehen werden, endlich sein, ohne Ränder oder Grenzen zu haben.

Der Gedanke, man könnte das Universum umrunden und dort wieder ankommen, wo man seine Reise begonnen hat, ist gute Science-Fiction, aber ohne große praktische Bedeutung, weil sich nachweisen lässt, dass das Universum bereits wieder zur Große Null zusammengeschrumpft wäre, bevor man die Umrundung abgeschlossen hätte. Man müsste sich schneller als das Licht bewegen, wollte man wieder an seinem Ausgangspunkt sein, bevor das Universum aufgehört hätte zu existieren – und das ist nicht möglich.

Im ersten Friedmannschen Modell, das sich ausdehnt und wieder zusammenstürzt, krümmt sich der Raum in sich selbst zurück wie die Erdoberfläche. Deshalb ist er in seiner Ausdehnung begrenzt. Im zweiten Modell, das von einer endlosen Ausdehnung ausgeht, ist der Raum umgekehrt gekrümmt, wie die Oberfläche eines Sattels. In diesem Fall ist der Raum unendlich. Im dritten Friedmannschen Modell schließlich, das genau die kritische Expansionsgeschwindigkeit aufweist, ist der Raum flach (und damit ebenfalls unendlich).

Doch welches dieser Modelle beschreibt nun unser Universum? Wird es schließlich in seiner Expansion innerhalten und anfangen, sich zusammenzuziehen, oder wird es sich endlos ausdehnen? Um diese Frage zu beantworten, müssen wir die gegenwärtige Expansionsgeschwindigkeit des Universums und seine augenblickliche durchschnittliche Dichte kennen. Wenn die Dichte unter einem bestimmten kritischen Wert liegt, der durch die Expansionsgeschwindigkeit bestimmt wird, so wird die Gravitation zu schwach sein, um der Expansion Einhalt zu gebieten. Liegt die Dichte über dem kritischen Wert, wird die Gravitation die Ausdehnung irgendwann in der Zukunft zum Stillstand bringen und das Universum wieder in sich zusammenstürzen lassen.

Das gegenwärtige Expansionstempo können wir bestimmen, indem wir mithilfe des Doppler-Effekts die Geschwindigkeiten messen, mit denen sich andere Galaxien von uns fortbewegen. Das ließe sich mit großer Genauigkeit machen, doch leider sind die Entfernungen zu den anderen Galaxien nicht exakt bekannt, weil

wir sie nur indirekt ermitteln können. So wissen wir lediglich, dass sich das Universum pro Jahrmilliarde um fünf bis zehn Prozent ausdehnt. Doch unsere Unsicherheit über die gegenwärtige durchschnittliche Dichte des Universums ist sogar noch größer. Wenn wir die Masse aller Sterne summieren, die wir in unserer und anderen Galaxien sehen können, so kommen wir insgesamt auf weniger als ein Hundertstel des Betrages, der, selbst bei niedrigster Schätzung der Expansionsgeschwindigkeit, erforderlich wäre, um die Expansion des Universums aufzuhalten.³ Unsere und andere Galaxien müssen indessen große Mengen »dunkler Materie« enthalten, die wir nicht direkt sehen können, deren Vorhandensein wir jedoch aus der Beobachtung ableiten können, dass sie mit ihrer Gravitation die Bahnen der Sterne in den Galaxien beeinflussen. Ferner kommen die meisten Galaxien in Haufen vor, und wir können in ähnlicher Weise auf noch mehr dunkle Materie zwischen den Galaxien in diesen Haufen schließen, da sich auch eine entsprechende Wirkung auf die Bewegung der Galaxien beobachten lässt. Wenn wir diese ganze dunkle Materie der Gesamtmasse hinzurechnen, so kommen wir trotzdem nur auf ungefähr ein Zehntel der Menge, die erforderlich wäre, um die Ausdehnung zum Stillstand zu bringen. Wir können jedoch die Möglichkeit nicht ausschließen, dass es, nahezu gleichförmig über das Universum verteilt, noch irgendeine andere Materieform gibt, die wir bislang nicht entdeckt haben und die die durchschnittliche Dichte des Universums auf jenen Wert anheben würde, der die Expansionsbewegung

in ferner Zukunft innehalten ließe. Die gegenwärtige Beweislage spricht also dafür, dass sich das Universum endlos ausdehnen wird. Doch sicher ist nur, dass das Universum, auch wenn es wieder in sich zusammenstürzen sollte, dazu mindestens zehn Milliarden Jahre braucht, denn so lange hat seine Ausdehnung bisher gedauert. Das braucht uns nicht übermäßig zu beunruhigen: Zu diesem Zeitpunkt wird die Menschheit infolge des Erlöschens der Sonne längst ausgestorben sein, es sei denn, wir hätten inzwischen Kolonien außerhalb unseres Sonnensystems gegründet!

Allen Friedmannschen Lösungen ist eines gemeinsam: Der Abstand zwischen benachbarten Galaxien muss irgendwann in der Vergangenheit (vor zehn bis zwanzig Milliarden Jahren) Null gewesen sein. Zu diesem Zeitpunkt, den wir Urknall nennen, wären die Dichte des Universums und die Krümmung der Raumzeit unendlich gewesen. Da die Mathematik mit unendlichen Zahlen im Grunde nicht umgehen kann, bedeutet dies, dass die Allgemeine Relativitätstheorie (auf der die Friedmannschen Lösungen beruhen) einen Punkt im Universum voraussagt, an dem die Theorie selbst zusammenbricht. Dieser Punkt ist ein Beispiel für das, was Mathematiker eine Singularität nennen. Tatsächlich gehen alle unsere wissenschaftlichen Theorien von der Voraussetzung aus, dass die Raumzeit glatt und nahezu flach ist. Deshalb versagen die Theorien angesichts der Urknall-Singularität, wo die Krümmung der Raumzeit unendlich ist. Also könnte man sich, selbst wenn es Ereignisse vor dem Urknall gegeben hat, bei

der Bestimmung dessen, was hinterher geschehen ist, nicht auf sie beziehen, weil die Vorhersagefähigkeit am Urknall endet. Entsprechend können wir keine Aussagen über das machen, was vorher war, wenn wir, wie es der Fall ist, nur wissen, was seit dem Urknall geschehen ist. Soweit es uns betrifft, können Ereignisse vor dem Urknall keine Konsequenzen haben und sollten infolgedessen auch nicht zu Bestandteilen eines wissenschaftlichen Modells des Universums werden. Wir müssen sie deshalb aus dem Modell ausklammern und sagen, dass die Zeit mit dem Urknall begann.

Vielen Menschen gefällt die Vorstellung nicht, dass die Zeit einen Anfang hat, wahrscheinlich weil sie allzusehr nach göttlichem Eingriff schmeckt. (Dagegen hat sich die katholische Kirche das Urknallmodell zu eigen gemacht und 1951 offiziell erklärt, es stehe im Einklang mit der Bibel.) Deshalb wurden zahlreiche Versuche unternommen, die Urknalltheorie zu widerlegen. Breiteste Anerkennung fand die Stady-State-Theorie. Zwei aus dem von den Nationalsozialisten annexierten Österreich geflohene und ein britischer Wissenschaftler formulierten sie 1948: Hermann Bondi und Thomas Gold sowie Fred Hoyle, der während des Krieges mit ihnen an der Entwicklung des Radars gearbeitet hatte. Ihr Gedanke war, dass sich aus ständig neu entstehender Materie beim Auseinanderdriften der Galaxien ständig neue Galaxien in den Lücken zwischen ihnen bilden. Das Universum sähe demnach zu allen Zeiten und an allen Punkten des Raums in etwa gleich aus. Die Stady-State-Theorie verlangte eine Abwandlung der

Allgemeinen Relativitätstheorie, weil sonst die ständige Entstehung von Materie nicht möglich wäre, doch handelte es sich dabei um so geringe Mengen (ungefähr ein Teilchen pro Kubikkilometer und Jahr), dass sie nicht in Widerspruch zu den experimentellen Daten standen. Die Theorie erfüllte die Wissenschaftlichkeitskriterien, die ich im ersten Kapitel genannt habe: Sie war einfach und machte eindeutige Vorhersagen, die sich durch Beobachtung überprüfen ließen. Eine dieser Vorhersagen lautete, dass die Zahl der Galaxien oder ähnlicher Objekte in jedem gegebenen Raumvolumen zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort im Universum gleich sein müsse. Ende der 1950er und Anfang der 1960er Jahre führte in Cambridge eine Gruppe von Astronomen unter Leitung von Martin Ryle (der während des Krieges mit Bondi, Gold und Hoyle am Radar gearbeitet hatte) eine Untersuchung der Radioquellen im Weltraum durch. Die Cambridge-Gruppe zeigte, dass die meisten dieser Radioquellen außerhalb unserer Galaxie liegen müssen (tatsächlich ließen sich viele als andere Galaxien identifizieren) und dass es mehr schwache als starke Quellen gibt. Das Team deutete die schwachen Quellen als die weiter entfernten und die stärkeren als der Erde näher gelegenen Objekte. Danach schien, gemessen pro Volumeneinheit des Raumes, die Zahl der fernen Quellen zu überwiegen. Dieses Ergebnis ließ zwei Interpretationen zu: Entweder wir befinden uns im Zentrum einer großen Region des Universums, in der es weniger Quellen als anderswo gibt, oder die Radioquellen waren in der Vergangenheit – zu dem

Zeitpunkt, da die Wellen auf die lange Reise zu uns geschickt wurden – zahlreicher als heute. Beide Erklärungen widersprachen den Vorhersagen, die sich aus der Stady-State-Theorie ergaben. Schließlich bewies auch die Entdeckung der Mikrowellenstrahlung durch Penzias und Wilson im Jahre 1965, dass das Universum vor langer Zeit viel dichter gewesen sein muss. Deshalb musste man die Stady-State-Theorie aufgeben.

Einen weiteren Versuch, die Urknalltheorie und damit die Vorstellung von einem Anfang der Zeit zu widerlegen, unternahmen die beiden russischen Wissenschaftler Jewgenii Lifschitz und Isaak Chalatnikow im Jahre 1963. Sie betonten, dass der Urknall eine Besonderheit der Friedmannschen Modelle sei, die ja nur Annäherungen an das wirkliche Universum darstellten. Vielleicht, so argumentierten sie, enthielten von allen denkbaren Modellen, die dem wirklichen Universum in etwa entsprächen, nur die drei Friedmannschen eine Urknall-Singularität. In ihnen strebten alle Galaxien direkt voneinander fort, und so sei es nicht verwunderlich, dass sie sich nach den Friedmannschen Lösungen irgendwann in der Vergangenheit am selben Ort befunden hätten. Im wirklichen Universum jedoch würden sich nicht nur die Abstände der Galaxien voneinander ändern, sondern ein Teil der Bewegung verlief seitwärts. Deshalb müssten sie ursprünglich keineswegs alle am selben Ort gewesen sein; es wäre auch möglich, dass sie sich nur in großer Nähe zueinander befunden hätten. Vielleicht sei unser gegenwärtiges expandierendes Universum nicht aus einer Urknall-Singularität hervorgegangen, sondern aus

einer früheren Kontraktionsphase: Als das Universum in sich zusammengestürzt sei, wären nicht alle Partikel kollidiert, sondern hätten sich auch aneinander vorbei und dann voneinander fortbewegt. Dadurch sei die gegenwärtige Ausdehnung des Universums zustande gekommen. Wie könnte man da mit Sicherheit behaupten, das reale Universum habe mit einem Urknall begonnen? Lifschitz und Chalatnikow untersuchten Modelle des Universums, die annähernd den Friedmannschen entsprachen, aber zugleich den Unregelmäßigkeiten und zufälligen Geschwindigkeiten der Galaxien im realen Universum Rechnung trugen. Sie zeigten, dass solche Modelle mit einem Urknall beginnen könnten, auch wenn die Galaxien sich nicht immer direkt voneinander fortbewegen würden, behaupteten aber, dass dies nur in bestimmten Ausnahmemodellen möglich sei, in denen sich alle Galaxien genau auf die richtige Weise bewegten. Da es hingegen unendlich viel mehr den Friedmannschen Lösungen ähnelnde Modelle *ohne* Urknall zu geben scheine, müsse man zu dem Schluss gelangen, dass der Urknall pure Fiktion sei. Später erkannten die beiden Russen jedoch, dass es eine sehr viel allgemeinere Klasse von Modellen der Friedmannschen Art *mit* Singularitäten gibt, ohne dass sich die Galaxien in irgendeiner besonderen Weise bewegen müssten. Daraufhin zogen sie ihre These 1970 zurück.

Wertvoll ist Lifschitz' und Chalatnikows Arbeit, weil sie gezeigt hat, dass das Universum eine Singularität, einen Urknall gehabt haben *könnte*, wenn die Allgemeine Relativitätstheorie richtig ist. Doch die ent-

scheidende Frage war damit noch nicht gelöst: Sagt die Allgemeine Relativitätstheorie voraus, dass unser Universum einen Urknall, einen Anfang in der Zeit, gehabt haben muss? Die Antwort darauf lieferte ein ganz anderer, 1965 von dem britischen Mathematiker und Physiker Roger Penrose vorgeschlagener Ansatz. Anhand des Verhaltens der Lichtkegel in der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Tatsache, dass die Gravitation stets als Anziehungskraft wirkt, zeigte Penrose, dass ein Stern, der unter dem Einfluss der eigenen Schwerkraft in sich zusammenstürzt, in eine Region eingeschlossen ist, deren Oberfläche und damit zwangsläufig auch deren Volumen schließlich auf Null schrumpft. Die Materie des Sterns wird also auf ein Volumen von der Größe Null komprimiert, sodass die Dichte der Materie und die Krümmung der Raumzeit unendlich werden. Mit anderen Worten: Es liegt nach einem solchen Prozess in einer Region der Raumzeit eine Singularität vor. Sie wird als Schwarzes Loch bezeichnet.

Auf den ersten Blick schien Penroses Ergebnis nur für Sterne zu gelten und ohne Bedeutung für die Frage zu sein, ob es jemals eine Urknall-Singularität des gesamten Universums gegeben habe. Doch zu der Zeit, da Penrose sein Theorem entwickelte, stand ich kurz vor Abschluss meines Studiums und suchte verzweifelt nach einem Dissertationsthema. Zwei Jahre zuvor hatte man bei mir ALS, eine Erkrankung des motorischen Systems, festgestellt und mir zu verstehen gegeben, dass ich nur noch ein bis zwei Jahre zu leben hätte. Unter diesen Umständen schien es nicht viel Zweck zu haben,

meine Doktorarbeit zu schreiben – ich rechnete nicht damit, dass ich lange genug leben würde, um sie fertig zu stellen. Doch inzwischen waren die zwei Jahre verstrichen, und es ging mir besser als erwartet. Außerdem hatte ich mich mit einem hinreißenden Mädchen, Jane Wilde, verlobt. Aber um heiraten zu können, brauchte ich eine Anstellung, und um eine Anstellung zu bekommen, brauchte ich die Promotion.

1965 hatte ich von Penroses Theorem gehört, nach der jeder Körper, der einem Gravitationskollaps unterworfen ist, schließlich eine Singularität bilden müsse, und mir war rasch klar geworden, dass die Bedingungen, die diese These beschrieb, auch dann gelten mussten, wenn man die Richtung der Zeit umkehrt, sodass der Zusammensturz zu einer Expansion wird – vorausgesetzt, das Universum entspräche zum gegenwärtigen Zeitpunkt in seinem großräumigen Aufbau wenigstens grob einem der Friedmannschen Modelle. Penrose hatte gezeigt, dass jeder in sich zusammenstürzende Stern mit einer Singularität enden *muss*. Bei Umkehrung der Zeitrichtung ergab sich, dass jedes in Friedmannscher Weise expandierende Universum mit einer Singularität begonnen haben *muss*. Aus mathematischen Gründen erforderte Penroses Theorem ein Universum, das unendlich im Raum ist. Deshalb konnte ich es für meine Untersuchung verwenden und mit seiner Hilfe beweisen, dass es eine Singularität nur gegeben haben kann, wenn sich das Universum rasch genug ausdehnt, um einem abormaligen Zusammensturz zu entgehen (denn nur dieses Friedmannsche Modell war unendlich im Raum).

In den nächsten Jahren entwickelte ich neue mathematische Verfahren, um die Sätze, die zeigten, dass Singularitäten existieren müssen, von dieser und anderen technischen Einschränkungen zu befreien. Als Ergebnis dieser Arbeit erschien 1970 ein gemeinsamer Aufsatz von Penrose und mir, in dem wir zuletzt bewiesen, dass es eine Urknall-Singularität geben haben muss, vorausgesetzt, die Allgemeine Relativitätstheorie stimmt und das Universum enthält so viel Materie, wie wir beobachteten. Es gab viel Widerstand gegen unsere Arbeit, zum Teil von den Russen, die sich ihrem marxistisch geprägten wissenschaftlichen Determinismus verpflichtet fühlten, zum Teil von Leuten, welche die Vorstellung von Singularitäten überhaupt abstoßend fanden und durch sie die Schönheit der Einsteinschen Theorie beeinträchtigt sahen. Doch es lässt sich schlecht streiten mit einem mathematischen Theorem. So fand unsere Arbeit am Ende allgemeine Anerkennung, und heute gehen fast alle davon aus, dass das Universum mit einer Urknall-Singularität begonnen hat. Die Sache hat nur einen Haken: Inzwischen habe ich meine Meinung geändert und versuche jetzt, andere Physiker davon zu überzeugen, dass das Universum *nicht* aus einer Singularität entstanden ist. Wie wir noch sehen werden, können wir auf sie verzichten, wenn wir Quanteneffekte in unsere Überlegungen einbeziehen.

Wir haben in diesem Kapitel verfolgt, wie sich in kaum einem halben Jahrhundert unsere jahrtausendealte Auffassung vom Universum von Grund auf verändert hat. Hubbles Entdeckung, dass sich das Universum

ausdehnt, und die Erkenntnis, wie unbedeutend unser Planet in der unvorstellbaren Weite des Universums ist, waren nur der Anfang. Immer mehr experimentelle und theoretische Anhaltspunkte sprachen für die Richtigkeit dieser Annahme, bis Penrose und ich sie 1970 auf der Grundlage von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie bewiesen. Dieser Beweis machte deutlich, dass die Allgemeine Relativitätstheorie unvollständig ist: Sie kann uns nichts über den Anfang des Universums mitteilen, weil aus ihr folgt, dass alle physikalischen Theorien, einschließlich ihrer selbst, am Anfang des Universums versagen. Die Allgemeine Relativitätstheorie versteht sich als Teiltheorie. In Wahrheit zeigen die Singularitätstheoreme also, dass das Universum in einem sehr frühen Stadium so klein gewesen sein muss, dass man nicht umhinkann, die kleinräumigen Auswirkungen einzubeziehen, mit der sich die andere große Teiltheorie des 20. Jahrhunderts, die Quantenmechanik, befasst. Um unserem Ziel näherzukommen, das Universum zu verstehen, sahen wir uns somit Anfang der 1970er Jahre gezwungen, der Theorie des außerordentlich Großen den Rücken zu kehren und uns der Theorie des außerordentlich Kleinen zuzuwenden. Ich will diese Theorie, die Quantenmechanik, zunächst erläutern, bevor ich auf die Versuche zu sprechen komme, die beiden Teiltheorien zu einer einheitlichen Quantentheorie der Gravitation zu verbinden.

4

DIE UNSCHÄRFERELATION

Der Erfolg wissenschaftlicher Theorien, vor allem der Newtonschen Gravitationstheorie, verleitete den französischen Wissenschaftler Marquis de Laplace zu Beginn des 19. Jahrhunderts zu der Behauptung, das Universum sei vollständig deterministisch, und anhand einiger weniger wissenschaftlicher Gesetze müssten wir alles vorhersagen können, was im Universum geschehe, wenn uns sein Zustand in einem beliebigen Moment vollständig bekannt sei. Wenn wir beispielsweise Position und Geschwindigkeit der Sonne und der Planeten zu einem bestimmten Zeitpunkt wüssten, könnten wir mit Newtons Gesetzen den Zustand des Sonnensystems zu jedem anderen Zeitpunkt berechnen. In diesem Fall scheint der Determinismus auf der Hand zu liegen, doch Laplace gab sich damit nicht zufrieden und behauptete, auch alles andere, einschließlich des menschlichen Verhaltens, würde von entsprechenden Gesetzen bestimmt.

Der Grundsatz des wissenschaftlichen Determinismus rief viele Gegner auf den Plan, die ihn heftig atta-

ckierten, da sie meinten, er beschränke Gottes Freiheit, in die Welt einzugreifen. Dennoch bestimmte er das wissenschaftliche Denken bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts. Eines der ersten Anzeichen dafür, dass man diese Überzeugung würde aufgeben müssen, waren Berechnungen der englischen Wissenschaftler Lord Rayleigh und Sir James Jeans, die nahelegten, dass ein heißer Körper wie etwa ein Stern unendlich viel Energie abstrahle. Nach den damals für gültig gehaltenen Gesetzen hätte ein heißer Körper elektromagnetische Wellen (Radiowellen, sichtbares Licht oder Röntgenstrahlen) in gleichbleibendem Maße abgeben müssen, unabhängig von ihrer Frequenz. So sollte ein heißer Körper die gleiche Energiemenge in Wellen mit einer Frequenz von ein bis zwei Billionen pro Sekunde abstrahlen wie in Wellen mit einer Frequenz von zwei bis drei Billionen pro Sekunde. Da nun die Zahl der Wellen pro Sekunde unbegrenzt ist, würde dies bedeuten, dass die abgestrahlte Gesamtenergie unendlich wäre.

Um dieses offensichtlich lächerliche Resultat zu vermeiden, schlug Max Planck 1900 vor, dass Licht, Röntgenstrahlen und andere Wellen nicht in beliebig kleinen Portionen abgegeben werden könnten, sondern nur in bestimmten Paketen, »Quanten« genannt. Ferner besäße jedes Quant eine feste Menge an Energie, und zwar umso mehr, je höher die Frequenz der betreffenden Welle ist. Bei genügend hoher Frequenz könne somit die Aussendung eines einzigen Quants mehr Energie erfordern, als vorhanden wäre. Auf diese Weise verringere sich die Abstrahlung bei hohen Frequenzen, und das

Tempo, mit dem der Körper Energie verliere, sei somit endlich.

Die Quantenhypothese lieferte eine sehr gute Erklärung für die Strahlungsleistung heißer Körper, doch auf ihre Konsequenzen für den Determinismus wurde man erst 1926 aufmerksam, als ein anderer deutscher Physiker, Werner Heisenberg, seine berühmte Unschärferelation formulierte. Um die künftige Position und Geschwindigkeit eines Teilchens vorherzusagen, muss man seine gegenwärtige Position und Geschwindigkeit sehr genau messen können. Ein Verfahren bietet sich an: Man bestrahlt das Teilchen mit Licht; einige Lichtwellen werden von dem Teilchen gestreut, und daran kann man seine Position erkennen. Doch wird man auf diese Weise die Position des Teilchens nicht genauer als den Abstand zwischen den Kämmen der Lichtwellen bestimmen können. Deshalb muss man Licht mit möglichst kurzer Wellenlänge benutzen, um zu exakten Messergebnissen zu kommen. Nun ist es nach der Planckschen Quantenhypothese nicht möglich, eine beliebig kleine Lichtmenge zu benutzen; man muss mindestens mit einem Quant arbeiten. Dieses Quant wird auf das Teilchen einwirken und seine Geschwindigkeit in nicht vorhersagbarer Weise verändern. Ferner gilt: Je genauer man die Position misst, desto kürzer muss die Wellenlänge des Lichts sein, das man verwendet, und umso höher wird entsprechend auch die Energie eines einzelnen Quants. Damit verstärkt sich aber zugleich der Störeffekt, der die Geschwindigkeit des Teilchens beeinflusst. Mit anderen Worten: Je genauer man die

Position des Teilchens zu messen versucht, desto ungenauer lässt sich seine Geschwindigkeit messen, und umgekehrt. Heisenberg wies nach, dass die Ungewissheit hinsichtlich der Position des Teilchens mal der Ungewissheit hinsichtlich seiner Geschwindigkeit mal seiner Masse nie einen bestimmten Wert unterschreiten kann: die Plancksche Konstante. Dieser Grenzwert hängt nicht davon ab, wie man die Position oder Geschwindigkeit des Teilchens zu messen versucht, auch nicht von der Art des Teilchens: Die Heisenbergsche Unschärferelation ist eine fundamentale, unausweichliche Eigenschaft.

Die Unschärferelation hat weitreichende Folgen für unsere Sicht der Welt. Selbst heute, fünfzig Jahre nach ihrer Formulierung, haben viele Philosophen diese Konsequenzen noch nicht in ihrer vollen Bedeutung erfasst, und sie sind nach wie vor Gegenstand heftiger Kontroversen. Die Unschärferelation bereitete dem Laplaceschen Traum von einem absolut deterministischen Modell des Universums ein jähes Ende: Man kann künftige Ereignisse nicht exakt voraussagen, wenn man noch nicht einmal in der Lage ist, den gegenwärtigen Zustand des Universums genau zu messen! Nur für ein übernatürliches Wesen, das den gegenwärtigen Zustand des Universums beobachten kann, ohne auf ihn einzuwirken, könnten Naturgesetze erkennbar sein, die alle Ereignisse vollständig determinieren. Doch solche Modelle des Universums sind ohne großes Interesse für uns normale Sterbliche. Wir sollten uns lieber an jenes ökonomische Prinzip halten, das als Ockhams Rasier-

messer bezeichnet wird, und alle Elemente der Theorie herausschneiden, die sich nicht beobachten lassen. Dieser Ansatz veranlasste Heisenberg, Erwin Schrödinger und Paul Dirac in den 1920er Jahren dazu, die Mechanik zu revidieren, sodass eine neue Theorie entstand, die Quantenmechanik, die auf der Unschärferelation beruht. In dieser Theorie haben Teilchen nicht mehr getrennte, genau definierte Positionen und Geschwindigkeiten, die sich nicht beobachten lassen, sondern nehmen stattdessen einen Quantenzustand ein, der eine Kombination aus Position und Geschwindigkeit darstellt.

Grundsätzlich sagt die Quantenmechanik nicht ein bestimmtes Ergebnis für eine Beobachtung voraus, sondern eine Reihe verschiedener möglicher Resultate, und sie gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit jedes von ihnen eintreffen wird. Mit anderen Worten: Nähme man die gleiche Messung an einer großen Zahl ähnlicher Systeme mit gleichen Anfangsbedingungen vor, so erhielte man in einer bestimmten Zahl von Fällen das Ergebnis A, in einer anderen Zahl von Fällen das Ergebnis B und so fort. Man könnte annähernd die Häufigkeit des Ergebnisses A oder B vorhersagen, aber es wäre unmöglich, das spezifische Ergebnis einer einzelnen Messung zu prognostizieren. Die Quantenmechanik führt also zwangsläufig ein Element der Unvorhersagbarkeit oder Zufälligkeit in die Wissenschaft ein. Einstein wehrte sich heftig gegen diese Vorstellung, obwohl er wesentlich an ihrer Entwicklung beteiligt war – der Nobelpreis ist ihm für seinen Beitrag zur Quantentheo-

rie verliehen worden. Trotzdem wollte er nie wahrhaben, dass das Universum vom Zufall regiert wird. »Gott würfelt nicht« – mit diesem berühmt gewordenen Satz fasste er seine Empfindungen zusammen. Doch die meisten anderen Wissenschaftler waren bereit, die Quantenmechanik zu akzeptieren, weil sie vollkommen mit den experimentellen Daten übereinstimmte. Und sie hat sich so gut bewährt, dass sie fast der gesamten heutigen Wissenschaft und Technologie zugrunde liegt. Sie bestimmt das Verhalten von Transistoren und integrierten Schaltkreisen, die wichtige Bausteine elektronischer Geräte wie Fernseher und Computer sind, und sie bildet auch die Grundlage der modernen Chemie und Biologie. Die einzigen Gebiete der Physik, in die die Quantenmechanik noch nicht in geeigneter Weise eingegliedert werden konnte, sind die Gravitation und der großräumige Aufbau des Universums.

Obwohl das Licht aus Wellen besteht, erfahren wir aus Plancks Quantenhypothese, dass es sich in gewisser Hinsicht so verhält, als setze es sich aus Teilchen zusammen: Licht kann nur in Paketen, in Quanten ausgestrahlt und absorbiert werden. Entsprechend geht aus der Heisenbergschen Unschärferelation hervor, dass Teilchen sich in gewisser Hinsicht wie Wellen verhalten: Sie haben keine festlegbare Position, sondern sind mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung »verschmiert«. Die Theorie der Quantenmechanik beruht auf einer völlig neuen Mathematik, die nicht mehr die reale Welt als Teilchen- und Wellenphänomen beschreibt; nur unsere Beobachtungen der Welt lassen sich in dieser Form be-

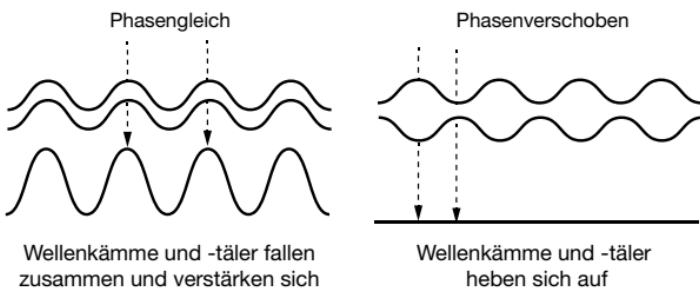


Abbildung 15

schreiben. Es gibt also in der Quantenmechanik eine Dualität von Wellen und Teilchen: Für manche Zwecke ist es nützlich, sich Teilchen als Wellen vorzustellen, für andere Zwecke ist es günstiger, Wellen als Teilchen anzusehen. Daraus folgt – eine wichtige Konsequenz –, dass wir etwas beobachten können, das als »Interferenz« zwischen zwei Gruppen von Wellen oder Teilchen bezeichnet wird: Die Kämme einer Wellengruppe können mit den Wellentälern einer anderen Gruppe zusammenfallen. Dann heben sich die beiden Wellengruppen auf, statt sich zu einer stärkeren Welle zu addieren, wie man es hätte erwarten können (Abb. 15). Ein vertrautes Beispiel für Interferenz im Falle von Licht sind die Farben, die man häufig auf Seifenblasen sehen kann. Sie werden durch die Lichtreflexion auf beiden Seiten der dünnen Wasserhaut verursacht, die die Blase bildet. Weißes Licht besteht aus Lichtwellen von verschiedenster Länge oder Farbe. Bei bestimmten Wellenlängen fallen die Kämme der Wellen, die auf der einen Seite des Seifenfilms reflektiert werden, mit den auf der anderen Seite reflektierten

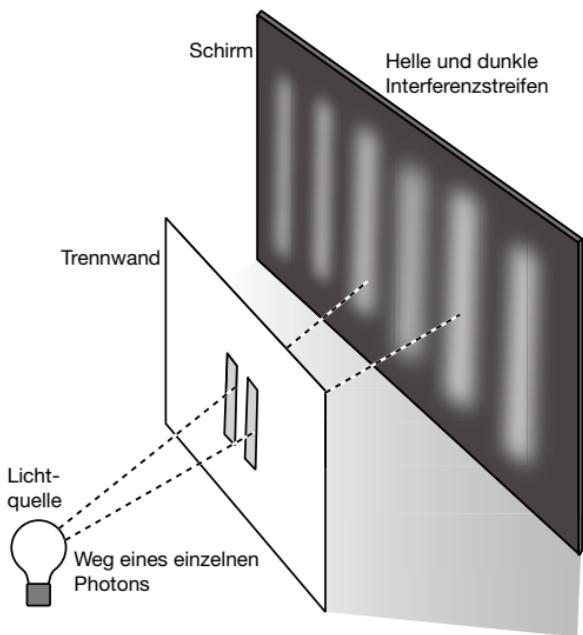


Abbildung 16

Wellentälern zusammen. Die diesen Farben entsprechenden Wellenlängen fehlen im reflektierten Licht, das aus diesem Grunde farbig erscheint.

Infolge der von der Quantenmechanik eingeführten Dualität kann Interferenz auch bei Teilchen auftreten. Ein berühmtes Beispiel ist das sogenannte »Doppelspalt-Experiment« (Abb. 16). Stellen wir uns eine Trennwand mit zwei schmalen, parallelen Schlitzten vor. Auf der einen Seite steht eine Lampe, die Licht von bestimmter Farbe (das heißt von einer bestimmten Wellenlänge) ausstrahlt. Der größte Teil des Lichtes trifft auf die Trennwand, doch eine geringe Menge dringt durch die Slitze. Hinter der Trennwand steht ein

Sichtschirm. Auf jeden Punkt des Sichtschirms treffen Wellen aus beiden Schlitzen. Doch muss das Licht im Allgemeinen auf dem Weg von der Quelle durch die Schlitze zum Sichtschirm unterschiedliche Entfernungsgesetze zurücklegen. Das heißt, die Wellen kommen nicht phasengleich beim Schirm an. An einigen Stellen heben sie sich auf, an anderen verstärken sie sich. Das Ergebnis ist ein charakteristisches Muster von hellen und dunklen Interferenzstreifen.

Bemerkenswert ist, dass man haargenau die gleichen Interferenzstreifen erhält, wenn man die Lichtquelle durch eine Teilchenquelle ersetzt, die etwa Elektronen mit einer bestimmten Geschwindigkeit aussendet (das heißt, die entsprechenden Wellen haben eine bestimmte Länge). Dies erscheint umso merkwürdiger, als man bei nur einem Schlitz ein ziemlich gleichförmiges Bild auf dem Schirm erhält. Man könnte deshalb annehmen, dass sich die Zahl der auf jeden Punkt des Sichtschirms treffenden Elektronen einfach erhöht, wenn man einen weiteren Schlitz öffnet; tatsächlich aber wird ihre Zahl durch die Interferenz an einigen Stellen verringert. Wenn die Elektronen einzeln hintereinander durch die Schlitze gesendet werden, sollte man erwarten, dass jedes durch den einen oder den anderen Schlitz dringe und sich so verhielte, als sei der passierte Schlitz der einzige vorhandene, was zu einer gleichförmigen Verteilung auf dem Schirm führen würde. Tatsächlich aber erscheinen die Interferenzstreifen auch, wenn die Elektronen einzeln ausgesendet werden. Jedes Elektron muss also seinen Weg durch *beide* Schlitze nehmen.

Dieses Phänomen, die Interferenz zwischen Teilchen, war entscheidend für unser Verständnis des Aufbaus von Atomen, der Grundeinheiten von Chemie und Biologie und der Bausteine, aus denen wir und alles um uns her bestehen. Zu Beginn dieses Jahrhunderts stellte man sich das Atom weitgehend wie das Sonnensystem vor: Elektronen (Teilchen mit negativer elektrischer Ladung) kreisen um einen positiv geladenen zentralen Kern. Die Anziehung zwischen positiver und negativer Ladung halte, so glaubte man, die Elektronen in genau der gleichen Weise auf ihren Umlaufbahnen, wie die Massenanziehung zwischen der Sonne und den Planeten diese auf ihren Bahnen halte. Doch stand man damit vor einem schwierigen Problem: Aus den Gesetzen der Mechanik und Elektrizität vor der Quantenmechanik folgte, dass die Elektronen Energie verlieren und sich deshalb spiralförmig nach innen bewegen würden, bis sie mit dem Kern kollidierten. Unter diesen Umständen würde das Atom und mit ihm alle Materie rasch in einen Zustand von sehr hoher Dichte zusammenstürzen. Eine Teillösung für dieses Problem fand 1913 der dänische Physiker Niels Bohr. Nach seiner Hypothese können die Elektronen nicht in beliebigen, sondern nur in bestimmten festgelegten Entfernung um den Kern kreisen. Nimmt man weiterhin an, dass sich nur ein oder zwei Elektronen in einem dieser Abstände um den Kern bewegen können, wäre das Problem des Kollapses gelöst, weil die Elektronen bei ihrer Spirale nur so weit nach innen gelangen könnten, bis sie die Umlaufbahnen mit den kleinsten Abständen und Energien gefüllt hätten.

Dieses Modell lieferte eine sehr gute Erklärung für das einfachste Atom, das Wasserstoffatom, bei dem nur ein Elektron den Kern umkreist. Doch es war nicht klar, wie man es auf kompliziertere Atome anwenden sollte. Darüber hinaus erschien der Gedanke, dass es nur eine begrenzte Zahl von zulässigen Umlaufbahnen gebe, höchst willkürlich. Die neue Theorie der Quantenmechanik löste dieses Problem. Sie erlaubt es, sich ein Elektron, das den Kern umkreist, als Welle vorzustellen, deren Wellenlänge von ihrer Geschwindigkeit abhängt. Bei bestimmten Bahnen entspricht deren Länge einer ganzen Zahl (im Gegensatz zu einem Bruchteil) von Wellenlängen des Elektrons. Bei diesen Bahnen befindet sich der Wellenkamm bei jeder Umrundung in der gleichen Position, sodass sich die Wellen addieren: Diese Umlaufbahnen entsprechen den erlaubten Bahnen von Bohr. Doch bei Bahnen, die nicht in ganzzahligem Verhältnis zu den Umlaufbahnen stehen, wird jeder Wellenkamm bei den Umlaufbewegungen der Elektronen schließlich durch ein Wellental aufgehoben: Diese sind nicht erlaubt.

Eine anschauliche Vorstellung von der Welle-Teilchen-Dualität liefert die sogenannte Pfadintegralmethode⁴ des amerikanischen Physikers Richard Feynman. Er geht von der Annahme aus, dass das Teilchen nicht eine einzige Geschichte oder einen einzigen Weg in der Raumzeit hinter sich hat, wie es die klassische Theorie vor der Quantenmechanik postulierte, sondern dass es sich auf jedem möglichen Weg von A nach B bewegt. Mit jedem Weg sind zwei Zahlen verknüpft: Die eine

bezeichnet die Größe der Welle, die andere steht für die Phase, das heißt, sie gibt darüber Auskunft, ob es sich um Wellenkamm oder -tal handelt. Die Wahrscheinlichkeit einer Bewegung von A nach B ergibt sich durch Addition der Wellen für alle Wege. Im Allgemeinen werden sich beim Vergleich einer Reihe von benachbarten Wegen die Phasen oder Positionen im Zyklus erheblich unterscheiden. Das heißt, dass die mit diesen Wegen verknüpften Wellen einander fast aufheben. Bei manchen Anordnungen benachbarter Wege indessen unterscheidet sich die Phase von Weg zu Weg nicht sonderlich. Die Wellen dieser Wege heben sich nicht auf. Sie entsprechen Bohrs erlaubten Bahnen.

Als diese Ideen in konkreter mathematischer Form vorlagen, war es relativ leicht, die erlaubten Bahnen in komplizierteren Atomen zu berechnen, ja sogar in Molekülen, die aus mehreren Atomen bestehen und durch Elektronen zusammengehalten werden, deren Bahnen um mehr als einen Kern laufen. Da die Struktur der Moleküle und ihre wechselseitigen Reaktionen allen chemischen und biologischen Prozessen zugrunde liegt, ermöglicht uns die Quantenmechanik im Prinzip, innerhalb der von der Unschärferelation gesetzten Grenzen nahezu alles vorherzusagen, was wir um uns herum wahrnehmen. (In der Praxis sind jedoch die Berechnungen bei Systemen, die mehr als einige wenige Elektronen enthalten, so kompliziert, dass wir sie nicht mehr durchführen können.)

Einstins Allgemeine Relativitätstheorie scheint den großräumigen Aufbau des Universums zu erfassen. Sie

ist eine sogenannte »klassische Theorie«, das heißt, sie berücksichtigt nicht die Unschärferelation der Quantenmechanik, wie sie es tun müsste, um nicht in Widerspruch zu anderen Theorien zu geraten. In Übereinstimmung mit den Beobachtungsdaten befindet sie sich nur deshalb, weil die Gravitationsfelder in unserem gewohnten Erfahrungsbereich alle sehr schwach sind. Doch die oben erörterten Singularitätstheoreme weisen darauf hin, dass zumindest in zwei Situationen, den Schwarzen Löchern und dem Urknall, das Gravitationsfeld sehr stark werden müsste. In solchen starken Feldern sollten die Auswirkungen der Quantenmechanik erheblich sein. Indem also die klassische Allgemeine Relativitätstheorie Punkte von unendlicher Dichte voraussagt, prognostiziert sie in gewissem Sinne zugleich ihr eigenes Versagen – genauso wie die klassische Mechanik ihr eigenes Versagen vorwegnahm, indem sie erklärte, dass die Atome zu unendlicher Dichte zusammenstürzen würden. Wir haben noch keine vollständige, widerspruchsfreie Theorie, welche die Allgemeine Relativität und die Quantenmechanik vereinigte, aber wir kennen eine Reihe von Eigenschaften, die sie aufweisen müsste. Welche Konsequenzen diese für Schwarze Löcher und den Urknall hätten, werde ich in späteren Kapiteln erörtern. Zunächst will ich mich mit den neueren Versuchen befassen, unser Verständnis der anderen Naturkräfte in einer einzigen, einheitlichen Quantentheorie zusammenzufassen.

5

ELEMENTARTEILCHEN UND NATURKRÄFTE

Aristoteles glaubte, alle Materie im Universum bestehe aus den vier Grundelementen Erde, Luft, Feuer und Wasser. Auf sie wirken in seinem Modell zwei Kräfte ein: Die Schwerkraft, die Neigung von Erde und Wasser zu fallen, und der Auftrieb, die Neigung von Luft und Feuer zu steigen. Diese Aufteilung dessen, was das Universum enthält, in Materie und Kräfte, ist noch heute gebräuchlich.

Aristoteles hielt die Materie für kontinuierlich, das heißt, er glaubte, man könnte ein Stück Materie unbegrenzt in immer kleinere und kleinere Teile zerlegen: Nie würde man auf ein Materiekorn stoßen, das sich nicht weiter zerteilen ließe. Einige Griechen jedoch, unter ihnen Demokrit, waren davon überzeugt, der Materie sei eine körnige Struktur eigen, und meinten, alles bestehe aus vielen verschiedenen Arten von »Atomen«. (Das Wort *atomos* bedeutet im Griechischen »unteilbar«.) Jahrhundertelang hielt der Streit über diese beiden Hypothesen an, ohne dass ihre Anhänger oder

Gegner wirkliche Beweise hätten beibringen können, doch 1803 wies der englische Chemiker und Physiker John Dalton darauf hin, chemische Verbindungen reagierten immer in bestimmten Verhältnissen miteinander, was sich dadurch erklären lasse, dass die Atome sich zu bestimmten Einheiten, den sogenannten Molekülen, zusammenschlössen. Der Streit zwischen den beiden Schulen wurde erst zu Beginn unseres Jahrhunderts zugunsten der Atomisten entschieden. Ein wichtiges Beweisstück lieferte Einstein. In einer Untersuchung aus dem Jahre 1905, wenige Wochen vor dem berühmten Artikel über die Spezielle Relativitätstheorie, zeigte er, dass die Erscheinung, die als Brownsche Bewegung bezeichnet wird – die unregelmäßige, zufällige Bewegung kleiner Staubteilchen, die in einer Flüssigkeit verteilt sind –, auf die Zusammenstöße von Flüssigkeitsatomen mit den Staubteilchen zurückzuführen sei.

Zu dieser Zeit hegte man bereits Zweifel an der Unteilbarkeit dieser Atome. Einige Jahre zuvor hatte der Physiker J.J. Thomson vom Trinity College in Cambridge ein Materieteilchen, Elektron genannt, nachgewiesen, dessen Masse weniger als ein Tausendstel des leichtesten Atoms betrug. Thomsons Apparatur hatte große Ähnlichkeit mit der Bildröhre eines modernen Fernsehgerätes: Ein rotglühender Metalldraht gab Elektronen ab, die infolge ihrer negativen elektrischen Ladung mithilfe eines elektrischen Feldes in Richtung auf einen phosphorbeschichteten Schirm beschleunigt werden konnten. Beim Auftreffen auf den Schirm entstanden Lichtblitze. Bald war man sich darüber klar, dass

diese Elektronen aus dem Innern der Atome kommen mussten, und 1911 wies der britische Physiker Ernest Rutherford endgültig nach, dass die Atome der Materie einen inneren Aufbau haben: Sie bestehen aus einem außerordentlich kleinen, positiv geladenen Kern, um den Elektronen kreisen. Zu diesem Ergebnis kam er, als er untersuchte, wie α -Teilchen – positiv geladene, von radioaktiven Atomen abgegebene Partikel – bei der Kollision mit Atomen abgelenkt werden.

Zunächst meinte man, der Atomkern bestehe aus Elektronen und positiv geladenen Teilchen verschiedener Zahl, die man »Protonen« nannte (nach griechisch *prōtoi*, »die Ersten«; hielt man sie doch für die elementaren Bausteine der Materie). Doch 1932 entdeckte ein Kollege Rutherfords in Cambridge, James Chadwick, dass der Kern noch ein anderes Teilchen enthält, das Neutron, das fast die gleiche Masse hat wie ein Proton, aber keine elektrische Ladung. Chadwick erhielt für seine Entdeckung den Nobelpreis und wurde zum »Master« des Gonville and Caius College in Cambridge gewählt (des Colleges, an dem ich heute als »Fellow« tätig bin). Später trat er wegen Meinungsverschiedenheiten mit seinen Kollegen zurück. Nachdem eine Gruppe junger Wissenschaftler aus dem Krieg zurückgekehrt war und viele der älteren Kollegen aus Ämtern abwählte, die diese schon seit Langem innehatten, herrschte erbitterter Streit am College. Das war vor meiner Zeit: Ich arbeite dort seit 1965. Da war dieser Streit schon beigelegt, aber ähnliche Reibereien zwangen den damaligen »Master«, Sir Nevill Mott, gleichfalls Nobelpreisträger, zum Rücktritt.

Noch vor wenigen Jahrzehnten glaubte man, Protonen und Neutronen seien »Elementarteilchen«, doch Ergebnisse von Experimenten, bei denen man Protonen mit hoher Geschwindigkeit auf andere Protonen oder auf Elektronen prallten ließ, wiesen darauf hin, dass sie tatsächlich aus noch kleineren Teilchen bestehen. Der Physiker Murray Gell-Mann vom California Institute of Technology erhielt 1969 den Nobelpreis für seine Arbeit über diese Teilchen, die er Quarks nannte. Der Name ist einem rätselhaften Satz aus einem Roman von James Joyce entlehnt: »Three quarks for Muster Mark.« Eigentlich soll das *a* in *Quark* ausgesprochen werden wie das o in *Bord*, doch meistens spricht man es so, dass es sich auf *Sarg* reimt.

Wir unterscheiden verschiedene Arten von Quarks: Es gibt sechs »Flavours«, die wir »up«, »down«, »strange«, »charm«, »bottom« und »top« nennen. Die ersten drei Flavours sind seit den 1960er Jahren bekannt, aber das Charm-Quark wurde erst 1974, das Bottom 1977 und das Top 1995 entdeckt. Jedes »Flavour« kommt in drei »Farben« vor: »rot«, »grün« und »blau«. (Es sei angemerkt, dass dies bloße Bezeichnungen sind: Die Größe von Quarks liegt weit unter der Wellenlänge des sichtbaren Lichts; sie haben deshalb keine Farbe im üblichen Sinne. Moderne Physiker scheinen einfach mehr Fantasie bei der Benennung neuer Teilchen und Erscheinungen zu entwickeln – sie beschränken sich dabei nicht mehr auf das Griechische!) Ein Proton oder Neutron besteht aus drei Quarks, eines von jeder Farbe. Ein Proton enthält zwei Up-Quarks und ein Down-

Quark. Ein Neutron enthält zwei Down-Quarks und ein Up-Quark. Wir können Teilchen herstellen, die aus den anderen Quarks bestehen (strange, charm, bottom und top), aber sie haben alle eine sehr viel größere Masse und zerfallen rasch in Protonen und Neutronen.

Wir wissen heute, dass weder die Atome noch die Protonen und Neutronen, die sie enthalten, unteilbar sind. Deshalb lautet die Frage: Welches sind die wirklichen Elementarteilchen, die Grundbausteine, aus denen alles besteht? Da die Wellenlänge des Lichts sehr viel größer als ein Atom ist, werden wir niemals einen »Blick« in der üblichen Weise auf die Bestandteile des Atoms werfen können. Dazu müssen wir etwas verwenden, das eine erheblich kürzere Wellenlänge hat. Wie wir im letzten Kapitel gesehen haben, sagt uns die Quantenmechanik, dass alle Teilchen Wellen sind; je höher die Energie eines Teilchens, desto geringer die Länge der entsprechenden Welle. Deshalb hängt die beste Antwort auf unsere Frage von der Teilchenenergie ab, die uns zur Verfügung steht, denn diese entscheidet darüber, wie klein die Abstände sind, die wir ins Auge fassen können. Gewöhnlich wird die Teilchenenergie in Elektronenvolt gemessen. (Wie beschrieben, benutzte Thomson in seinem Experiment ein elektrisches Feld zur Beschleunigung der Elektronen. Ein Elektronenvolt ist die Energie, die ein Elektron aus einem elektrischen Feld von einem Volt gewinnt.) Im 19. Jahrhundert, als man nur die geringe Teilchenenergie der wenigen Elektronenvolt zu nutzen verstand, die bei chemischen Reaktionen wie dem Verbrennen frei werden, hielt man

die Atome für die kleinsten Einheiten. In Rutherford's Experiment hatten die α -Teilchen Energien von einigen Millionen Elektronenvolt. In den letzten Jahrzehnten hat man Verfahren entwickelt, um Teilchen mittels elektromagnetischer Felder Energien von vielen Millionen, später sogar Milliarden Elektronenvolt zu geben. Und daher wissen wir, dass Teilchen, die noch wenigen Jahrzehnten als »elementar« galten, in Wirklichkeit aus noch kleineren Teilchen bestehen. Ob sich, wenn wir noch höhere Energien einsetzen, am Ende herausstellt, dass sie wiederum aus kleineren Teilchen aufgebaut sind? Das ist natürlich möglich, aber es sprechen einige theoretische Gründe für die Annahme, wir hätten die kleinsten Bausteine der Natur erkannt oder seien dieser Erkenntnis doch zumindest sehr nahe.

Wenn wir die im vorigen Kapitel erörterte Welle-Teilchen-Dualität zugrunde legen, so lässt sich alles im Universum, auch das Licht und die Schwerkraft, in Form von Teilchen beschreiben. Diese Teilchen haben eine Eigenschaft, die Spin genannt wird. Man kann bei diesem Wort an Teilchen denken, die sich wie kleine Kreisel um eine Achse drehen: Diese Drehung ist der Spin. Allerdings kann diese Vorstellung auch irreführend sein, weil der Quantenmechanik zufolge Teilchen keine genau definierte Achse haben. Tatsächlich teilt uns der Spin eines Teilchens mit, wie es aus verschiedenen Blickwinkeln aussieht. Ein Teilchen mit dem Spin 0 ist ein Punkt: Es sieht aus allen Richtungen gleich aus (Abb. 17-(A)). Ein Teilchen mit dem Spin 1 ist dagegen wie ein Pfeil: Es sieht aus verschiedenen Richtungen

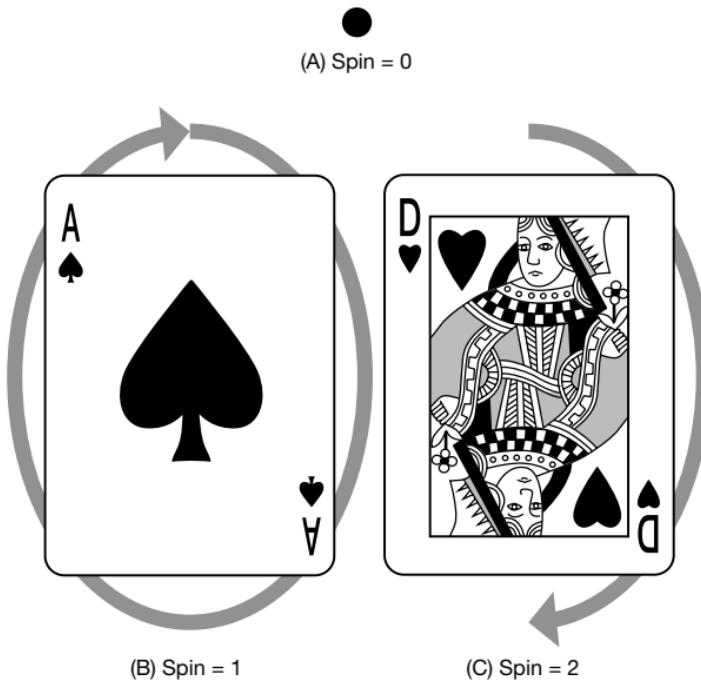


Abbildung 17

verschieden aus (Abb. 17-(B)). Nur bei einer vollständigen Umdrehung (360 Grad) sieht das Teilchen wieder gleich aus. Ein Teilchen mit dem Spin 2 ist wie ein Pfeil mit einer Spitze an jedem Ende (Abb. 17-(C)). Es sieht nach einer halben Umdrehung (180 Grad) wieder gleich aus. Entsprechend sehen Teilchen mit höherem Spin wieder gleich aus, wenn man Drehungen um kleinere Bruchteile einer vollständigen Umdrehung vollzieht. All das wäre ziemlich einfach, wäre da nicht der bemerkenswerte Umstand, dass es Teilchen gibt, die nach einer Umdrehung noch nicht wieder gleich aussehen: Es sind dazu vielmehr zwei vollständige Umdrehungen

erforderlich! Der Spin solcher Teilchen wird mit $\frac{1}{2}$ angegeben.

Alle bekannten Teilchen im Universum lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Teilchen mit einem Spin $\frac{1}{2}$, aus denen die Materie im Universum besteht, und Teilchen mit dem Spin 0, 1 und 2, die, wie wir sehen werden, für die Kräfte zwischen den Materienteilchen verantwortlich sind. Die Materienteilchen gehorchen dem sogenannten Paulischen Ausschließungsprinzip, das 1925 von dem österreichischen Physiker Wolfgang Pauli entdeckt wurde – 1945 erhielt er dafür den Nobelpreis. Pauli war das Musterexemplar eines theoretischen Physikers: Böse Zungen behaupteten, er brauche sich nur in einer Stadt aufzuhalten, und schon gingen alle dort durchgeführten Experimente schief! Nach dem Paulischen Ausschließungsprinzip können sich zwei gleiche Teilchen nicht im gleichen Zustand befinden, das heißt, sie können innerhalb der Grenzen, die die Unschärferelation steckt, nicht die gleiche Position und die gleiche Geschwindigkeit haben. Das Ausschließungsprinzip ist von entscheidender Bedeutung, weil es erklärt, warum Materienteilchen unter dem Einfluss der Kräfte, die von den Teilchen mit dem Spin 0, 1 und 2 hervorgerufen werden, nicht zu einem Zustand von sehr hoher Dichte zusammenstürzen. Wenn die Materienteilchen weitgehend gleiche Positionen haben, müssen sie sich mit verschiedenen Geschwindigkeiten bewegen, das heißt, sie werden nicht lange in der gleichen Position bleiben. Wäre die Welt ohne Ausschließungsprinzip entstanden, würden Quarks keine separaten, abgegrenzten Protonen

und Neutronen und diese wiederum zusammen mit Elektronen keine separaten, abgegrenzten Atome bilden. Alle Teilchen würden zu einer mehr oder minder gleichförmigen, dichten »Suppe« zusammenstürzen.

Zu einem eigentlichen Verständnis des Elektrons und anderer Teilchen mit dem Spin $\frac{1}{2}$ kam es erst 1928 dank einer Theorie von Paul Dirac, den man später auf den Lucasischen Lehrstuhl für Mathematik in Cambridge berief (eine Position, die einst Newton innehatte und die 1979 auch mir zugesprochen wurde). Diracs Theorie war die Erste, die sowohl mit der Quantenmechanik als auch mit der Speziellen Relativitätstheorie übereinstimmte. Sie erklärt mathematisch, warum das Elektron einen Spin von $\frac{1}{2}$ hat, das heißt, warum es nicht schon nach einer vollständigen Umdrehung, sondern erst nach zwei solchen Umdrehungen wieder gleich aussieht. Sie sagte auch voraus, dass das Elektron einen Partner haben müsse, ein Antielektron oder Positron. Die Entdeckung des Positrons im Jahre 1932 bestätigte Diracs Theorie, was dazu führte, dass ihm 1933 der Nobelpreis für Physik verliehen wurde. Wir wissen heute, dass zu jedem Teilchen ein Antiteilchen gehört. Bei ihrem Zusammentreffen vernichten sich beide gegenseitig. (Kräftetragende Teilchen sind ihre eigenen Antiteilchen.) Es könnte ganze Antiwelten und Antimenschen aus Antiteilchen geben. Doch sollten Sie Ihrem Anti-Selbst begegnen, geben Sie ihm nicht die Hand! Sie würden beide in einem großen Lichtblitz verschwinden. Die Frage, warum es um uns her so viel mehr Teilchen als Antiteilchen zu geben scheint, ist von großer Bedeu-

tung, und ich werde in diesem Kapitel noch einmal auf sie zurückkommen.

In der Quantenmechanik gehen wir davon aus, dass die Kräfte der Wechselwirkungen zwischen Materienteilchen alle von Teilchen mit ganzzahligem Spin übertragen werden – 0, 1 oder 2. Dabei wird ein kräftetragendes Teilchen von einem Materienteilchen, etwa einem Elektron oder Quark, emittiert. Der Rückstoß dieser Emission verändert die Geschwindigkeit des Materienteilchens. Das kräftetragende Teilchen kollidiert anschließend mit einem anderen Materienteilchen und wird absorbiert. Diese Kollision verändert die Geschwindigkeit dieses zweiten Teilchens, ganz so, als wirke eine Kraft zwischen den beiden Materienteilchen.

Eine wichtige Eigenschaft der kräftetragenden Teilchen ist die Tatsache, dass sie dem Ausschließungsprinzip nicht unterworfen sind. Sie können also in unbegrenzter Zahl ausgetauscht werden und eine starke Kraft hervorrufen. Doch wenn die kräftetragenden Teilchen über große Masse verfügen, ist es schwer, sie über größere Distanzen hervorzurufen und auszutauschen. Deshalb haben die Kräfte, die sie tragen, nur eine kurze Reichweite. Wenn die kräftetragenden Teilchen dagegen keine eigene Masse haben, wirken die Kräfte über große Distanz. Die kräftetragenden Teilchen, die zwischen Materienteilchen ausgetauscht werden, heißen »virtuelle« Teilchen, weil sie im Unterschied zu »wirklichen« Teilchen von einem Teilchendetektor nicht direkt entdeckt werden können. Doch wir wissen, dass es sie gibt, weil sie einen messbaren Effekt haben: Sie rufen

Kräfte zwischen Materiateilchen hervor. Auch Teilchen mit dem Spin 0, 1 oder 2 kommen unter bestimmten Umständen als reale Teilchen vor, die sich direkt entdecken lassen. Sie erscheinen uns in einer Gestalt, die ein klassischer Physiker als Welle bezeichnen würde – etwa als Licht- oder Gravitationswelle. Manchmal werden sie emittiert, wenn Materiateilchen durch den Austausch virtueller kräftetragender Teilchen aufeinander einwirken. (Beispielsweise ist die elektrische Abstoßungskraft zwischen zwei Elektronen auf den Austausch virtueller Photonen zurückzuführen, die sich direkt nicht beobachten lassen, doch wenn sich ein Elektron an einem anderen vorbeibewegt, können reale Photonen abgegeben werden, die wir als Lichtwellen wahrnehmen.)

Kräftetragende Teilchen lassen sich – je nach Stärke der Kraft und nach Art der Teilchen, mit denen sie in Wechselwirkung stehen – vier Kategorien zuordnen. Es sei betont, dass diese Unterteilung in vier Klassen künstlich ist: Sie dient als bequemes Hilfsmittel bei der Entwicklung von Teiltheorien, geht aber möglicherweise am Kern der Dinge vorbei. Letztlich hoffen die meisten Physiker auf eine einheitliche Theorie, die alle vier Kräfte als verschiedene Aspekte einer einzigen erklärt – viele Experten würden dies als das vorrangige Ziel der heutigen Physik bezeichnen. In letzter Zeit hat man mit Erfolg versucht, drei der vier Kräftekategorien zu vereinigen – auch davon wird in diesem Kapitel noch die Rede sein. Die Frage nach der Einbeziehung der verbleibenden Kategorie, der Schwerkraft, verschieben wir auf später.

Die erste Kategorie ist die Gravitation. Diese Kraft ist universell, das heißt, jedes Teilchen spürt die Schwerkraft, je nach seiner Masse oder Energie. Die Gravitation ist von allen vier Kräften bei Weitem die schwächste. Sie ist so schwach, dass wir sie gar nicht bemerken würden, hätte sie nicht zwei besondere Eigenschaften: Sie kann über große Distanzen wirken, und sie ist immer eine anziehende Kraft. So summieren sich die sehr schwachen Gravitationskräfte zwischen den einzelnen Teilchen zweier großer Körper wie der Erde und der Sonne zu einer beträchtlichen Größe. Die anderen drei Kräfte wirken entweder nur über kurze Entfernung, oder sie treten manchmal als Anziehungs- und manchmal als Abstoßungskräfte in Erscheinung, sodass sie sich größtenteils aufheben. Aus der Sicht der Quantenmechanik wird im Gravitationsfeld die Kraft zwischen zwei Materienteilchen von einem Teilchen mit dem Spin 2 übertragen, dem Graviton. Es besitzt keine eigene Masse; deshalb hat die Kraft, die es trägt, eine große Reichweite. Die Massenanziehung zwischen Sonne und Erde wird dem Austausch von Gravitonen zwischen den Teilchen zugeschrieben, aus denen die beiden Himmelskörper bestehen. Obwohl die ausgetauschten Teilchen »virtuell« sind, rufen sie doch zweifellos einen messbaren Effekt hervor: Sie lassen die Erde um die Sonne kreisen! Reale Gravitonen bilden das, was man in der klassischen Physik Gravitationswellen nennen würde. Sie sind sehr schwach und so schwer zu entdecken, dass man sie noch nie beobachtet hat.⁵

Die nächste Kategorie ist die elektromagnetische

Kraft, die auf elektrisch geladene Teilchen wie Elektronen und Quarks wirkt, nicht aber auf nichtgeladene Teilchen wie Gravitonen. Sie ist sehr viel stärker als die Gravitation: Die elektromagnetische Kraft ist ungefähr eine Million Millionen Millionen Millionen Millionen Millionen Millionen Millionen (eine 1 mit 42 Nullen) mal größer als die Gravitation. Es gibt jedoch zwei Arten von elektrischen Ladungen, positive und negative. Die Kraft zwischen zwei positiven Ladungen ist ebenso wie die zwischen zwei negativen abstoßend, während die Kraft zwischen einer positiven und einer negativen Ladung anziehend ist. Ein großer Körper wie die Erde oder die Sonne enthält eine annähernd gleiche Zahl von positiven und negativen Ladungen. Dadurch heben sich die Anziehungs- und Abstoßungs Kräfte zwischen den einzelnen Teilchen weitgehend auf, sodass die resultierende elektromagnetische Kraft sehr geringfügig ist. Doch in den kleinen Abständen der Atome und Moleküle spielen die elektromagnetischen Kräfte eine beherrschende Rolle. Die elektromagnetische Anziehung zwischen negativ geladenen Elektronen und positiv geladenen Protonen im Kern veranlasst die Elektronen, um das Atom zu kreisen, wie die Gravitation die Erde zu ihrer Umlaufbahn um die Sonne veranlasst. Man stellt sich vor, dass die elektromagnetische Anziehungskraft durch den Austausch einer großen Zahl von virtuellen, masselosen Teilchen mit dem Spin 1, Photonen genannt, verursacht wird. Wie gesagt, die ausgetauschten Photonen sind virtuelle Teilchen. Doch wenn ein Elektron von einer erlaubten Bahn auf eine andere, dem Kern näher ge-

legene überwechselt, wird Energie freigesetzt und ein reales Photon emittiert – das als sichtbares Licht vom menschlichen Auge wahrgenommen werden kann, wenn es die richtige Wellenlänge hat, oder von einem Photonendetektor wie etwa einem fotografischen Film. Entsprechend kann ein reales Photon, wenn es mit einem Atom kollidiert, ein Elektron dazu bringen, auf eine weiter außen gelegene Bahn zu springen. Dieser Vorgang verbraucht die Energie des Photons, und es wird absorbiert.

Die dritte Kategorie heißt schwache Kernkraft oder schwache Wechselwirkung, ist für die Radioaktivität verantwortlich und wirkt auf alle Materienteilchen mit dem Spin $\frac{1}{2}$ ein, nicht aber auf Teilchen mit dem Spin 0, 1 oder 2, wie zum Beispiel Photonen und Gravitonen. Eine klare Vorstellung von der schwachen Kraft können wir uns erst seit zwei Jahrzehnten machen. 1967 schlugen Abdus Salam vom Londoner Imperial College und Steven Weinberg aus Harvard unabhängig voneinander Theorien vor, die diese Wechselwirkung mit der elektromagnetischen Kraft vereinigen, so wie Maxwell hundert Jahre zuvor Elektrizität und Magnetismus vereinigt hatte. Nach der Hypothese der beiden Forscher gibt es neben dem Photon noch drei weitere Teilchen mit dem Spin 1, die gemeinsam als massive Vektorbosonen bezeichnet werden und Träger der schwachen Wechselwirkung sind. Es handelt sich um die Teilchen W^+ (»W plus« gesprochen), W^- (W minus) und Z^0 (Z Null), von denen jedes eine Masse von ungefähr 100 GeV (GeV steht für Gigaelektronenvolt, entsprechend 1 Milliarde

Elektronenvolt)) besitzt. Die Weinberg-Salam-Theorie zeigt eine Eigenschaft auf, die als »spontane Symmetriebrechung« bezeichnet wird. Danach erweisen sich einige Teilchen, die bei niedrigen Energien völlig verschieden erscheinen, alle als Vertreter des gleichen Teilchentyps; sie befinden sich dann lediglich in verschiedenen Zuständen. Bei hohen Energien dagegen verhalten sie sich gleich. Der Effekt ähnelt dem Verhalten einer Kugel auf einer Roulettescheibe. Bei hoher Energie (rascher Drehung der Scheibe) zeigt die Kugel immer nur ein Verhalten – sie rollt im Kreis. Doch wenn die Scheibe langsamer wird, nimmt die Energie der Kugel ab, bis sie schließlich in eine der 37 Fächer der Scheibe fällt. Mit anderen Worten: Bei niedriger Energie kann die Kugel in 37 verschiedenen Zuständen vorkommen. Wenn wir die Kugel aus irgendeinem Grund nur bei geringer Energie beobachten könnten, wären wir überzeugt, es gäbe 37 verschiedene Kugelarten.

Nach der Weinberg-Salam-Theorie würden sich die drei neuen Teilchen und das Photon bei erheblich höherer Energie als 100 GeV alle gleich verhalten. Doch bei den geringeren Teilchenenergien, die in normalen Situationen vorliegen, kommt es zum Bruch dieser Symmetrie zwischen den Teilchen. W^+ , W^- und Z^0 erhalten große Massen, sodass die Kräfte, deren Träger sie sind, nur noch über sehr kurze Abstände wirken. Als Salam und Weinberg ihre Theorie vorschlugen, fanden sie nur bei wenigen Kollegen Zustimmung, und die Teilchenbeschleuniger waren nicht leistungsfähig genug, um die Energie von 100 GeV zu produzieren, die zur Ent-

stehung realer W^+ -, W^- - oder Z^0 -Teilchen erforderlich wäre. Doch zeigten im Laufe der nächsten zehn Jahre die anderen Vorhersagen für niedrigere Energiezustände ein so hohes Maß an Übereinstimmung mit den Experimenten, dass Salam und Weinberg 1979 den Nobelpreis für Physik erhielten – zusammen mit Sheldon Glashow, ebenfalls von der Harvard University, der ähnliche vereinheitlichte Theorien der elektromagnetischen und der schwachen Kraft entwickelt hatte. Dem Nobelpreiskomitee blieb die Blamage erspart, einen Irrtum begangen zu haben, denn 1983 wurden am Europäischen Kernforschungszentrum CERN die drei mit Masse ausgestatteten Partner des Photons entdeckt, wobei sich ergab, dass ihre Massen und anderen Eigenschaften zutreffend vorausgesagt worden waren. Carlo Rubbia, der Leiter des Teams von einigen hundert Physikern, das die Entdeckung machte, erhielt 1984 den Nobelpreis, zusammen mit dem CERN-Ingenieur Simon van der Meer, der das verwendete Antimaterie-Speichersystem entwickelt hat. (Es ist heute sehr schwer, sich in der Experimentalphysik hervorzuheben, wenn man nicht bereits an der Spitze steht!)

Die vierte Kategorie ist die starke Kernkraft, welche die Quarks im Proton und Neutron sowie die Protonen und Neutronen im Atomkern zusammenhält. Man nimmt an, dass auch diese Kraft von einem Teilchen mit dem Spin 1 übertragen wird, dem Gluon, das nur mit sich selbst und den Quarks in Wechselwirkung steht. Die starke Kernkraft hat eine merkwürdige Eigenschaft namens »Confinement« (Einschluss): Immer bindet

sie Teilchen in Kombinationen zusammen, die keine »Farbe« haben. Es kann kein freies einzelnes Quark geben, weil es eine Farbe hätte (rot, grün oder blau). Ein rotes Quark muss deshalb mit einem grünen und einem blauen Quark durch einen »String«, ein »Band« von Gluonen verbunden werden (rot + grün + blau = weiß). Solch ein Triplet bildet ein Proton oder Neutron. Eine andere Möglichkeit ist ein Paar, das aus einem Quark und einem Antiquark besteht (rot + antirot oder grün + antigrün oder blau + antiblau = weiß). Aus solchen Kombinationen bestehen die Teilchen, die wir als »Mesonen« bezeichnen. Entsprechend verhindert das Confinement, dass ein freies einzelnes Gluon vorkommen kann, denn auch Gluonen haben eine Farbe. Statt dessen ist eine Ansammlung von Gluonen erforderlich, deren Farben sich zu weiß addieren. Sie bildet ein instabiles Teilchen, einen so genannten »Glueball«.

Die Tatsache, dass wir infolge des Confinement nicht in der Lage sind, ein isoliertes Quark oder Gluon zu beobachten, lässt die gesamte Vorstellung von Quarks und Gluonen etwas metaphysisch erscheinen. Doch es gibt noch eine weitere Eigenschaft der starken Kernkraft, die »asymptotische Freiheit«, durch die die Quarks und Gluonen zu wohldefinierten Begriffen werden. Bei normaler Energie ist die starke Kraft in der Tat stark und bindet die Quarks fest zusammen. Experimente mit großen Teilchenbeschleunigern deuten jedoch darauf hin, dass sie bei hohen Energien erheblich schwächer wird und dass sich die Quarks und Gluonen dann fast wie freie Teilchen verhalten. Abbildung 18, eine Foto-

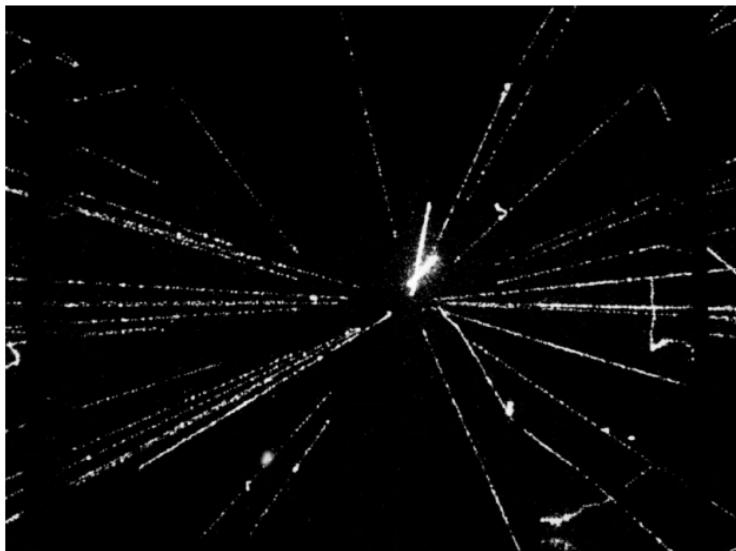


Abbildung 18: Ein Proton und ein Antiproton kollidieren mit großer Energie und erzeugen einige fast freie Quarks.

grafie, zeigt den Zusammenstoß eines Protons und Antiprotons bei hoher Energie. Dabei entstanden etliche freie Quarks, die jene auf dem Bild erkennbaren »Strahlen« verursachten.

Die gelungene Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen Kernkraft führte zu zahlreichen Versuchen, diese beiden Kräfte mit der starken Kernkraft zur sogenannten »Großen Vereinheitlichten Theorie« (abgekürzt GUT nach dem englischen Begriff »Grand Unified Theory«) zusammenzuschließen. Der Name ist leicht übertrieben: So großartig sind die resultierenden Theorien eigentlich nicht; sie sind auch nicht gänzlich vereinheitlicht, da sie die Gravitation nicht einbeziehen. Auch sind sie keine wirklich vollständigen

Theorien, weil sie eine Anzahl von Parametern enthalten, deren Werte nicht aus der Theorie vorhergesagt werden können, sondern so gewählt werden müssen, dass sie mit den experimentellen Daten verträglich sind. Trotzdem könnten sie ein Schritt auf dem Weg zu einer vollständigen, gänzlich vereinheitlichten Theorie sein. Der Grundgedanke der GUTs besagt: Die starke Kernkraft wird schwächer bei hoher Energie. Dagegen werden die elektromagnetische Kraft und die schwache Wechselwirkung, die nicht asymptotisch frei sind, bei hoher Energie stärker. Bei einer gewissen, sehr hohen Energie, Große Vereinheitlichungsenergie genannt, hätten diese drei Kräfte alle die gleiche Stärke und könnten sich als verschiedene Aspekte einer einzigen Kraft erweisen. Eine weitere Vorhersage der GUTs lautet, dass bei dieser Energie die verschiedenen Materienteilchen mit dem Spin $\frac{1}{2}$, wie zum Beispiel Quarks und Elektronen, im Wesentlichen dieselben wären, womit es zu einer weiteren Vereinheitlichung käme.

Man weiß nicht sehr genau, wie hoch die Große Vereinheitlichungsenergie sein muss, schätzt aber, dass sie mindestens tausend Millionen Millionen (eine Billiarde) GeV betragen müsste. Die gegenwärtige Generation von Teilchenbeschleunigern kann Teilchenkollisionen bei einer Energie von ungefähr 100 GeV herbeiführen. Im Planungsstadium befinden sich Anlagen, die ein paar Tausend GeV erreichen sollen,⁶ aber eine Maschine, die so leistungsfähig wäre, dass sie die Teilchen bis zur Großen Vereinheitlichungsenergie beschleunigen könnte, müsste die Größe unseres Sonnensystems haben – und

würde im gegenwärtigen wirtschaftlichen Klima wohl kaum finanziert werden. Deshalb kann man die Großen Vereinheitlichten Theorien nicht direkt im Labor überprüfen. Doch wie die einheitliche Theorie für die elektromagnetische Kraft und die schwache Wechselwirkung hat auch diese Theorie überprüfbare Konsequenzen bei schwachen Energieverhältnissen.

Die interessanteste dieser Konsequenzen ist die Vorphersage, dass Protonen, die einen großen Teil der gewöhnlichen Materie stellen, spontan in leichtere Teilchen wie etwa Antielektronen zerfallen können. Dies liegt möglicherweise daran, dass es bei der Großen Vereinheitlichungsenergie keinen wesentlichen Unterschied mehr zwischen einem Quark und einem Antielektron gibt. Unter normalen Umständen reicht die Energie der drei Quarks in einem Proton nicht aus, um sich in Antielektronen zu verwandeln, doch manchmal, wenn auch sehr selten, kann eines von ihnen genügend Energie für einen solchen Übergang gewinnen, weil sich die Energie der Quarks im Proton infolge der Unschärferelation nicht genau festlegen lässt. Dann wird das Proton zerfallen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Quark genügend Energie erwirbt, ist so gering, dass man wohl mindestens eine Million Millionen Millionen Millionen Millionen Jahre (eine 1 mit dreißig Nullen) darauf warten müsste – sehr viel länger als die Zeit, die seit dem Urknall verstrichen ist; das Universum besteht erst seit etwa zehn Milliarden Jahren (eine 1 mit zehn Nullen). So könnte man meinen, dass sich die Möglichkeit des spontanen Protonenzerfalls experimen-

tell nicht überprüfen lässt. Doch man kann die Chance, einen solchen Zerfall zu beobachten, durch Beobachtung von außerordentlich viel Materie erhöhen, die eine sehr große Zahl von Protonen und Neutronen enthält. (Würde man beispielsweise eine Protonenzahl, die einer 1 mit 31 Nullen entspricht, über einen Zeitraum von einem Jahr beobachten, dürfte man nach der einfachsten GUT erwarten, auf mehr als einen Protonenzerfall zu stoßen.)

Obwohl Experimente dieser Art durchgeführt wurden, hat man bisher noch keinen endgültigen Beweis für einen Protonen- oder Neutronenzerfall entdeckt. Ein Experiment, bei dem achttausend Tonnen Wasser verwendet wurden, führte man im Salzbergwerk Morton in Ohio durch (um andere – durch kosmische Strahlung verursachte – Ereignisse auszuschließen, die man mit Protonenzerfall hätte verwechseln können). Da man während des Experiments keinen spontanen Protonenzerfall registrierte, kann man sich ausrechnen, dass die wahrscheinliche Lebenszeit des Protons oder Neutrons mehr als zehn Millionen Millionen Millionen Millionen Millionen (eine 1 mit 31 Nullen) Jahre beträgt. Das übersteigt die Lebenszeit, die von der einfachsten Großen Vereinheitlichten Theorie vorhergesagt wird, doch es gibt kompliziertere Theorien, in denen die vorhergesagten Lebenszeiten länger sind. Um sie zu überprüfen, sind Experimente mit noch empfindlicheren Instrumenten und noch größeren Materiemengen erforderlich.

Wenn es auch sehr schwer ist, den spontanen Proto-

nenzerfall zu beobachten, verdanken wir möglicherweise unsere eigene Existenz dem umgekehrten Prozess, der Entstehung von Protonen oder einfacher: von Quarks in einer Anfangssituation, in der es nicht mehr Quarks als Antiquarks gab. So lässt sich nämlich der Ursprung des Universums am einfachsten vorstellen. Die Materie der Erde ist im Wesentlichen aus Protonen und Neutronen aufgebaut, die ihrerseits aus Quarks bestehen. Es gibt keine Antiprotonen oder Antineutronen, die aus Antiquarks bestünden, abgesehen von den wenigen, welche die Physiker in ihren großen Teilchenbeschleunigern herstellen. In der kosmischen Strahlung finden wir Anhaltspunkte dafür, dass dies auch für alle übrige Materie in unserer Galaxie gilt. Es gibt keine Antiprotonen oder Antineutronen, abgesehen von einer kleinen Zahl, die als Teilchen-Antiteilchen-Paare in hochenergetischen Zusammenstößen entstehen. Gäbe es große Antimateriebereiche in unserer Galaxie, so müssten wir beträchtliche Strahlenmengen von den Grenzen zwischen Materie- und Antimaterieregionen empfangen, wo viele Teilchen mit ihren Antiteilchen kollidieren, sich dabei vernichten und sehr energiereiche Strahlung abgeben würden.

Ob die Materie anderer Galaxien aus Protonen und Neutronen besteht oder aus Antiprotonen und Antineutronen, lässt sich nicht an direkten Anhaltspunkten ablesen, doch wir können mit Sicherheit sagen, dass sie aus der einen oder der anderen Sorte aufgebaut ist; es kann keine Mischung in einzelnen Galaxien geben, weil dann wiederum die intensive Strahlung der Vernichtungspro-

zesse zu beobachten wäre. Deshalb glauben wir, dass alle Galaxien aus Quarks und nicht aus Antiquarks bestehen. Es ist unwahrscheinlich, dass es in einigen Galaxien zugleich Materie und Antimaterie gibt.

Warum sollte es so viel mehr Quarks als Antiquarks geben? Warum gibt es nicht von jeder Sorte eine gleiche Anzahl? Jedenfalls können wir uns glücklich schätzen, dass die Zahlen ungleich sind, denn wären sie es nicht, hätten sich im frühen Universum fast alle Quarks und Antiquarks gegenseitig vernichtet und ein Universum voller Strahlung, aber fast ohne Materie zurückgelassen. Dann hätte es keine Galaxien, Sterne oder Planeten gegeben, auf denen sich menschliches Leben hätte entwickeln können. Zum Glück bieten die Großen Vereinheitlichten Theorien jetzt eine mögliche Erklärung dafür, dass das Universum heute wohl mehr Quarks als Antiquarks enthält, auch wenn die Anzahl beider ursprünglich einmal gleich gewesen ist. Wie wir gesehen haben, lassen die GUTs die Verwandlung von Quarks in Antielektronen bei hoher Energie zu. Sie gestatten auch die umgekehrten Prozesse – die Umwandlung von Antiquarks in Elektronen sowie von Elektronen und Antielektronen in Antiquarks und Quarks. Es gab eine Zeit im sehr frühen Universum, da war es so heiß, dass die Teilchenenergie ausreichte, um diese Transformationen stattfinden zu lassen. Doch warum sollen dabei mehr Quarks als Antiquarks herausgekommen sein? Der Grund liegt darin, dass die physikalischen Gesetze für Teilchen und Antiteilchen nicht in allen Punkten gleich sind.

Bis 1956 meinte man, die physikalischen Gesetze würden drei verschiedenen Symmetrien – C, P und T genannt – gehorchen. Symmetrie C besagt, dass die Gesetze für Teilchen und Antiteilchen gleich seien; nach Symmetrie P sind die Gesetze für jede Situation und ihr Spiegelbild gleich (das Spiegelbild eines Teilchens, das sich rechtsherum dreht, ist eines, das sich linksherum dreht). Symmetrie T besagt, dass das System in einen Zustand zurückkehrt, den es zu einem früheren Zeitpunkt eingenommen hat, wenn man die Bewegungsrichtung aller Teilchen und Antiteilchen umkehrt; mit anderen Worten: Die Gesetze sind für beide Richtungen der Zeit gleich.

1956 kamen die beiden amerikanischen Physiker Tsung-Dao Lee und Chen Ning Yang zu dem Schluss, dass die schwache Wechselwirkung der Symmetrie P nicht gehorcht. Danach würde die schwache Kraft für unterschiedliche Entwicklungen im Universum und im Spiegelbild des Universums sorgen. Im gleichen Jahr bewies ihre Kollegin Chien-Shiung Wu die Richtigkeit ihrer Vorhersage. Sie reihte die Kerne radioaktiver Atome in einem magnetischen Feld auf, so dass sie sich alle in gleicher Richtung drehten, und zeigte, dass die Elektronen häufiger in die eine als in die andere Richtung abgegeben wurden. Im folgenden Jahr erhielten Lee und Yang für ihre Idee den Nobelpreis. Es stellte sich außerdem heraus, dass die schwache Kraft auch der Symmetrie C nicht gehorcht, das heißt, unter ihrem Einfluss verhielte sich ein Universum aus Antiteilchen anders als unser Universum. Trotzdem schien es, als

folgte die schwache Kraft der kombinierten Symmetrie CP. Mit anderen Worten: Das Universum würde sich genauso entwickeln wie sein Spiegelbild, wenn zusätzlich jedes Teilchen mit seinem Antiteilchen ausgetauscht würde! Doch 1964 entdeckten die Amerikaner J. W. Cronin und Val Fitch, dass auch die Symmetrie CP beim Zerfall bestimmter Teilchen, der sogenannten K-Mesonen, nicht gilt. Erst 1980 erhielten Cronin und Fitch den Nobelpreis für diese Entdeckung. (Viele Preise sind für den Nachweis verliehen worden, dass das Universum nicht so einfach ist, wie wir es uns einst gedacht haben!)

Nach einem mathematischen Theorem muss jede Theorie, die der Quantenmechanik und der Relativität gehorcht, immer auch der kombinierten Symmetrie CPT gehorchen. Das Verhalten des Universums bliebe also gleich, wenn man die Teilchen durch Antiteilchen ersetzte, das Spiegelbild nähme und überdies die Zeitrichtung umkehrte. Cronin und Fitch haben aber gezeigt, dass sich das Universum *nicht* gleich verhält, wenn man Teilchen durch Antiteilchen ersetzt und das Spiegelbild nimmt, die Zeitrichtung hingegen beibehält. Die physikalischen Gesetze müssen sich also verändern, wenn man die Zeitrichtung umkehrt – sie gehorchen der Symmetrie T nicht.

Mit Sicherheit hat das frühe Universum nicht der Symmetrie T gehorcht: Mit fortschreitender Zeit expandiert das Universum – lief die Zeit rückwärts, zöge sich das Universum zusammen. Und aus der Tat-sache, dass es Kräfte gibt, die nicht der Symmetrie T

gehorchen, folgt, dass diese Kräfte bei Ausdehnung des Universums mehr Antielektronen veranlassen könnten, sich in Quarks zu verwandeln, als Elektronen, sich in Antiquarks zu verwandeln. Mit der Ausdehnung und Abkühlung des Universums hätten sich die Antiquarks und Quarks gegenseitig vernichtet. Aber da es mehr Quarks als Antiquarks gab, blieb ein kleiner Überschuss von Quarks erhalten. Aus ihnen besteht die Materie, die wir heute sehen, und aus ihnen bestehen wir selbst. So lässt sich unsere eigene Existenz als eine Bestätigung der Großen Vereinheitlichten Theorien verstehen, wenn auch nur in qualitativer Form. Infolge der Ungewissheiten kann man weder die Zahl der übrig gebliebenen Quarks angeben noch feststellen, ob überhaupt Quarks oder Antiquarks übrig geblieben sind. (Wäre es ein Überschuss an Antiquarks gewesen, hätten wir allerdings die Antiquarks einfach als Quarks bezeichnet und die Quarks als Antiquarks.)

Die Großen Vereinheitlichten Theorien beziehen nicht die Gravitation ein. Das fällt auch nicht so schwer ins Gewicht, weil sie eine so schwache Kraft ist, dass ihre Wirkung gewöhnlich vernachlässigt werden kann, wenn es um Elementarteilchen oder Atome geht. Da sie aber sowohl über große Abstände als auch stetig anziehend wirkt, summieren sich ihre Effekte. Bei einer hinreichend großen Zahl von Materieteilchen können deshalb die Gravitationskräfte die Oberhand über alle anderen Kräfte gewinnen. Aus diesem Grund bestimmt die Gravitation die Entwicklung des Universums. Selbst bei Objekten von der Größe eines Sterns können die

Anziehungskräfte der Gravitation alle anderen Kräfte überwiegen und seinen Zusammensturz herbeiführen. Meine Arbeit in den 1970er Jahren konzentrierte sich auf die Schwarzen Löcher, die sich aus solchen zusammenstürzenden Sternen ergeben können, und auf die starken Gravitationsfelder, von denen sie umgeben sind. Diese Arbeit lieferte erste Hinweise auf Beziehungen zwischen Quantenmechanik und Allgemeiner Relativitätstheorie – eine Ahnung von der Gestalt, die eine künftige Quantentheorie der Gravitation annehmen könnte.

6

SCHWARZE LÖCHER

Die Bezeichnung »Schwarzes Loch« ist sehr jungen Datums. Der amerikanische Wissenschaftler John Wheeler prägte sie 1969, um einen anschaulichen Begriff von einer Idee zu liefern, die mindestens zweihundert Jahre zurückreicht, in eine Zeit, als es zwei Theorien über das Licht gab: Zum einen, dass es aus Wellen, zum anderen, dass es, wie Newton sagte, aus Teilchen bestehe. Wir wissen heute, dass beide Theorien richtig sind. Nach der Welle-Teilchen-Dualität der Quantenmechanik kann man das Licht sowohl als Welle wie auch als Teilchen ansehen. Ging man vom Wellencharakter des Lichtes aus, blieb unklar, wie es auf die Schwerkraft reagiert. Doch wenn das Licht aus Teilchen besteht, dann konnte man erwarten, dass es von der Schwerkraft in der gleichen Weise beeinflusst wird wie Kanonenkugeln, Raketen und Planeten. Zunächst glaubte man, die Lichtteilchen würden sich unendlich schnell fortbewegen; deshalb könne die Schwerkraft sie nicht abbremsen. Doch aus der Entdeckung der endlichen Geschwindigkeit des Lichtes durch Rømer folgte,

dass die Schwerkraft eine ganz erhebliche Wirkung haben könnte.

Von dieser Überlegung ausgehend, kam der Cambridge-Gelehrte John Michell in einem 1783 in den *Philosophical Transactions* der Londoner Royal Society veröffentlichten Artikel zu dem Ergebnis, ein Stern von hinreichender Masse und Dichte müsse ein so starkes Gravitationsfeld haben, dass ihm das Licht nicht entkommen könne: Alles von der Oberfläche des Sterns ausgesendete Licht würde von den Gravitationskräften des Sterns wieder zurückgezogen werden, bevor es noch sehr weit gelangt wäre. Michell vermutete, dass es eine große Zahl solcher Sterne gäbe. Obwohl wir sie nicht sehen könnten, weil uns ihr Licht nicht erreiche, würden wir doch ihre Massenzugung spüren. Solche Objekte bezeichnen wir heute als »Schwarze Löcher«, denn genau das sind sie: schwarze Leeren im Weltraum. Eine ähnliche These brachte wenige Jahre später der französische Naturwissenschaftler Marquis de Laplace vor, offenbar ohne von Michells Aufsatz zu wissen. Interessanterweise veröffentlichte Laplace sie nur in der ersten und zweiten Ausgabe seines Buches »Darstellung des Weltsystems«, während sie in späteren Auflagen fehlt. Vielleicht war er zu dem Schluss gekommen, dass es sich um eine närrische Idee handelte. (Außerdem büßte die Teilchentheorie des Lichts im 19. Jahrhundert ihr früheres Ansehen ein. Es schien, als könnte man alles mit der Wellentheorie erklären, und nach der Wellentheorie war es fraglich, ob die Schwerkraft das Licht überhaupt beeinflusse.)

Im Grunde genommen ist es gar nicht zulässig, das Licht wie Kanonenkugeln in Newtons Gravitationstheorie zu behandeln, weil die Lichtgeschwindigkeit einen festen Wert hat. (Wird eine Kanonenkugel von der Erde aus nach oben abgefeuert, so verlangsamt sie sich infolge der Schwerkraft, hält schließlich inne und fällt zurück; ein Photon dagegen muss seinen Weg nach oben mit gleichbleibender Geschwindigkeit fortsetzen. Wie soll da Newtons Schwerkraft auf das Licht einwirken?) Eine schlüssige Theorie über die Wirkung der Gravitation auf das Licht liegt erst seit 1915 vor: Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie. Und es dauerte lange, bis man ihre Bedeutung für Sterne mit großer Masse begriff.

Um die Entstehung eines Schwarzen Loches nachvollziehen zu können, brauchen wir zunächst eine Vorstellung vom Lebenszyklus der Sterne. Ein Stern entsteht, wenn eine große Menge Gas (meist Wasserstoff) infolge der Gravitation in sich selbst zusammenzurüttzen beginnt. Während dieser Kontraktion kommt es immer häufiger und mit immer höheren Geschwindigkeiten zu Zusammenstößen zwischen den Gasatomen – das Gas erwärmt sich. Schließlich ist das Gas so heiß, dass die kollidierenden Wasserstoffatome nicht mehr voneinander abprallen, sondern miteinander verschmelzen und Helium bilden. Die Wärme, die bei dieser Reaktion – einer Art kontrollierter Wasserstoffbombe-explosion – frei wird, bringt den Stern zum Leuchten. Die erhöhte Temperatur verstärkt aber auch den Druck des Gases, bis er ebenso groß ist wie die Gravitation.

Daraufhin zieht sich das Gas nicht mehr zusammen. Es besteht eine gewisse Ähnlichkeit mit einem Luftballon, bei dem sich der Luftdruck im Innern, der bestrebt ist, den Ballon auszudehnen, und die Spannung des Gummis, die bestrebt ist, den Ballon zusammenzuziehen, im Gleichgewicht befinden. Sterne bleiben in diesem Zustand – der Balance zwischen der Schwerkraft und der bei den Kernreaktionen frei werdenden Hitze – lange Zeit stabil. Schließlich gehen dem Stern jedoch der Wasserstoff und andere Kernbrennstoffe aus. Paradoxerweise verbraucht ein Stern umso rascher seinen Brennstoff, je mehr ihm davon anfangs zur Verfügung stand. Denn je mehr Masse ein Stern hat, desto heißer muss er sein, um seine Gravitationskraft auszugleichen, und je heißer er ist, desto rascher ist sein Brennstoffvorrat erschöpft. Unsere Sonne hat vermutlich noch Brennstoff für etwa fünf Milliarden Jahre. Doch massereichere Sterne können ihren Brennstoff schon nach hundert Millionen Jahren verbraucht haben, einem Zeitraum, der viel kürzer ist als die Existenz des Universums. Wenn einem Stern der Brennstoff ausgeht, fängt er an, abzukühlen und sich somit zusammenzuziehen. Was dann mit ihm geschehen könnte, begann man erst Ende der 1920er Jahre zu verstehen.

1928 reiste der indische Student Subrahmanyan Chandrasekhar nach England, um in Cambridge bei dem britischen Astronomen Sir Arthur Eddington zu studieren, einem Experten auf dem Gebiet der Allgemeinen Relativitätstheorie. (Es heißt, Anfang der 1920er Jahre habe ein Journalist Eddington berichtet, er habe

gehört, dass es auf der Welt nur drei Leute gebe, die die Allgemeine Relativitätstheorie verstanden hätten. Eddington schwieg eine Weile und sagte dann: »Ich überlege, wer der Dritte sein könnte.«) Auf der Reise von Indien nach England errechnete Chandrasekhar, bis zu welcher Größe sich ein Stern auch dann noch gegen die eigene Schwerkraft behaupten kann, wenn er seinen ganzen Brennstoff verbraucht hat. Dabei ging er von folgendem Grundgedanken aus: Wenn der Stern kleiner wird, rücken die Materieteilchen sehr nahe aneinander und müssen deshalb nach dem Paulischen Ausschließungsprinzip sehr unterschiedliche Geschwindigkeiten haben. Dies hat zur Folge, dass sie sich wieder voneinander fortbewegen – der Stern tendiert dazu, sich auszudehnen. So kann ein Stern einen konstanten Radius bewahren, wenn sich die Anziehung infolge der Gravitation und die Abstoßung infolge des Ausschließungsprinzips die Waage halten, genauso wie sich zu einem früheren Zeitpunkt Gravitation und Wärmebewegung die Waage hielten.

Chandrasekhar stellte jedoch fest, dass der Abstoßungskraft durch das Ausschließungsprinzip eine Grenze gesetzt ist. Die Relativitätstheorie grenzt den maximalen Geschwindigkeitsunterschied der Materieteilchen im Stern auf die Lichtgeschwindigkeit ein. Verdichtete sich der Stern also hinreichend, so würde die durch das Ausschließungsprinzip bewirkte Abstoßung geringer sein als die Anziehungskraft der Gravitation. Nach Chandrasekhars Berechnungen wäre ein kalter Stern von mehr als etwa der anderthalbfachen Sonnen-

masse nicht in der Lage, sich gegen die eigene Schwerkraft zu behaupten. (Heute bezeichnet man diese Masse als die Chandrasekhar-Grenze.) Eine ähnliche Entdeckung machte ungefähr zur gleichen Zeit auch der russische Physiker Lew Dawidowitsch Landau.

Daraus ergaben sich weitreichende Konsequenzen für das weitere Schicksal von Sternen mit großer Masse. Wenn die Masse eines Sterns unter dem Chandrasekarschen Grenzwert bleibt, kann seine Kontraktion zum Stillstand kommen und er selbst einen Endzustand als »Weißer Zwerg« mit einem Radius von ein paar tausend Kilometern und einer Dichte von mehr als einer Tonne pro Kubikzentimeter erreichen. Der Weiße Zwerg gewinnt seine Stabilität aus der auf dem Ausschließungsprinzip beruhenden Abstoßung zwischen den Elektronen seiner Materie. Wir können eine große Zahl solcher Weißen Zwerge beobachten. Einer der ersten, die entdeckt wurden, ist ein Stern, der um den Sirius kreist, den hellsten Stern am Nachthimmel.

Landau konnte zeigen, dass es noch einen anderen möglichen Endzustand für Sterne gab, ebenfalls mit einer Grenzmasse von ein bis zwei Sonnenmassen, aber noch deutlich kleiner als selbst ein Weißer Zwerg. Auch diese Sterne würden ihre Stabilität aus dem Ausschließungsprinzip gewinnen, aber aus der Abstoßung zwischen den Neutronen und Protonen, nicht zwischen den Elektronen. Deshalb nannte man sie »Neutronesterne«. Sie müssten, so die damalige Hypothese, einen Radius von lediglich fünfzehn Kilometern und eine Dichte von Hunderten von Millionen Tonnen pro Ku-

bikzentimeter haben. Zurzeit dieser Vorhersage gab es noch keine Möglichkeit, Neutronensterne zu beobachten. Sie wurden erst sehr viel später entdeckt.

Sterne dagegen, deren Masse über dem Chandrasekharschen Grenzwert liegt, stehen vor einem großen Problem, wenn ihnen der Brennstoff ausgegangen ist. In einigen Fällen explodieren sie, oder es gelingt ihnen, genügend Materie loszuwerden, um die Masse unter den Grenzwert zu drücken und einen Gravitationskollaps katastrophalen Ausmaßes zu vermeiden. Aber es ist kaum vorstellbar, dass dies immer geschieht, ganz gleich, wie groß der Stern ist. Woher sollte er wissen, dass er abnehmen muss? Und selbst wenn es jedem Stern gelänge, sich von genügend Masse zu befreien, um den Kollaps zu vermeiden – was würde geschehen, wenn man einem Weißen Zwerg oder einem Neutronenstern so viel Masse hinzufügte, dass der Grenzwert überschritten wäre? Würde er zu unendlicher Dichte zusammenstürzen? Eddington war schockiert über die Konsequenzen, die sich aus diesen Überlegungen ergaben, und weigerte sich, Chandrasekhars Schlussfolgerungen zu akzeptieren. Er hielt es für schlichtweg unmöglich, dass ein Stern zu einem Punkt schrumpfen könnte. Die meisten Wissenschaftler – unter ihnen auch Einstein, der eigens zu diesem Thema einen Artikel veröffentlichte – teilten diese Auffassung. Der Widerstand so vieler Fachleute, vor allem auch die Einwände seines einstigen Lehrers Eddington, einer Kapazität auf dem Gebiet des Sternaufbaus, bewogen Chandrasekhar, diese Forschungsrichtung aufzugeben und sich anderen

astronomischen Problemen zuzuwenden, etwa der Bewegung von Sternhaufen. Doch als er 1983 den Nobelpreis erhielt, galt diese Auszeichnung auch seiner frühen Arbeit über die Grenzmasse kalter Sterne.

Chandrasekhar hatte gezeigt, dass das Ausschließungsprinzip den Zusammensturz eines Sterns nicht aufzuhalten vermag, wenn seine Masse den Chandrasekharschen Grenzwert übersteigt, doch die Frage, was der Allgemeinen Relativitätstheorie zufolge mit einem solchen Stern geschehen würde, beantwortete 1939 der junge Amerikaner Robert Oppenheimer. Er kam jedoch zu dem Schluss, dass aus seinen Überlegungen nichts folgte, was mit den Teleskopen seiner Zeit hätte beobachtet werden können. Dann kam der Zweite Weltkrieg dazwischen; Oppenheimer war in dieser Zeit maßgeblich an einem Projekt zur Entwicklung der Atombombe beteiligt. Nach dem Krieg hatte man das Problem des Gravitationskollapses weitgehend vergessen. Die meisten Physiker befassten sich nun mit der Erforschung des Geschehens auf der Ebene des Atoms und seines Kerns. Doch in den 1960er Jahren wurde das Interesse an den Fragen der Astronomie und Kosmologie neu belebt, weil die Anwendung moderner Techniken die Zahl und Reichweite astronomischer Beobachtungen erheblich vergrößerte. Nun entdeckte man auch Oppenheimers Arbeit wieder, und zahlreiche Wissenschaftler machten sich daran, sie weiterzuführen.

Heute stellt sich uns Oppenheimers Arbeit wie folgt dar: Das Gravitationsfeld des Sterns lenkt die Lichtstrahlen in der Raumzeit von den Wegen ab, auf denen

sie sich fortbewegen würden, wenn es den Stern nicht gäbe! Die Lichtkegel, die anzeigen, welchen Wegen Lichtblitze folgen, die von ihren Spitzen ausgesendet werden, sind in der Nähe der Oberfläche von Sternen leicht nach innen gebogen. Dies offenbart sich an der Krümmung des Lichts ferner Sterne, die während einer Sonnenfinsternis zu beobachten ist. Wenn sich der Stern zusammenzieht, wird das Gravitationsfeld an seiner Oberfläche stärker, und die Lichtkegel biegen sich weiter nach innen. Dadurch wird es schwieriger für das Licht, dem Stern zu entkommen, und es erscheint einem in größerer Entfernung postierten Beobachter schwächer und röter. Wenn der schrumpfende Stern schließlich einen bestimmten kritischen Radius erreicht, wird das Gravitationsfeld an der Oberfläche so stark und werden die Lichtkegel entsprechend so stark nach innen gebogen, dass das Licht nicht mehr entweichen kann (Abb. 19). Nun kann sich nach der Relativitätstheorie nichts schneller fortbewegen als das Licht. Wenn dieses also nicht mehr entkommen kann, gilt das auch für alles andere: Alles wird durch das Gravitationsfeld zurückgezogen. So gibt es eine Menge von Ereignissen, eine Region der Raumzeit, aus der kein Entkommen möglich ist. Eine solche Region nennen wir heute »Schwarzes Loch«. Ihre Grenze wird als »Ereignishorizont« bezeichnet und deckt sich mit den Wegen der Lichtstrahlen, denen es gerade nicht gelingt, dem Schwarzen Loch zu entkommen.

Um zu verstehen, was man sähe, wenn man beobachtete, wie ein Stern zu einem Schwarzen Loch zusam-

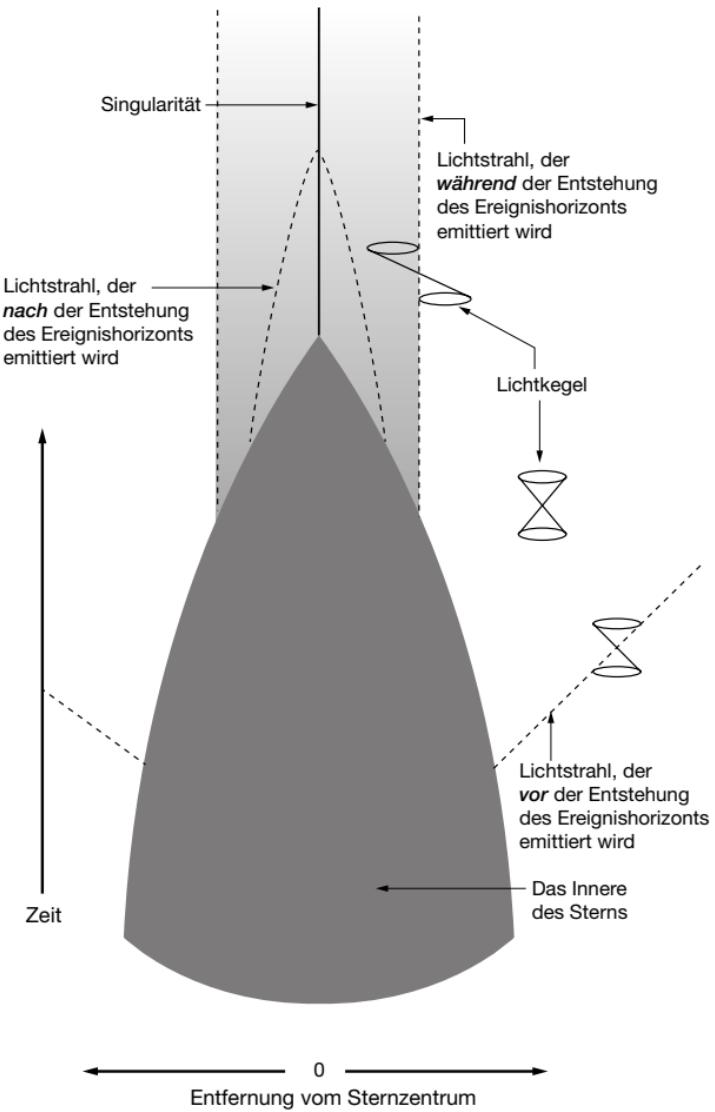


Abbildung 19

menstürzt, muss man sich ins Gedächtnis rufen, dass es nach der Relativitätstheorie keine absolute Zeit gibt. Jeder Beobachter hat sein eigenes Zeitmaß. Die Zeit für jemanden auf einem Stern wird infolge des Gravitationsfeldes anders sein als für jemanden, der sich in einiger Entfernung von dem Stern befindet. Nehmen wir an, ein furchtloser Astronaut auf der Oberfläche eines zusammenstürzenden Sterns sendet nach seiner Uhr jede Sekunde ein Signal an sein Raumschiff, das den Stern umkreist. Zu einem bestimmten Zeitpunkt auf seiner Uhr, sagen wir um 11:00, unterschreitet der Stern bei seiner Kontraktion den kritischen Radius – das Gravitationsfeld wird so stark, dass ihm nichts mehr entrinnen kann. Auch die Signale des Astronauten erreichen das Raumschiff nicht mehr. Seine Gefährten im Raumschiff würden feststellen, dass zwischen den Signalen immer größere Intervalle lägen, je näher 11:00 Uhr rückte. Doch bliebe dieser Effekt vor 10:59:59 noch sehr klein. Ihre Wartezeit zwischen dem 10:59:58- und dem 10:59:59-Signal wäre nur um eine Winzigkeit länger als eine Sekunde, doch sie würden vergebens auf das 11:00-Signal warten. Die Lichtwellen, die die Oberfläche des Sterns zwischen 10:59:59 und 11:00 (nach der Uhr des Astronauten) aussendete, würden sich, vom Raumschiff aus gesehen, über einen unendlichen Zeitraum ausbreiten. Aufeinanderfolgende Wellen trafen in immer größeren Zeitabständen beim Raumschiff ein, so dass das vom Stern kommende Licht immer röter und röter und schwächer und schwächer erschien. Schließlich wäre der Stern so dunkel, dass man ihn vom Raum-

schiff aus nicht mehr sehen könnte: Es bliebe nur ein Schwarzes Loch im Weltraum. Trotzdem würde der Stern nach wie vor die gleiche Gravitationskraft auf das Raumschiff ausüben, solange es um das Schwarze Loch kreist.

Allerdings ist das Szenario nicht ganz realistisch, weil es ein Problem unberücksichtigt lässt: Je weiter man vom Stern entfernt ist, desto schwächer wird die Gravitation; deshalb wäre die Schwerkraft, die auf die Füße unseres furchtlosen Astronauten einwirkt, stets größer als die Kraft, der sein Kopf ausgesetzt wäre. Diese unterschiedlich starken Kräfte würden ihn wie eine Spaghetti in die Länge ziehen oder ihn sogar zerreißen, noch bevor der Stern bei seinem Zusammensturz jenen kritischen Radius erreicht hätte, bei dem sich der Ereignishorizont bildet! Wir glauben jedoch, dass es im Universum noch weit größere Objekte gibt, etwa die Zentralregionen von Galaxien, die in einem Gravitationskollaps ebenfalls zu Schwarzen Löchern kollabieren können. Ein Astronaut auf einem solchen Objekt würde nicht vor der Bildung des Schwarzen Loches entzweigerissen werden, ja er würde beim Erreichen des kritischen Radius noch nicht einmal irgendetwas Besonderes spüren. So könnte er den Punkt, von dem aus es keine Rückkehr mehr gäbe, überschreiten, ohne es zu bemerken. Doch innerhalb weniger Stunden – mit dem weiteren Zusammensturz der Region – würde der immer größer werdende Unterschied zwischen den auf seinen Kopf und seine Füße einwirkenden Gravitationskräften schließlich auch ihn zerreißen.

Aus den Untersuchungen, die Roger Penrose und ich zwischen 1965 und 1970 anstellten, ging hervor, dass es nach der Allgemeinen Relativitätstheorie im Schwarzen Loch eine Singularität von unendlicher Dichte und Raumzeitkrümmung geben muss. Sie gleicht weitgehend dem Urknall am Anfang der Zeit, nur bedeutet sie das Ende der Zeit für den zusammenstürzenden Himmelskörper (und den Astronauten). An dieser Singularität enden die Naturgesetze und unsere Fähigkeit, die Zukunft vorherzusagen. Indessen wäre kein Beobachter außerhalb des Schwarzen Loches von diesem Verlust der Vorhersagbarkeit betroffen, weil ihn weder Licht noch andere Signale von der Singularität erreichen könnten. Dieser bemerkenswerte Umstand bewog Roger Penrose, die kosmische Zensur-Hypothese aufzustellen. Ich paraphrasiere ihren Inhalt: »Gott verabscheut eine nackte Singularität.« Mit anderen Worten: Die durch Gravitationskollaps hervorgerufenen Singularitäten kommen nur an Orten vor, die sich – wie Schwarze Löcher – durch einen Ereignishorizont dezent den Blicken Außenstehender entziehen. Genau genommen handelt es sich hierbei um die Hypothese der schwachen kosmischen Zensur: Sie bewahrt Beobachter, die sich außerhalb des Schwarzen Loches befinden, vor den Folgen des Prognostizierbarkeitsverlustes, zu dem es an der Singularität kommt, tut aber nicht das Geringste für den unglücklichen Astronauten, der in das Loch fällt.

Es gibt einige Lösungen der Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, die es unserem Astronauten ermöglichen, die nackte Singularität zu erblicken: Er

kann beispielsweise das Zusammentreffen mit der Singularität verhindern, stattdessen durch ein »Wurmloch« fallen und in einer anderen Region des Universums herauskommen. Das würde für die Reise durch Zeit und Raum fantastische Möglichkeiten eröffnen, doch leider hat es den Anschein, als seien diese Lösungen alle hochgradig instabil: Die kleinste Störung, wie zum Beispiel die Anwesenheit eines Astronauten, kann sie verändern und dazu führen, dass der Astronaut die Singularität doch erst erblickt, wenn er mit ihr zusammentrifft und seine Zeit endet. Mit anderen Worten: Die Singularität befindet sich immer in seiner Zukunft und nie in seiner Vergangenheit. Nach der starken Version der kosmischen Zensur-Hypothese liegen bei einer realistischen Lösung die Singularitäten stets gänzlich in der Zukunft (wie die Singularitäten des Gravitationskollapses) oder gänzlich in der Vergangenheit (wie der Urknall). Ich bin zutiefst davon überzeugt, dass die kosmische Zensur-Hypothese zutrifft. Daher habe ich mit Kip Thorne und John Preskill von der Cal Tech gewettet, dass sie ihre Gültigkeit behalten wird. Ich habe die Wette formell verloren, denn man fand in der Tat Beispiele für Lösungen mit einer Singularität, die noch aus großer Entfernung sichtbar ist. Also musste ich zahlen, was nach den Bedingungen der Wette hieß, dass ich ihre Nacktheit zu bekleiden hatte. Aber ich kann einen moralischen Sieg für mich in Anspruch nehmen. Die betreffenden nackten Singularitäten sind instabil: Die geringste Störung hat zur Folge, dass sie entweder verschwinden oder sich hinter einem Ereignishorizont verbergen.

Der Ereignishorizont, die Grenze jener Region der Raumzeit, aus der kein Entkommen möglich ist, wirkt wie eine nur in einer Richtung durchlässige Membran, die rund um das Schwarze Loch gespannt ist. Objekte, wie etwa unvorsichtige Astronauten, können durch den Ereignishorizont in das Schwarze Loch fallen, aber nichts kann jemals durch den Ereignishorizont aus dem Schwarzen Loch hinausgelangen. (Denken Sie daran, dass der Ereignishorizont der Weg des Lichtes in der Raumzeit ist, das aus dem Schwarzen Loch hinauszukommen versucht, und nichts kann sich schneller als das Licht bewegen.) Mit gutem Recht ließe sich vom Ereignishorizont sagen, was der Dichter Dante über den Eingang zur Hölle schrieb: »Die Ihr hier eintretet, lasset alle Hoffnung fahren.« Alle Dinge und Menschen, die durch den Ereignishorizont fallen, werden bald die Region unendlicher Dichte und das Ende der Zeit erreicht haben.

Aus der Allgemeinen Relativitätstheorie folgt, dass schwere Objekte, die in Bewegung sind, die Emission von Gravitationswellen aussenden – Kräuselungen in der Krümmung der Raumzeit, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Sie ähneln Lichtwellen, die Kräuselungen des elektromagnetischen Feldes sind, doch sind sie sehr viel schwieriger zu entdecken. Sie lassen sich beobachten, weil sie eine minimale Veränderung des Abstands zwischen benachbarten, freibeweglichen Objekten hervorrufen. Man hat in den USA, Europa und Japan mehrere Detektoren gebaut, die über eine Entfernung von rund einem Dutzend Kilometern eine relative

Abstandsänderung von einem Tausendstel Millionstel Millionstel Millionstel (0,00...001 mit insgesamt einundzwanzig Nullen) erkennen, das entspricht über diese Entfernung weniger als dem Durchmesser eines Atomkerns.⁷ Wie das Licht, tragen sie Energie von den Objekten mit sich fort, von denen sie ausgesendet werden. Deshalb sollte man erwarten, dass ein System massereicher Objekte schließlich einen stationären Zustand erreichte, weil die gesamte Bewegungsenergie durch die Emission von Gravitationswellen verlorenginge. (Es ist, als ließe man einen Korken ins Wasser fallen: Zunächst tanzt er heftig auf und ab, aber die Wellen tragen seine Energie fort, sodass er schließlich einen stationären Zustand erreicht.) Beispielsweise erzeugt die Bewegung der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne Gravitationswellen. Der Energieverlust verändert die Umlaufbahn der Erde, sodass sie allmählich immer näher an die Sonne heranrückt, schließlich mit ihr kollidiert und einen stationären Zustand annimmt. In diesem Falle ist der Verlust an Energie allerdings sehr gering: Gerade groß genug, um einen kleinen elektrischen Heizkörper zu speisen. Danach wird es tausend Millionen Millionen Millionen Millionen Jahre dauern, bis die Erde in die Sonne stürzt. Also noch kein akuter Grund zur Besorgnis! Die Veränderung in der Umlaufbahn der Erde ist zu geringfügig, um sie wahrnehmen zu können, doch den gleichen Effekt hat man in den letzten Jahren in einem System namens PSR 1913 + 16 beobachtet (PSR steht für Pulsar, einen besonderen Neutronenstern-Typ, der regelmäßig Pulse von Radiowellen aussendet). Das

System besteht aus zwei einander umkreisenden Neutronensternen, und die Energie, die sie infolge der Emission von Gravitationswellen verlieren, veranlasst sie, sich spiralförmig aufeinander zuzubewegen. Für diese Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie erhielten J. H. Taylor und R. A. Hulse 1993 den Nobelpreis. Es wird noch ungefähr dreihundert Millionen Jahre dauern, bis sie kollidieren. Kurz vor dem Zusammenstoß werden sie einander so schnell umkreisen, dass sie genügend Gravitationswellen emittieren, um von Detektoren wie LIGO entdeckt zu werden.⁸

Bei einem Gravitationskollaps, der zu einem Schwarzen Loch führt, verliefen die Bewegungen sehr viel rascher. Deshalb wäre auch der Energieverlust durch Gravitationswellen sehr viel höher. Es würde also nicht allzu lange dauern, bis das Schwarze Loch einen stationären Zustand annähme. Wie könnte dieser Endzustand aussehen? Man könnte vermuten, dass er von all den komplexen Eigenschaften des Sterns abhinge, aus dem er sich gebildet hat – nicht nur von seiner Masse und Rotationsgeschwindigkeit, sondern auch von der unterschiedlichen Dichte der verschiedenen Teile des Sterns und den komplizierten Gasbewegungen in seinem Innern. Und wenn Schwarze Löcher so vielgestaltig wären wie die Objekte, aus deren Zusammensturz sie entstehen, wäre es schwer, überhaupt allgemeine Vorhersagen über sie zu treffen.

1967 jedoch wies Werner Israel, ein kanadischer Wissenschaftler, der in Berlin geboren wurde, in Südafrika aufwuchs und in Irland promovierte, der Theo-

rie der Schwarzen Löcher eine ganz neue Richtung. Er bewies, dass nach der Allgemeinen Relativitätstheorie nichtrotierende Schwarze Löcher sehr einfach sein müssen: vollkommen sphärisch, in ihrer Ausdehnung nur von der Masse abhängig und immer dann identisch, wenn ihre Masse gleich ist. Sie lassen sich durch eine bestimmte Lösung der Einsteinschen Gleichungen beschreiben, die seit 1917 bekannt ist – Karl Schwarzschild hat sie kurz nach der Postulierung der Allgemeinen Relativitätstheorie entdeckt. Zunächst haben viele Wissenschaftler, auch Israel selbst, die Auffassung vertreten, dass sich Schwarze Löcher, da sie vollkommen sphärisch sein müssen, nur aus dem Kollaps vollkommen sphärischer Körper bilden könnten. Ein realer Stern, der ja nie perfekt kugelförmig wäre, könnte deswegen bei seinem Kollaps lediglich zu einer nackten Singularität werden.

Es gab jedoch noch eine andere Deutung des Israelschen Resultats, die vor allem Roger Penrose und John Wheeler vertraten. Nach ihrer Auffassung führen die raschen Bewegungen beim Zusammensturz eines Sterns dazu, dass die abgegebenen Gravitationswellen für eine immer sphärischere Gestalt sorgen. Zu dem Zeitpunkt, da der Stern einen stationären Zustand angenommen habe, so diese Theorie, sei er vollkommen sphärisch. Jeder nichtrotierende Stern würde – ganz gleich, wie kompliziert seine Form und innere Struktur wäre – nach dem Gravitationskollaps als vollkommen sphärisches Schwarzes Loch enden, dessen Größe nur von seiner Masse abhinge. Weitere Berechnungen erhärteten

diese Auffassung, sodass sie bald allgemein akzeptiert wurde.

Israels Ergebnis betraf nur Schwarze Löcher, die sich aus nichtrotierenden Körpern bilden. 1963 fand der Neuseeländer Roy Kerr eine Reihe von Lösungen der Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, mit denen sich rotierende Schwarze Löcher beschreiben lassen. Diese »Kerr-Löcher« rotieren mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Ihre Größe und Form richtet sich nur nach ihrer Masse und ihrer Rotationsgeschwindigkeit. Ist die Rotation gleich Null, ist das Schwarze Loch vollkommen rund und die Lösung identisch mit der Schwarzschild'schen Lösung; ist die Rotation hingegen nicht gleich Null, so ist das Schwarze Loch an seinem Äquator nach außen gewölbt (entsprechende Wölbungen besitzen auch Erde und Sonne infolge ihrer Rotation), und je schneller es rotiert, desto stärker prägt sich diese Wölbung aus. In dem Bestreben, Israels Resultat auch auf rotierende Körper anzuwenden, gelangte man zu folgender Vermutung: Jeder Körper, der zu einem Schwarzen Loch zusammenstürzt, nimmt schließlich einen stationären Zustand an, der von der Kerrschen Lösung beschrieben wird.

Diese Vermutung musste nun bewiesen werden. Den Anfang machte 1970 Brandon Carter, ein Kollege von mir in Cambridge. Er zeigte, dass ein stationäres Schwarzes Loch, wenn es eine Symmetriearchse hat wie ein sich drehender Kreisel, in Größe und Gestalt nur von seiner Masse und seiner Rotationsgeschwindigkeit abhängt. 1971 konnte ich beweisen, dass jedes statio-

näre Schwarze Loch, das sich in Rotation befindet, eine solche Symmetriearchse haben muss. Schließlich zeigte David Robinson vom Londoner Kings College 1973 mithilfe der Ergebnisse von Carter und mir, dass die Annahme in der Tat richtig war: Ein solches Schwarzes Loch muss der Kerr-Lösung entsprechen. Nach einem Gravitationskollaps muss ein Schwarzes Loch in einem Zustand zur Ruhe kommen, in dem es rotieren, aber nicht pulsieren kann. Ferner können Größe und Gestalt nur von seiner Masse und Rotationsgeschwindigkeit abhängen, nicht aber von der Beschaffenheit des Körpers, aus dessen Zusammensturz es entstanden ist. Dieses Ergebnis wurde bekannt unter der Maxime: »Ein Schwarzes Loch hat keine Haare.« Das »Keine-Haare-Theorem« ist von großem praktischen Wert, weil es die Zahl möglicher Arten von Schwarzen Löchern erheblich einschränkt. Infolgedessen kann man detaillierte Modelle von Objekten entwickeln, die möglicherweise Schwarze Löcher enthalten, und die Vorhersagen der Modelle mit den Beobachtungen vergleichen. Außerdem geht aus diesem Theorem hervor, dass bei der Entstehung eines Schwarzen Loches eine beträchtliche Menge an Information über den zusammengestürzten Körper verlorengehen muss, weil sich hinterher nur noch dessen Masse und Rotationsgeschwindigkeit bestimmen lassen. Die Bedeutung dieses Umstands wird sich im nächsten Kapitel zeigen.

Schwarze Löcher sind ein Beispiel für die recht seltenen Fälle in der Wissenschaft, in denen eine Theorie detailliert als mathematisches Modell entwickelt wurde,

bevor irgendwelche Beobachtungen vorlagen, die ihre Richtigkeit bewiesen. Genau dies war das Hauptargument der Wissenschaftler, die die Theorie der Schwarzen Löcher ablehnten: Wie könnte man an Objekte glauben, wenn deren Existenz nur Berechnungen bewiesen, die auf der umstrittenen Theorie der Allgemeinen Relativität beruhten? Doch 1963 maß der Astronom Maarten Schmidt am Palomar Observatory in Kalifornien die Rotverschiebung eines schwach leuchtenden sternartigen Objekts in Richtung der Radioquelle 3C273 (das heißtt, Quelle Nummer 273 im dritten Cambridge-Katalog für Radioquellen). Er stellte fest, dass sie zu groß war, um von einem Gravitationsfeld verursacht zu sein: Wäre es eine Gravitationsrotverschiebung gewesen, hätte das Objekt über eine so gewaltige Masse verfügen und uns so nahe sein müssen, dass es die Umlaufbahnen der Planeten im Sonnensystem beeinflusst hätte. Das legte nahe, dass die Rotverschiebung durch die Ausdehnung des Universums verursacht wurde, was wiederum bedeutete, dass sich das Objekt in sehr großer Entfernung befand. Da es auf solche Distanz erkennbar ist, muss das Objekt sehr hell sein. Mit anderen Worten: Es muss eine ungeheure Energiemenge abstrahlen. Der einzige Mechanismus, der nach menschlichem Ermessens so große Energiemengen freisetzen kann, ist ein Gravitationskollaps, und zwar nicht nur der eines einzigen Sterns, sondern einer ganzen galaktischen Zentralregion. Man hat inzwischen viele ähnliche »quasistellare Objekte« oder Quasare entdeckt, die alle beträchtliche Rotverschiebungen aufweisen. Doch sind sie zu weit

entfernt und zu schwer zu beobachten, als dass sie einen endgültigen Beweis für die Existenz Schwarzer Löcher liefern könnten.*

Weitere Anhaltspunkte für Schwarze Löcher brachte 1967 die Entdeckung von Jocelyn Bell, einer Doktorandin in Cambridge. Sie stellte fest, dass einige Objekte am Himmel regelmäßige Pulse von Radiowellen aussenden. Zunächst meinten sie und ihr Tutor Anthony Hewish, sie hätten möglicherweise Kontakt zu einer außerirdischen Zivilisation in der Galaxie aufgenommen. Ich erinnere mich, dass sie in dem Seminar, in dem sie ihre Entdeckung bekanntgaben, die ersten Quellen, die sie ausfindig gemacht hatten, LGM 1–4 nannten – LGM stand für »Little Green Man«. Doch schließlich gelangten sie und alle anderen zu dem weniger romantischen Schluss, dass es sich bei diesen Objekten, die man als Pulsare bezeichnete, um rotierende Neutronensterne handelte, die ihre Pulse von Radiowellen aufgrund einer komplizierten Wechselwirkung zwischen ihren magnetischen Feldern und der sie umgebenden Materie aussandten. Das war eine schlechte Nachricht für die Autoren von Weltraum-Western, aber sehr ermutigend für die wenigen, die damals an Schwarze Löcher glaubten:

* Wenig mehr als ein Jahr nach Hawkings Tod, im April 2019, gelang Heino Falcke und der Event Horizon Telescope Kollaboration (EHT) für eine solche aktive Galaxie (M87) das erste Bild eines Schwarzen Lochs – das war dann in der Tat der Beweis für die Existenz supermassereicher Schwarzer Löcher im Zentrum von Galaxien. *Anm. d. Red.*

Dies war der erste konkrete Anhaltspunkt dafür, dass es wirklich Neutronensterne gibt. Der Radius eines Neutronensterns beträgt ungefähr sechzehn Kilometer und ist damit nur ein paarmal so groß wie der kritische Radius, der zur Bildung eines Schwarzen Loches führt. Nach dieser Entdeckung war es durchaus berechtigt zu erwarten, dass andere Sterne auf noch geringeren Umfang schrumpfen und zu Schwarzen Löchern werden können.

Doch wie soll man jemals ein Schwarzes Loch entdecken, wo es doch per definitionem kein Licht aussendet? Es ist, als suche man eine schwarze Katze in einem Kohlenkeller. Glücklicherweise gibt es doch eine Möglichkeit. Schon John Michell hatte in seinem grundlegenden Aufsatz aus dem Jahre 1783 darauf hingewiesen, dass ein Schwarzes Loch nach wie vor mit seiner Gravitation nahe gelegene Objekte beeinflusst. Astronomen kennen zahlreiche Systeme, in denen zwei Sterne umeinander kreisen, wobei sie sich gegenseitig mit ihrer Schwerkraft anziehen. Es sind aber auch Systeme bekannt, in denen nur ein sichtbarer Stern um einen unsichtbaren Begleiter kreist. Natürlich kann man daraus nicht bedenkenlos schließen, dass der Begleiter ein Schwarzes Loch sei – es könnte einfach ein Stern sein, dessen Licht zu schwach ist, um von uns wahrgenommen zu werden. Doch bei einigen dieser Systeme, zum Beispiel bei Cygnus X-1 (Abb. 20), handelt es sich auch um starke Röntgenquellen. Dieses Phänomen lässt sich am besten damit erklären, dass von der Oberfläche des sichtbaren Sterns Materie weggeblasen wird. Wenn sie

dann auf den unsichtbaren Begleiter fällt, gerät sie in spiralförmige Bewegung (ähnlich dem Wasser, das in den Abfluss läuft) und wird so heiß, dass sie Röntgenstrahlen aussendet (Abb. 21). Dieser Mechanismus ist nur möglich, wenn das unsichtbare Objekt sehr klein ist, so klein wie ein Weißer Zwerg, ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch. Aus der beobachteten Bahn des sichtbaren Sterns lässt sich die geringste mögliche Masse des unsichtbaren Objektes errechnen. Im Falle von Cygnus X-1 liegt sie ungefähr bei dem Sechsfachen der Sonnenmasse. Gemessen an der Chandrasekhar-Grenze ist die Masse des unsichtbaren Objektes zu groß, als dass es sich um einen Weißen Zwerg handeln könnte, und sie ist auch zu groß für einen Neutronenstern. Deshalb, so scheint es, haben wir es mit einem Schwarzen Loch zu tun.

Es gibt andere Modelle zur Erklärung von Cygnus X-1, die ohne Schwarzes Loch auskommen, doch sie sind alle ziemlich weit hergeholt. Trotzdem habe ich mit Kip Thorne vom California Institute of Technology gewettet, dass Cygnus X-1 kein Schwarzes Loch enthält. Damit habe ich eine Art Versicherung abgeschlossen. Ich habe viel Arbeit in die Theorie der Schwarzen Löcher investiert. Die ganze Mühe wäre umsonst, wenn sich herausstellen würde, dass es sie gar nicht gibt. Aber dann bliebe mir wenigstens der Trost, eine Wette gewonnen zu haben, und ich würde vier Jahre lang kostenlos die Zeitschrift *Private Eye* beziehen können. Zwar hat sich die Situation von Cygnus-X-1 seit 1975, als wir die Wette abschlossen, nicht sonderlich verändert, doch

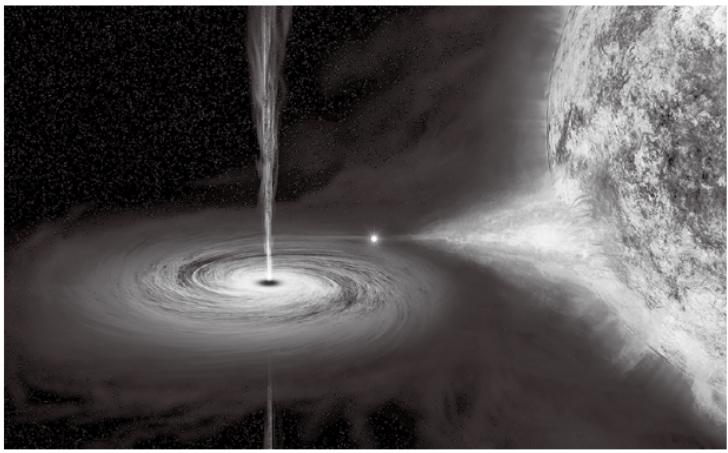


Abbildung 20: Künstlerische Darstellung eines Röntgendifpelpsterns: Cygnus X-1 ist ein sogenanntes stellares Schwarzes Loch: eine Klasse von Schwarzen Löchern, die durch den Kollaps eines massereichen Sterns entsteht und die Materie von ihrem Partnerstern aufsaugt.

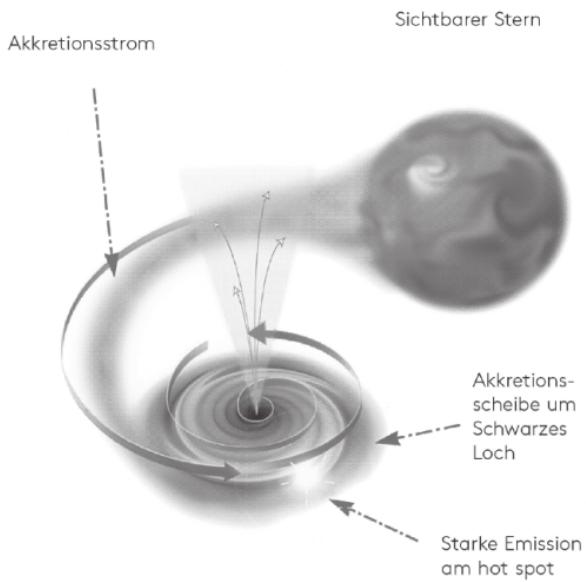


Abbildung 21

gibt es heute so viele andere Beobachtungsdaten, die auf die Existenz Schwarzer Löcher schließen lassen, dass ich meine Niederlage eingestand. Ich zahlte die fällige Schuld – ein Jahreabonnement des *Penthouse* – womit ich den feministischen Zorn von Kips Frau erregte.

Wir haben heute Anhaltspunkte dafür, dass unsere Galaxie und zwei Nachbargalaxien, die Magellanschen Wolken, weitere Schwarze Löcher in Systemen wie Cygnus X-1 enthalten. Doch gibt es mit einer an Sicherheit grenzenden Wahrscheinlichkeit noch viel mehr Schwarze Löcher; in der langen Geschichte des Universums müssen sehr viele Sterne ihren gesamten Kernbrennstoff verbraucht haben und zusammengestürzt sein. Die Zahl der Schwarzen Löcher kann sogar größer als die der sichtbaren Sterne sein, die allein in unserer Galaxie etwa hundert Milliarden beträgt. Die zusätzliche Gravitationskraft einer so großen Zahl von Schwarzen Löchern könnte eine Erklärung für die Rotationsgeschwindigkeit unserer Galaxie liefern – die Masse der sichtbaren Sterne reicht dazu nämlich nicht aus. Einige Hinweise sprechen auch dafür, dass es im Mittelpunkt unserer Galaxie ein sehr viel größeres Schwarzes Loch gibt mit einer Masse, die ungefähr einhunderttausendmal so groß ist wie die der Sonne.⁹ Sterne der Galaxie, die dem Schwarzen Loch zu nahe kommen, werden durch den Unterschied der Gravitationskräfte, die auf die zu- und die abgewandte Seite einwirken, auseinander gerissen. Ihre Überreste und das Gas, das von anderen Sternen weggeschleudert wird, fallen in das Schwarze Loch hinein. Wie bei Cygnus X-1

wird sich das Gas spiralförmig nach innen bewegen und erhitzen, wenn auch nicht ganz so stark wie im oben geschilderten Fall. Es wird nicht heiß genug werden, um Röntgenstrahlen zu emittieren, könnte sich aber als die starke Quelle von Radiowellen und Infrarotstrahlen erweisen, die im Zentrum der Galaxie zu beobachten ist.

Es wird vermutet, dass es ähnliche, aber noch sehr viel größere Schwarze Löcher mit Massen, die das Hundertmillionenfache der Sonnenmasse aufweisen, im Zentrum von Quasaren gibt. Beispielsweise ergab die Beobachtung der Galaxie M87 mit dem Hubble-Teleskop, dass dort eine Gasscheibe mit einem Durchmesser von 130 Lichtjahren um ein Zentralobjekt kreist, dessen Masse zweitausend Millionen Sonnenmassen entspricht. Das kann nur ein Schwarzes Loch sein. Die enormen Energiemengen, welche diese Objekte emittieren, lassen sich nur auf Materie zurückführen, die in solche supermassiven Schwarzen Löcher fällt. Während sich die Materie spiralförmig in das Schwarze Loch hineinbewegt, veranlasst sie es zu einer Rotation in gleicher Drehrichtung und damit zur Entwicklung eines Magnetfeldes, ähnlich dem der Erde. Durch die einfallende Materie werden in der Nähe des Schwarzen Loches sehr energiereiche Teilchen erzeugt. Das magnetische Feld wäre so stark, dass es diese Teilchen zu Jets bündeln könnte, die entlang der Rotationsachse des Schwarzen Loches, das heißt in Richtung seines Nord- und Südpols, nach außen geschleudert würden. Tatsächlich sind solche Jets in einigen Galaxien und Quasaren beobachtet worden.

Es ist auch denkbar, dass es Schwarze Löcher mit sehr viel kleineren Massen als der der Sonne gibt. Solche Schwarzen Löcher könnten nicht durch Gravitationskollaps entstehen, weil ihre Masse unter der Chandrasekhar-Grenze läge. Sterne von so geringer Masse könnten sich gegen die Schwerkraft behaupten, auch wenn ihr Kernbrennstoff verbraucht ist. Schwarze Löcher von geringer Masse könnten sich nur bilden, wenn ihre Materie durch sehr hohen äußeren Druck zu enormer Dichte komprimiert werden würde. Solche Bedingungen könnten durch die Explosion einer sehr großen Wasserstoffbombe entstehen: Der Physiker John Wheeler hat einmal ausgerechnet, dass man mit allem schweren Wasser aus den Weltmeeren eine Wasserstoffbombe bauen könnte, welche die Materie in ihrem Mittelpunkt so komprimieren würde, dass ein Schwarzes Loch entstünde. (Es bliebe allerdings niemand übrig, der es beobachten könnte.) Realistischer ist die Möglichkeit, dass sich solche Schwarzen Löcher mit geringer Masse unter den hohen Temperaturen und Druckverhältnissen des sehr frühen Universums gebildet haben. Das setzt jedoch voraus, dass das frühe Universum nicht vollkommen gleichmäßig und einheitlich gewesen ist, weil nur eine kleine Region von überdurchschnittlich hoher Dichte in dieser Weise zu einem Schwarzen Loch komprimiert werden könnte. Doch wir wissen, dass es Unregelmäßigkeiten gegeben haben muss, weil sonst die Materie im Universum auch heute noch vollkommen gleichförmig verteilt wäre, statt in Sternen und Galaxien zusammengeballt zu sein.

Ob die Unregelmäßigkeiten, die erforderlich waren, um Sterne und Galaxien entstehen zu lassen, zur Bildung einer größeren Zahl solcher urzeitlichen, in der Fachsprache »primordialen« Schwarzen Löcher geführt haben, hängt natürlich von den näheren Umständen im frühen Universum ab. Deshalb könnten wir wichtige Informationen über die sehr frühen Stadien des Universums gewinnen, wenn es uns gelänge festzustellen, wie viele urzeitliche Schwarze Löcher es gegenwärtig gibt. Sie könnten nur anhand ihres gravitativen Einflusses auf andere, sichtbare Materie oder auf die Ausdehnungsbewegung des Universums entdeckt werden – ihre Masse beträgt mehr als eine Milliarde Tonnen (die Masse eines großen Berges). Doch im nächsten Kapitel werde ich zeigen, dass Schwarze Löcher am Ende gar nicht wirklich schwarz sind: Sie glühen wie ein heißer Körper, und je kleiner sie sind, desto intensiver ist ihre Glut. So paradox es klingt: Es könnte sich herausstellen, dass kleinere Schwarze Löcher leichter zu entdecken sind als große.

7

SCHWARZE LÖCHER SIND GAR NICHT SO SCHWARZ

Vor 1970 konzentrierte ich mich in meinen Arbeiten über die Allgemeine Relativitätstheorie vor allem auf die Frage, ob es eine Urknall-Singularität gegeben hat oder nicht. Doch eines Abends im November jenes Jahres, kurz nach der Geburt meiner Tochter Lucy, dachte ich über Schwarze Löcher nach, während ich zu Bett ging. Meine Körperbehinderung macht diese alltägliche Handlung zu einem ziemlich langwierigen Prozess, so dass mir viel Zeit für meine Überlegungen blieb. Damals war noch nicht genau definiert, welche Punkte der Raumzeit innerhalb eines Schwarzen Loches liegen und welche außerhalb. Mit Roger Penrose hatte ich bereits die Möglichkeit erörtert, ein Schwarzes Loch als die Gruppe von Ereignissen zu definieren, denen man nicht sehr weit entkommen kann; das ist heute die allgemein anerkannte Definition. Mit anderen Worten: Die Grenze des Schwarzen Loches, der Ereignishorizont, wird durch die Wege jener Lichtstrahlen in der Raumzeit festgelegt, die bei ihrem zum Scheitern ver-

urteilten Versuch, dem Schwarzen Loch zu entfliehen, am weitesten nach außen dringen und sich für immer auf dieser Grenze bewegen (Abb. 22). Dies erinnert ein bisschen an den Versuch, vor der Polizei davonzulaufen, und man ist ihr immer einen Schritt voraus, ohne ihr je wirklich zu entkommen!

Plötzlich wurde mir klar, dass die Bahnen dieser Lichtstrahlen nicht näher aneinanderrücken können, weil sie sonst schließlich ineinanderlaufen müssten – so als würde man bei seiner Flucht mit jemandem zusammenprallen, der einem anderen Polizisten in entgegengesetzter Richtung davonlief: Beide würden gefasst werden. (Oder, in unserem Fall, in das Schwarze Loch zurückfallen!) Doch wenn das Schwarze Loch diese Lichtstrahlen verschluckt, können sie nicht auf seiner Grenze liegen. Deshalb müssten sich die Wege der Lichtstrahlen im Ereignishorizont stets parallel zueinander bewegen oder voneinander fort. Man kann sich den Ereignishorizont auch als den Rand eines Schattens vorstellen – des Schattens eines drohenden Untergangs. Betrachtet man den Schatten, den eine sehr weit entfernte Lichtquelle wirft, so erkennt man, dass sich die Lichtstrahlen am Rand einander nicht nähern.

Wenn die Lichtstrahlen, die den Ereignishorizont bilden, einander nicht näher rücken können, dann müsste seine Fläche gleich bleiben oder anwachsen, könnte aber niemals abnehmen – denn das würde bedeuten, dass sich zumindest einige der Lichtstrahlen des Ereignishorizontes einander genähert hätten. Tatsächlich würde die Fläche immer dann anwachsen,

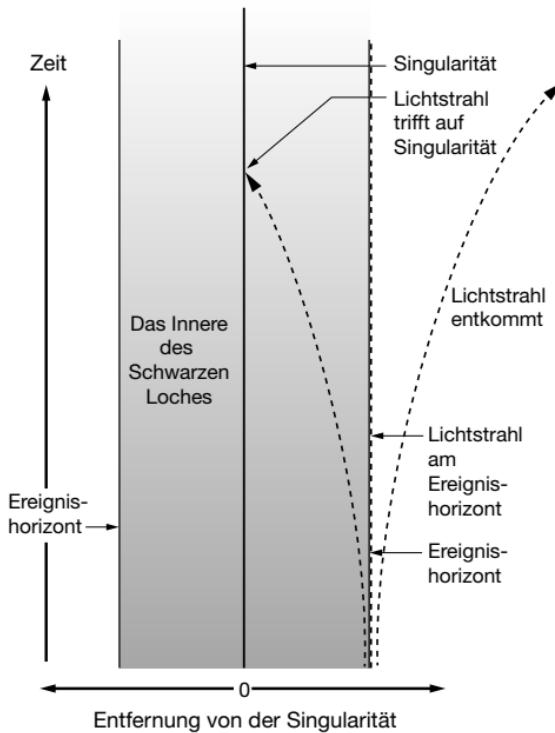


Abbildung 22

wenn Materie oder Strahlung ins Schwarze Loch fiele (Abb. 23). Beim Zusammenstoß zweier Schwarzer Löcher und ihrer Verschmelzung zu einem einzigen würde die Fläche des Ereignishorizontes des dabei entstehenden Schwarzen Loches größer oder gleich der Summe der Ereignishorizontflächen der beiden ursprünglichen Schwarzen Löcher sein (Abb. 24). Diese Eigenschaft von Ereignishorizontflächen, sich nicht zu verringern, bedeutete eine wesentliche Einschränkung für das mögliche Verhalten Schwarzer Löcher. Meine Entdeckung

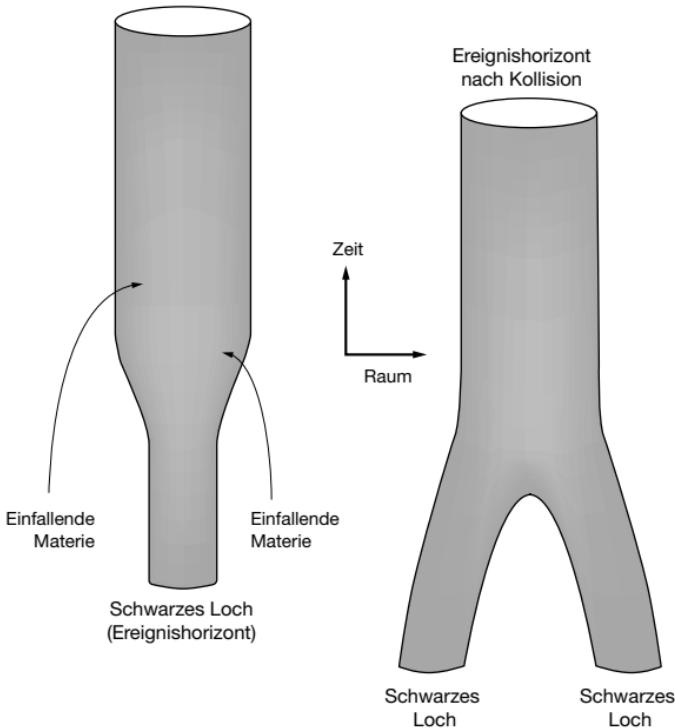


Abbildung 23

Abbildung 24

versetzte mich in solche Aufregung, dass ich in dieser Nacht nicht viel Schlaf fand. Am folgenden Tag rief ich Roger Penrose an. Er stimmte mir zu. Ich glaube sogar, ihm war diese Eigenschaft der Fläche schon vorher klar gewesen. Er definierte das Schwarze Loch nur etwas anders und hatte nicht bemerkt, dass dessen Grenzen bei beiden Definitionen gleich waren und damit auch ihre Flächen, vorausgesetzt, das Schwarze Loch hätte einen Zustand angenommen, in dem es sich nicht mehr mit der Zeit änderte.

Die Tatsache, dass die Fläche des Schwarzen Loches nicht abnimmt, erinnerte mich stark an das Verhalten einer physikalischen Größe namens Entropie, die den Grad der Unordnung eines Systems angibt. Es gehört zur alltäglichen Erfahrung, dass die Unordnung in der Regel zunimmt, wenn man die Dinge sich selbst überlässt. (Um das festzustellen, braucht man nur auf alle Reparaturen an einem Haus zu verzichten.) Man kann Ordnung aus Unordnung schaffen (etwa das Haus anstreichen), doch das kostet Anstrengung oder Energie und verringert damit die Menge der verfügbaren geordneten Energie.

Eine genaue Formulierung dieses Gedankens ist der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Dort heißt es, dass die Entropie eines isolierten Systems stets zunimmt und dass bei der Vereinigung zweier Systeme die Entropie des Gesamtsystems größer ist als die Summe der Entropien der einzelnen Systeme. Betrachten wir ein System von Gasmolekülen in einem Behälter. Wir können uns die Moleküle als kleine Billardkugeln vorstellen, die ständig zusammenstoßen und von den Behälterwänden abprallen. Je höher die Temperatur des Gases ist, desto schneller bewegen sich die Moleküle, desto häufiger und heftiger prallen sie auch an die Wände des Behälters, und desto größer ist damit der nach außen gerichtete Druck, den sie auf die Wände ausüben. Nehmen wir an, die Moleküle seien anfangs alle durch eine Zwischenwand auf die linke Behälterseite eingegrenzt. Wenn man die Zwischenwand entfernt, werden sich die Moleküle in der Regel ausbreiten und sich über beide

Behälterhälften verteilen. Etwas später könnten sie sich zufällig alle in der rechten oder wieder in der linken Hälfte befinden, doch es ist viel wahrscheinlicher, dass sich eine im Großen und Ganzen gleiche Anzahl von Molekülen in beiden Hälften befindet. Ein solcher Zustand ist weniger geordnet – oder ungeordneter – als der ursprüngliche Zustand, bei dem sich alle Moleküle in der einen Hälfte befanden. Deshalb sagt man, dass die Entropie des Gases zugenommen habe. Ähnlich können wir auch mit zwei Behältern beginnen: Der eine enthält Sauerstoff-, der andere Stickstoffmoleküle. Wenn man die beiden Behälter miteinander verbindet und die Zwischenwand entfernt, beginnen sich die Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle zu mischen. Nach einiger Zeit wäre der wahrscheinlichste Zustand eine weitgehend gleichmäßige Mischung der Moleküle in beiden Behältern. Dieser Zustand wäre weniger geordnet und besäße infolgedessen eine größere Entropie als der ursprüngliche Zustand der beiden getrennten Behälter.

Die Geltung des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik unterscheidet sich ein wenig von den anderen physikalischen Gesetzen, etwa des Newtonschen Gravitationsgesetzes, weil er nicht immer, sondern nur in den allermeisten Fällen zutrifft. Die Wahrscheinlichkeit, dass alle Gasmoleküle in unserem ersten Behälter zu einem späteren Zeitpunkt in einer Hälfte des Behälters angetroffen werden, beträgt zwar eins zu vielen Billionen, aber ausschließen lässt sich dieser Fall nicht. Doch wenn ein Schwarzes Loch in der Nähe ist, scheint es eine sehr viel einfachere Möglichkeit zu geben, gegen

den Zweiten Hauptsatz zu verstoßen: Man braucht nur etwas Materie mit hoher Entropie, zum Beispiel einen Behälter mit Gas, in das Schwarze Loch zu werfen. Die Gesamtentropie außerhalb des Schwarzen Loches würde abnehmen. Man könnte natürlich sagen, dass die Gesamtentropie, einschließlich der Entropie im Schwarzen Loch, nicht abgenommen hätte – aber da es keine Möglichkeit gibt, in das Schwarze Loch hineinzublicken, können wir nicht sehen, wie viel Entropie die Materie im Innern hat. Deshalb wäre es schön, wenn ein draußen befindlicher Beobachter anhand irgendeiner Eigenschaft des Schwarzen Loches etwas über seine Entropie aussagen könnte, die zunehmen müsste, wenn Entropie enthaltende Materie hineinfiele. Ausgehend von der erwähnten Entdeckung, dass die Fläche des Ereignishorizontes zunimmt, wenn Materie ins Schwarze Loch fällt, schlug Jacob Bekenstein, ein Doktorand in Princeton, vor, die Fläche des Ereignishorizontes als ein Maß für die Entropie des Schwarzen Loches anzusehen: Wenn Materie mit einem bestimmten Maß an Entropie in das Schwarze Loch falle, erweitere sich die Fläche des Ereignishorizontes, sodass sich die Summe aus der Entropie der Materie außerhalb der Schwarzen Löcher und aus der Fläche ihrer Ereignishorizonte niemals verringere.

Durch diese Hypothese schien die Gültigkeit des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik für die meisten Situationen gewahrt zu bleiben. Doch sie hatte einen fatalen Fehler. Wenn ein Schwarzes Loch Entropie besitzt, dann sollte es auch eine Temperatur

haben. Nun muss aber ein Körper mit einer bestimmten Temperatur pro Zeiteinheit eine bestimmte Menge an Strahlung abgeben. Wir wissen alle aus der alltäglichen Erfahrung, dass sich ein Feuerhaken, wenn wir ihn lange genug in ein Feuer halten, zur Rotglut erhitzt und Strahlung abgibt. Auch Körper mit niedrigeren Temperaturen emittieren Strahlung: Nur bemerken wir sie in der Regel nicht, weil die Strahlungsmenge zu gering ist. Diese Strahlung ist erforderlich, um eine Verletzung des Zweiten Hauptsatzes zu vermeiden. Schwarze Löcher müssten also Strahlung abgeben, doch definitionsgemäß sind sie Objekte, die gar nichts emittieren. So hatte es den Anschein, als ließe sich die Fläche des Ereignishorizontes nicht als seine Entropie auffassen. 1972 veröffentlichte ich zusammen mit Brandon Carter und einem amerikanischen Kollegen, Jim Bardeen, einen Artikel, in dem wir darauf hinwiesen, dass es bei allen Ähnlichkeiten zwischen der Entropie und der Fläche des Ereignishorizontes eben dieses unausweichliche Problem gebe. Ich muss zugeben, dass dieser Artikel zumindest teilweise auf meine Verärgerung über Bekenstein zurückging, der, wie ich fand, meine Entdeckung von der Zunahme der Fläche des Ereignishorizonts falsch verwendet hatte. Indes, am Ende stellte sich heraus, dass er im Grunde genommen recht hatte, wenn auch in einer Art und Weise, mit der er sicherlich nicht gerechnet hatte.

Bei einem Aufenthalt in Moskau im September 1973 erörterte ich die Probleme Schwarzer Löcher mit Jakow Seldowitsch und Alexander Starobinski, zwei führenden

sowjetischen Wissenschaftlern auf diesem Gebiet. Sie überzeugten mich davon, dass rotierende Schwarze Löcher nach der Unschärferelation der Quantenmechanik Teilchen hervorbringen und emittieren müssen. Physikalisch leuchtete mir ihre Argumentation ein, doch die mathematische Methode, mit der sie die Emission errechneten, gefiel mir nicht. Deshalb machte ich mich auf die Suche nach einem besseren mathematischen Verfahren, das ich schließlich Ende November 1973 in einem informellen Seminar in Oxford vorstellte. Damals hatte ich noch nicht berechnet, wie viel Strahlung tatsächlich emittiert würde. Ich erwartete, dieselbe Strahlung vorzufinden, die Seldowitsch und Starobinski für rotierende Schwarze Löcher vorhergesagt hatten. Doch als ich die Berechnungen durchführte, stellte ich zu meiner Überraschung und meinem Ärger fest, dass auch nichtrotierende Schwarze Löcher offensichtlich Teilchen in steter Menge hervorbringen und emittieren. Zunächst glaubte ich, die errechnete Emission zeige, dass einige der von mir verwendeten Näherungen nicht richtig seien. Ich befürchtete, wenn Bekenstein dieses Resultat zu Ohren käme, würde er es als weiteres Argument zur Untermauerung seiner Hypothese über die Entropie Schwarzer Löcher verwenden, die mir noch immer nicht zusagte. Doch je mehr ich darüber nachdachte, desto zutreffender schienen mir die Näherungen zu sein. Endgültig überzeugt davon, dass die Emission real sei, war ich, als ich feststellte, dass das Spektrum der emittierten Teilchen genau dem Emissionsspektrum eines heißen Körpers entspricht und dass das Schwarze

Loch Teilchen in genau der Menge emittiert, die erforderlich ist, um Verstöße gegen den Zweiten Hauptsatz zu vermeiden. Seither sind die Berechnungen in verschiedener Form von anderen Wissenschaftlern wiederholt worden. Sie bestätigen alle, dass ein Schwarzes Loch Teilchen und Strahlung aussenden müsste, als wäre es ein heißer Körper, wobei die Temperatur lediglich von der Masse des Schwarzen Loches abhängt: Je größer die Masse, desto geringer die Temperatur.

Wie ist es möglich, dass ein Schwarzes Loch Teilchen zu emittieren scheint, wo wir doch wissen, dass seinem Ereignishorizont nichts zu entrinnen vermag? Die Antwort liefert uns die Quantentheorie! Die Teilchen stammen nicht aus dem Innern des Schwarzen Loches, sondern aus dem »leeren« Raum unmittelbar außerhalb des Ereignishorizonts. Das ist folgendermaßen zu verstehen: Was wir uns als »leeren« Raum vorstellen, kann nicht völlig leer sein, weil dann alle Felder, also etwa das elektromagnetische und das Gravitationsfeld, exakt gleich Null sein müssten. Doch mit dem Wert eines Feldes und seiner zeitlichen Veränderung verhält es sich wie mit der Position und Geschwindigkeit eines Teilchens. Aus der Unschärferelation folgt: Je genauer man eine dieser Größen kennt, desto weniger kann man über die andere aussagen. Deshalb kann das Feld im leeren Raum nicht genau Null sein, weil es dann einen exakten Wert (Null) und eine exakte Änderungsrate (ebenfalls Null) hätte. Es muss ein bestimmtes Mindestmaß an Ungewissheit oder Quantenfluktuationen im Wert des Feldes bleiben. Man kann sich diese Fluktua-

tionen als Teilchenpaare des Lichts oder der Gravitation vorstellen, die irgendwann zusammen erscheinen, sich trennen, abermals zusammenkommen und sich gegenseitig vernichten. Diese Teilchen sind »virtuell«, wie die Partikel, die die Gravitationskraft der Sonne übertragen: Im Gegensatz zu realen Teilchen kann man sie nicht direkt mit einem Teilchendetektor beobachten. Doch ihre indirekten Auswirkungen – zum Beispiel kleine Veränderungen in der Energie von Elektronenbahnen in Atomen – lassen sich sehr wohl messen und stimmen bemerkenswert genau mit den theoretischen Vorhersagen überein. Die Unschärferelation sagt ebenfalls voraus, dass es ähnliche virtuelle Paare bei Materienteilchen gibt, etwa den Elektronen oder Quarks. In diesem Falle ist jedoch ein Element des Paares ein Teilchen und das andere ein Antiteilchen (die Antiteilchen des Lichts und der Gravitation gleichen ihren Teilchen).

Da Energie nicht aus nichts entstehen kann, wird der eine Partner in einem Teilchen-Antiteilchen-Paar positive und der andere negative Energie besitzen. Das Teilchen mit negativer Energie ist zu einem kurzlebigen Dasein als virtuelles Teilchen verdammt, weil reale Teilchen normalerweise immer positive Energie besitzen. Deshalb muss es sich seinen Partner suchen und sich mit ihm zusammen vernichten. Doch ein reales Teilchen besitzt in der Nähe eines massereichen Körpers weniger Energie als in weiter Entfernung von ihm, weil Energie erforderlich ist, es gegen die Massenanziehung des Körpers auf Distanz zu halten. Normalerweise wäre die Energie des Teilchens noch immer positiv, doch das

Gravitationsfeld im Innern des Schwarzen Loches ist so stark, dass dort sogar ein reales Teilchen negative Energie aufweisen kann. So kann also ein virtuelles Teilchen mit negativer Energie in ein Schwarzes Loch fallen und zu einem realen Teilchen oder Antiteilchen werden. In diesem Falle braucht es sich nicht mehr mit seinem Partner zu vernichten. Sein verwaister Partner kann ebenfalls in das Schwarze Loch fallen, oder, da er positive Energie besitzt, als reales Teilchen oder Antiteilchen der Nähe des Schwarzen Loches entrinnen (Abb. 25). Ein entfernter Beobachter wird den Eindruck gewinnen, das Teilchen sei vom Schwarzen Loch emittiert worden. Je kleiner das Schwarze Loch, desto kürzer die Strecke, die das Teilchen mit negativer Energie zurückzulegen hat, um ein reales Teilchen zu werden, und desto höher also die Emissionsrate und damit die scheinbare Temperatur des Schwarzen Loches.

Die Teilchen mit negativer Energie, die in das Schwarze Loch hineinströmten, würden die positive Energie der abgegebenen Strahlung aufwiegen. Nach der Einsteinschen Gleichung $E = mc^2$ (wobei E die Energie ist, m die Masse und c die Lichtgeschwindigkeit) ist die Energie der Masse proportional. Fließt negative Energie ins Schwarze Loch, verringert sich infolgedessen seine Masse. In dem Maße, wie das Schwarze Loch an Masse verliert, wird die Fläche seines Ereignishorizontes kleiner. Doch diese Entropieeinbuße des Schwarzen Loches wird mehr als ausgeglichen durch die Entropie der abgegebenen Strahlung, sodass der Zweite Hauptsatz zu keinem Zeitpunkt außer Kraft gesetzt wird.

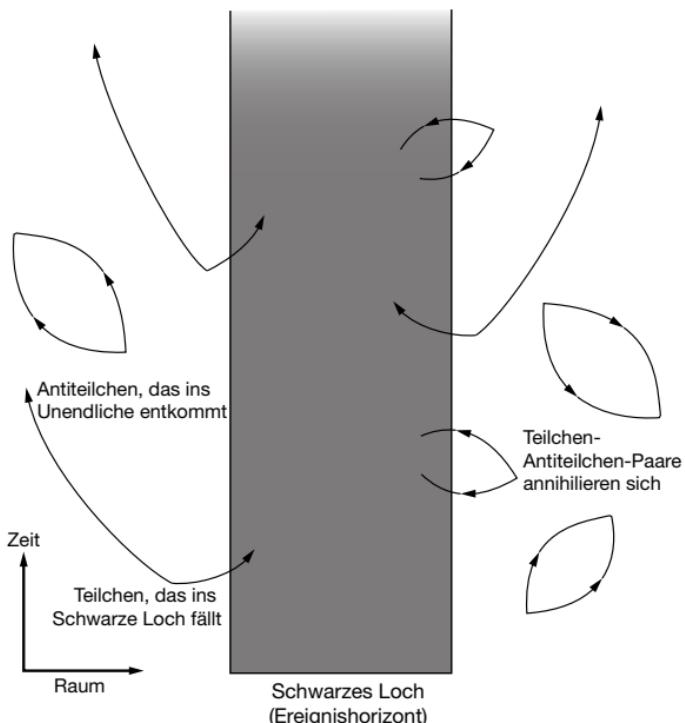


Abbildung 25

Ferner gilt: Je geringer die Masse des Schwarzen Loches, desto höher die Temperatur. In dem Maße also, wie das Schwarze Loch an Masse verliert, nehmen seine Temperatur und Strahlungsleistung zu, sodass die Masse noch rascher verlorengeht. Was geschieht, wenn die Masse des Schwarzen Loches schließlich extrem klein wird, ist nicht ganz klar; höchstwahrscheinlich aber würde es in einem gewaltigen Strahlungsausbruch, dem Äquivalent von vielen Millionen H-Bombenexplosionen, endgültig verschwinden.

Ein Schwarzes Loch, dessen Masse das Mehrfache der

Sonnenmasse aufwiese, hätte nur eine Temperatur von einem zehnmillionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt. Das ist weitaus weniger als die Temperatur der Mikrowellenstrahlung, die das Universum erfüllt (ungefähr 2,7 Grad über dem absoluten Nullpunkt), sodass solche Schwarzen Löcher sogar weniger Strahlung abgeben als absorbieren würden. Wenn es dem Universum bestimmt ist, seine Expansion ewig fortzusetzen, wird die Temperatur der Mikrowellenstrahlung schließlich unter die eines solchen Schwarzen Loches absinken, das daraufhin anfangen wird, an Masse zu verlieren. Aber auch dann noch wäre die Temperatur so niedrig, dass es ungefähr eine Million Millionen Jahren (eine 1 mit 66 Nullen) dauern würde, bevor das Schwarze Loch vollständig verdampft wäre. Dieser Zeitraum ist sehr viel länger als das Alter des Universums, das lediglich zehn bis zwanzig Milliarden Jahre (eine 1 oder 2 mit zehn Nullen) vorzuweisen hat. Andererseits könnte es, wie im vorigen Kapitel dargelegt, urzeitliche Schwarze Löcher mit sehr viel geringerer Masse geben, die in sehr frühen Stadien des Universums durch den Zusammensturz von Unregelmäßigkeiten entstanden sind. Solche Schwarzen Löcher würden sehr viel höhere Temperaturen aufweisen und weit intensivere Strahlungen abgeben. Ein urzeitliches Schwarzes Loch mit einer Anfangsmasse von einer Milliarde Tonnen hätte eine Lebenszeit, die ungefähr dem Alter des Universums entspräche. Urzeitliche Schwarze Löcher mit noch kleineren Anfangsmassen hätten sich

bereits verflüchtigt, Löcher mit etwas größerer Ausgangsmasse würden noch immer Strahlung in Form von Röntgen- und Gammastrahlen emittieren. Diese Röntgen- und Gammastrahlen gleichen Lichtwellen, nur dass sie wesentlich kürzere Wellenlängen haben. Solche Löcher wären kaum als *schwarz* zu bezeichnen – sie wären *weißglühend* und strahlten Energie in der Größenordnung von ungefähr zehntausend Megawatt ab.

Ein Einziges dieser Schwarzen Löcher könnte zehn große Kraftwerke versorgen, vorausgesetzt, es wäre möglich, seine Energie nutzbar zu machen. Das wäre allerdings ziemlich schwierig: Das Schwarze Loch hätte die Masse eines Berges, zusammengedrängt auf weniger als ein Millionstel eines millionstel Kubikzentimeters – die Größe eines Atomkerns! Brächte man eines dieser Schwarzen Löcher auf die Erdoberfläche, so gäbe es kein Halten: Es würde durch den Boden zum Mittelpunkt der Erde stürzen, in einer Pendelbewegung im Erdinnern hin- und herschwingen und schließlich im Erdmittelpunkt zur Ruhe kommen. Die einzige Möglichkeit, die von einem solchen Schwarzen Loch abgestrahlte Energie zu nutzen, bestünde also darin, es in eine Umlaufbahn um die Erde zu bringen – und die einzige Möglichkeit, es in eine solche Umlaufbahn zu bringen, bestünde darin, die Anziehungskraft einer großen Masse zu nutzen, die man vor ihm herziehen müsste, wie man einem Esel eine Wurzel vor die Nase hält. Das hört sich nicht gerade nach einem praktikablen Vorschlag an – zumindest nicht für die nächste Zukunft.

Doch auch wenn wir die Emission dieser urzeitlichen Schwarzen Löcher nicht nutzen können – welche Aussichten haben wir, sie zu beobachten? Wir könnten nach den Gammastrahlen Ausschau halten, die sie während des größten Teils ihrer Lebenszeit abgeben. Zwar wäre die Strahlung der meisten dieser Löcher sehr schwach, weil sie sich in großer Entfernung befänden, doch die Summe ihrer Strahlungen könnte nachweisbar sein. Tatsächlich beobachten wir eine solche Gamma-Hintergrundstrahlung: Abbildung 26 zeigt, wie sich die beobachtete Intensität mit verschiedenen Frequenzen (der Wellenzahl pro Sekunde) verändert. Doch diese Hintergrundstrahlung könnte auch – und das ist sogar sehr wahrscheinlich – durch andere Prozesse als durch urzeitliche Schwarze Löcher entstanden sein. Die gestrichelte Linie in Abbildung 26 zeigt, wie sich die Intensität mit der Frequenz von Gammastrahlen verändern müsste, die urzeitliche Schwarze Löcher abgäben, wenn von ihnen im Durchschnitt dreihundert pro Kubiklichtjahr vorhanden wären. So lässt sich feststellen, dass die Beobachtung des Gammastrahlenhintergrunds keinen *positiven* Anhaltspunkt für das Vorhandensein urzeitlicher Schwarzer Löcher liefert, doch sie zeigt, dass es im Durchschnitt nicht mehr als dreihundert solcher Löcher pro Kubiklichtjahr des Universums geben kann. Dieser Grenzwert bedeutet, dass die urzeitlichen Schwarzen Löcher höchstens ein Millionstel der Materie im Universum ausmachen können.

Wenn urzeitliche Schwarze Löcher so selten sind, so scheint die Chance gering zu sein, dass eines sich in

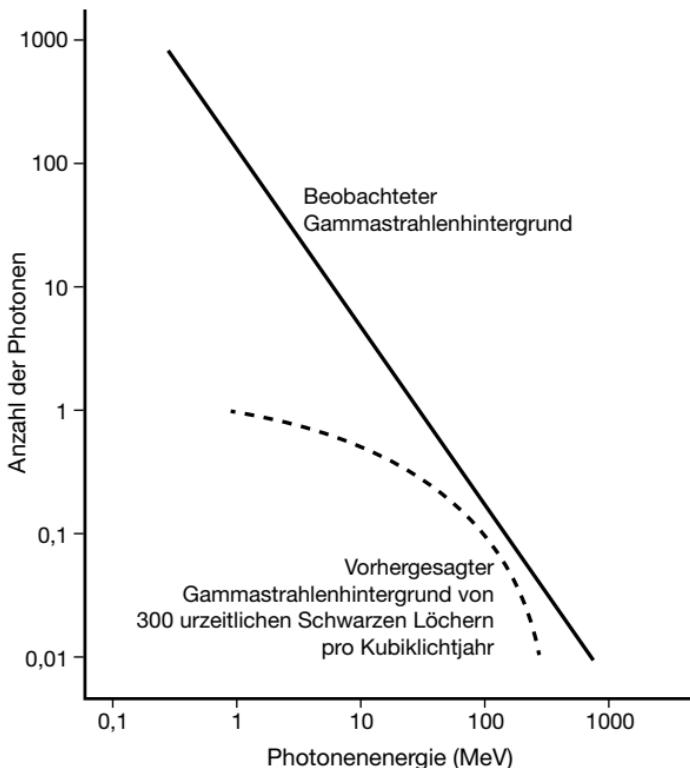


Abbildung 26

hinreichender Nähe zu uns befindet, um von uns als individuelle Gammastrahlenquelle beobachtet zu werden. Doch da die Gravitation die urzeitlichen Schwarzen Löcher in die Nähe von Materie ziehen würde, müssten sie sehr viel häufiger in Galaxien und ihrem Umfeld vorkommen. Folglich können wir dem Gammastrahlenspektrum zwar entnehmen, dass es im Durchschnitt nicht mehr als dreihundert urzeitliche Schwarze Löcher pro Kubiklichtjahr geben kann, er sagt aber nichts über die Häufigkeit ihres Vorkommens in unserer eigenen

Galaxie aus. Wären sie beispielsweise eine Million mal so häufig, wie es der Durchschnittswert angibt, dann würde das nächste Schwarze Loch wahrscheinlich etwa eine Milliarde Kilometer von der Erde entfernt sein, ungefähr so weit wie Pluto, der fernste der bekannten Planeten. Auch auf eine solche Distanz wäre es noch immer sehr schwer, die stetige Emission eines Schwarzen Loches zu entdecken – selbst wenn sie zehntausend Megawatt betrüge. Um ein urzeitliches Schwarzes Loch zu beobachten, müsste man innerhalb eines angemessenen Zeitraums, etwa einer Woche, etliche Gammastrahlenquanten aus derselben Richtung entdecken. Andernfalls könnten sie einfach Teil des Hintergrunds sein. Doch aufgrund des Planckschen Quantenprinzips wissen wir, dass jedes Gammaquant über eine sehr große Energie verfügt, weil Gammastrahlen extrem hohe Frequenzen haben, sodass es nicht vieler Quanten bedürfte, um selbst zehntausend Megawatt abzustrahlen. Und um diese wenigen aus einer Entfernung wie der von Pluto eintreffenden Strahlen zu beobachten, bräuchte man einen Gammastrahlendetektor, der größer wäre als alle bislang gebauten. Überdies müsste er sich im Weltraum befinden, weil Gammastrahlen nicht in die Atmosphäre eindringen können.

Wenn allerdings ein Schwarzes Loch, das uns so nahe wäre wie Pluto, ans Ende seiner Lebenszeit gelangen und explodieren würde, wäre es natürlich leicht, diesen letzten Strahlenausbruch zu entdecken. Strahlt aber das Schwarze Loch seit zehn oder zwanzig Milliarden Jahren, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass es innerhalb

der nächsten Jahre das Ende seiner Lebenszeit erreicht – und nicht einige Millionen Jahre früher oder später –, wohl ziemlich gering. Will also heute ein Wissenschaftler eine vernünftige Chance haben, eine solche Explosion zu entdecken, bevor ihm die Forschungsmittel ausgehen, muss er eine Möglichkeit finden, jede Explosion innerhalb einer Entfernung von ungefähr einem Lichtjahr zu registrieren. Tatsächlich sind Gammastrahlenausbrüche aus dem All von Satelliten entdeckt worden, die eigentlich nach Verstößen gegen ein Atomwaffen-Teststoppabkommen suchen sollten. Diese Ausbrüche scheinen im Mittel sechzehnmal im Monat stattzufinden und gleichförmig über alle Himmelsrichtungen verteilt zu sein. Das zeigt an, dass die betreffenden Quellen außerhalb des Sonnensystems liegen. Andernfalls wäre nämlich erwarten, dass sie vor allem aus denjenigen Richtungen kommen, die der Ebene der Umlaufbahnen der Planeten entsprechen. Außerdem lässt die gleichförmige Verteilung darauf schließen, dass sich die Quellen entweder in ziemlicher Nähe zu uns innerhalb unserer Galaxis befinden, alternativ außerhalb der Galaxis, bei kosmologischen Abständen. Andernfalls würden sie bevorzugt aus denjenigen Richtungen kommen, die der Scheibenebene der Galaxis entsprechen. Auf kosmologische Distanzen wäre die zur Erklärung der Ausbrüche erforderliche Energie zu hoch, um von kleinen Schwarzen Löchern erzeugt zu werden, doch lägen die Quellen – nach galaktischem Maßstab – in unserer Nähe, könnten es explodierende Schwarze Löcher sein. Mir wäre das sehr lieb, aber ich muss zugeben, dass noch

andere Erklärungen für die Gammastrahlenausbrüche möglich sind, etwa kollidierende Neutronensterne. In den nächsten Jahren sollten uns neue Beobachtungen, vor allem durch Gravitationswellendetektoren wie LIGO, in die Lage versetzen, den Ursprung der Gammastrahlenausbrüche zu entdecken.¹⁰

Selbst wenn die Suche nach urzeitlichen Schwarzen Löchern erfolglos bliebe, was durchaus der Fall sein könnte, so wird sie doch wichtige Einblicke in die sehr frühen Stadien des Universums geben. Wäre das frühe Universum chaotisch oder unregelmäßig oder der Druck der Materie gering gewesen, so hätten Schwarze Löcher in einer Zahl entstehen müssen, die weit über dem Grenzwert läge, den unsere Beobachtungen des Gammastrahlenspektrums ergeben haben. Nur wenn das frühe Universum bei hohem Druck sehr einheitlich und gleichförmig gewesen ist, lässt sich erklären, warum es so wenige urzeitliche Schwarze Löcher gibt, dass man sie nicht beobachten kann.

Die Idee, dass Schwarze Löcher strahlen, war das erste Beispiel für eine Vorhersage, die wesentlich auf *beiden* großen Theorien unseres Jahrhunderts beruhte – der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik. Anfangs stieß dieser Gedanke auf heftigen Widerstand, weil er der herrschenden Auffassung widersprach: »Wie kann ein Schwarzes Loch irgendetwas aussenden?« Als ich die Ergebnisse meiner Berechnungen erstmals auf einer Tagung am Rutherford-Appleton Laboratory bei Oxford vorstellte, reagierten die Teilnehmer sehr skeptisch.

tisch. Am Ende meines Vortrags erklärte John G. Taylor vom Londoner Kings College, der Leiter der Sitzung, er halte meine Ausführungen für kompletten Unsinn. Er schrieb sogar einen Artikel in diesem Sinne. Schließlich kamen aber doch die meisten, auch John Taylor, zu der Einsicht, dass Schwarze Löcher wie heiße Körper strahlen müssen, wenn unsere anderen Überlegungen zur Relativitätstheorie und Quantenmechanik zutreffen. Wenn es uns also auch noch nicht gelungen ist, ein urzeitliches Schwarzes Loch zu finden, so sind wir uns doch weitgehend einig, dass es Gamma- und Röntgenstrahlen in erheblichem Ausmaße emittieren würde.

Wenn Schwarze Löcher strahlen, so würde daraus folgen, dass der Gravitationskollaps nicht so endgültig und unwiderruflich ist, wie man einmal geglaubt hat. Fällt ein Astronaut in ein Schwarzes Loch, wird sich dessen Masse vergrößern, doch am Ende wird das Energieäquivalent der zusätzlichen Masse dem Universum in Form von Strahlung zurückgegeben. In gewisser Weise würde der Astronaut also einem »Recycling«-Prozess unterworfen werden. Das wäre jedoch eine sehr kümmerliche Art der Unsterblichkeit, weil für den Astronauten jeder persönliche Zeitbegriff sogleich aufhörte, in dem Augenblick nämlich, da er im Innern des Schwarzen Loches zerrissen würde. Sogar die Art der Teilchen, die das Schwarze Loch schließlich emittierte, würde sich größtenteils von der der Teilchen unterscheiden, aus denen sich der Astronaut zusammensetzte: Als einzige Eigenschaft des Astronauten würde seine Masse oder Energie überleben.

Die Näherungen, die ich zur Ableitung der Emission von Schwarzen Löchern verwendete, sollten geeignet sein, solange die Masse des Schwarzen Loches größer als der Bruchteil eines Gramms ist. Hingegen gelten sie nicht mehr, wenn die Masse am Ende der Lebenszeit des Schwarzen Loches sehr klein werden würde. Am wahrscheinlichsten ist es, dass das Schwarze Loch einfach verschwände, zumindest aus unserer Region des Universums – und mit ihm der Astronaut und jegliche Singularität, die sich möglicherweise im Innern befände, wenn es denn dort tatsächlich eine gibt. Dies war das erste Anzeichen dafür, dass die Quantenmechanik unter Umständen jene Singularitäten beseitigen könnte, die von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt werden. Doch mit den Methoden, die wir 1974 benutzten, konnten wir Fragen wie etwa die, ob Singularitäten in einer Quantentheorie der Gravitation vorkämen, nicht beantworten. Ab 1975 begann ich deshalb, einen geeigneteren Ansatz zur Quantengravitation zu entwickeln, wobei ich von Richard Feynmans Idee der »Summe über alle Möglichkeiten« ausging. In den nächsten beiden Kapiteln werde ich erörtern, welche Konsequenzen dieser Ansatz für den Ursprung und das Schicksal des Universums und seiner Inhalte, zum Beispiel Astronauten, hat. Wir werden sehen, dass die Unschärferelation zwar die Genauigkeit unserer Vorhersagen einschränkt, dass sie aber gleichzeitig die grundsätzliche Unfähigkeit zu irgendwelchen Vorhersagen aufheben könnte, zu der es an einer Raumzeitsingularität kommt.

8

URSPRUNG UND SCHICKSAL DES UNIVERSUMS

Für sich genommen sagte Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie voraus, dass die Raumzeit mit der Singularität des Urknalls beginne und entweder im großen Endkollaps (beim Wiederzusammensturz des gesamten Universums) oder in einer Singularität im Innern eines Schwarzen Loches (beim Zusammensturz einer lokalen Region, etwa eines Sterns) ende. Jegliche Materie, die in das Loch falle, werde an der Singularität zerstört, und nur die Gravitationswirkung ihrer Masse würde draußen noch spürbar sein. Wenn man dagegen Quanteneffekte berücksichtigte, so schien es, als werde die Masse oder Energie der Materie schließlich an das übrige Universum zurückgegeben, während das Schwarze Loch und mit ihm jegliche Singularität in seinem Innern verstrahlte. Könnte die Quantenmechanik ähnlich tiefgreifende Auswirkungen auf die Singularitäten des Urknalls und des großen Endkollapses haben? Was geschieht tatsächlich in den sehr frühen und sehr späten Stadien des Universums, wenn die Gravitationsfelder so

stark sind, dass die Quanteneffekte nicht mehr außer Acht gelassen werden können? Hat das Universum tatsächlich einen Anfang oder ein Ende? Und wenn, wie sehen sie aus?

In den 1970er Jahren habe ich mich vor allem mit Schwarzen Löchern beschäftigt, doch 1981 begann ich mich erneut für den Ursprung und das Schicksal des Universums zu interessieren. Zu diesem Zeitpunkt nahm ich auch an einer Konferenz über Kosmologie teil, die von den Jesuiten im Vatikan veranstaltet wurde. Die katholische Kirche hatte im Falle Galilei einen schlimmen Fehler begangen, als sie eine Frage der Wissenschaft zu entscheiden suchte, indem sie erklärte, die Sonne bewege sich um die Erde. Jahrhunderte später hatte sie nun beschlossen, eine Reihe von Fachleuten einzuladen und sich von ihnen in kosmologischen Fragen beraten zu lassen. Am Ende der Konferenz wurde den Teilnehmern eine Audienz beim Papst gewährt. Er sagte uns, es spreche nichts dagegen, dass wir uns mit der Entwicklung des Universums nach dem Urknall beschäftigten, wir sollten aber nicht den Versuch unternehmen, den Urknall selbst zu erforschen, denn er sei der Augenblick der Schöpfung und damit das Werk Gottes. Ich war froh, dass ihm der Gegenstand des Vortrags unbekannt war, den ich gerade auf der Konferenz gehalten hatte: Die Möglichkeit, dass die Raumzeit endlich sei, aber keine Grenze habe, was bedeuten würde, dass es keinen Anfang, keinen Augenblick der Schöpfung gibt. Ich hatte keine Lust, das Schicksal Galileis zu teilen, mit dem ich mich sehr verbunden fühle,

zum Teil wohl, weil ich genau dreihundert Jahre nach seinem Tod geboren wurde.

Bevor ich erklären kann, wie nach meiner Meinung und der anderer Wissenschaftler die Quantenmechanik den Ursprung und das Schicksal des Universums beeinflussen kann, müssen wir zunächst die allgemein anerkannte Geschichte des Universums gemäß dem sogenannten »Modell des heißen Urknalls« verstehen. Ihm zufolge lässt sich das Universum bis zurück zum Urknall durch ein Friedmann-Modell beschreiben. In solchen Modellen kommt man zu dem Ergebnis, dass mit der Ausdehnung des Universums alle darin enthaltene Materie oder Strahlung abköhlt. (Würde sich die Größe des Universums verdoppeln, so fiele seine Temperatur um die Hälfte.)

Da die Temperatur einfach ein Maß für die durchschnittliche Energie – oder Geschwindigkeit – der Teilchen ist, muss sich die Abkühlung des Universums entscheidend auf die in ihm enthaltene Materie auswirken. Bei sehr hohen Temperaturen würden sich die Teilchen so schnell umherbewegen, dass sie allen auf die nuklearen oder elektromagnetischen Kräfte zurückgehenden Anziehungskräften entgehen könnten, doch mit ihrer Abkühlung wäre zu erwarten, dass sich Teilchen, die einander anziehen, zusammenballten. Mehr noch, von der Temperatur würde es auch abhängen, welche Arten von Teilchen es im Universum gibt. Bei hohen Temperaturen haben Teilchen so viel Energie, dass bei jeder Kollision viele verschiedene Teilchen-Antiteilchen-Paare entstünden, und obwohl einige dieser Teilchen sich im

Zusammentreffen mit ihren Antiteilchen vernichten würden, entstünden sie rascher, als sie sich vernichten könnten. Bei geringeren Temperaturen haben die kollidierenden Teilchen jedoch weniger Energie, sodass sich die Teilchen-Antiteilchen-Paare weniger rasch bilden würden – der Vernichtungsprozess liefe schneller ab als der Entstehungsprozess.

Nach dieser Auffassung hatte das Universum zum Zeitpunkt des Urknalls die Größe Null und war deshalb unendlich heiß. Doch mit der Ausdehnung des Universums musste die Temperatur abnehmen. Eine Sekunde nach dem Urknall war sie auf ungefähr zehn Milliarden Grad gefallen. Das ist etwa das Tausendfache der Temperatur, die im Mittelpunkt der Sonne herrscht. Doch solche Temperaturen werden durchaus bei H-Bomben-explosionen erreicht. Das Universum enthielt zu diesem Zeitpunkt größtenteils Photonen, Elektronen und Neutrinos (extrem leichte Teilchen, die nur von der schwachen Wechselwirkung und der Gravitation beeinflusst werden), deren Antiteilchen sowie einige Protonen und Neutronen. Mit der weiteren Ausdehnung und Abkühlung des Universums musste die Geschwindigkeit, mit der in Zusammenstößen Elektronen-Antielektronen-Paare entstanden, unter die Geschwindigkeit sinken, mit der sie sich vernichteten. Die meisten Elektronen und Antielektronen vernichteten sich gegenseitig und erzeugten dabei Photonen, wobei nur wenige Elektronen übrig blieben. Die Neutrinos und Antineutrinos hingegen zerstörten sich nicht gegenseitig, weil sie mit sich selbst und anderen Teilchen nur in sehr schwacher

Wechselwirkung stehen. Es müsste sie also noch geben. Könnten wir sie beobachten, wäre das ein guter Beweis für die Hypothese vom sehr heißen Frühstadium des Universums. Leider wäre ihre Energie heute zu niedrig, als dass wir sie noch direkt beobachten könnten. Doch wenn die Neutrinos nicht masselos sind, sondern eine kleine eigene Masse besitzen, wie aus einem unbestätigten russischen Experiment aus dem Jahre 1981 hervorgeht,¹¹ dann könnten wir in der Lage sein, sie indirekt zu entdecken: Sie könnten eine Form jener »dunklen Materie« sein, von der schon in einem früheren Kapitel die Rede war, mit hinreichender Gravitationskraft, um die Ausdehnung des Universums zum Stillstand zu bringen und seinen Zusammensturz einzuleiten.

Etwa hundert Sekunden nach dem Urknall war die Temperatur auf etwa eine Milliarde Grad gefallen – die Temperatur im Innern der heißesten Sterne. Bei dieser Temperatur hatten Protonen und Neutronen nicht mehr genügend Energie, um der Anziehungskraft der starken Kernkraft zu entgehen: Sie verbanden sich zu Atomkernen des Deuteriums (des schweren Wasserstoffs), die aus einem Proton und einem Neutron bestehen. Die Deuteriumkerne verbanden sich ihrerseits mit weiteren Protonen und Neutronen zu Heliumkernen, die zwei Protonen und zwei Neutronen enthalten, in einigen seltenen Fällen auch zu den Kernen schwererer Elemente wie Lithium und Beryllium. Es lässt sich errechnen, dass im heißen Urknallmodell ungefähr ein Viertel der Protonen und Neutronen zu Kernen von Helium sowie einer geringen Menge schwerem Wasser-

stoff und anderen Elementen umgewandelt worden wären. Die restlichen Neutronen wären in Protonen, die Kerne gewöhnlicher Wasserstoffatome, zerfallen.

Dieses Bild eines heißen Frühstadiums des Universums wurde erstmals 1948 in einem berühmten Artikel vorgeschlagen, den der Physiker George Gamow gemeinsam mit seinem Studenten Ralph Alpher schrieb. Gamow hatte einen ausgeprägten Sinn für Humor – überredete er doch den Kernphysiker Hans Bethe dazu, als Ko-Autor mitzuwirken. So erschien der Aufsatz unter den Namen »Alpher, Bethe, Gamow«, was eine verblüffende Ähnlichkeit mit den ersten drei Buchstaben des griechischen Alphabets ergab. Wahrhaftig angemessen für eine Arbeit über den Anfang des Universums! Dieser Artikel enthielt die bemerkenswerte Vorhersage, dass aus den sehr heißen Frühstadien des Universums noch heute Strahlung (in Form von Photonen) vorhanden sein müsse, allerdings abgekühlt auf eine Temperatur von nur wenigen Grad über dem absoluten Nullpunkt (-273°C). Genau diese Strahlung wurde von Penzias und Wilson entdeckt. Zu der Zeit, da Alpher, Bethe und Gamow ihren Artikel schrieben, war über die Kernreaktionen von Protonen und Neutronen wenig bekannt. Die Vorhersagen über die Häufigkeiten verschiedener Elemente im frühen Universum waren deshalb ziemlich ungenau. Nachdem man diese Berechnungen jedoch auf der Grundlage neuerer Erkenntnisse wiederholt hat, decken sie sich weitgehend mit unseren Beobachtungen. Im Übrigen lässt sich anders kaum erklären, warum es soviel Helium im Uni-

versum gibt. Deshalb sind wir uns ziemlich sicher, dass wir uns das richtige Bild machen, zumindest für den Zeitraum, der ungefähr eine Sekunde nach dem Urknall beginnt.

Schon wenige Stunden nach dem Urknall dürfte die Entstehung von Helium und anderen Elementen beendet gewesen sein. Und danach setzte das Universum nach unserer Vorstellung eine Million Jahre lang seine Ausdehnungsbewegung einfach fort, ohne dass etwas Nennenswertes geschah. Nachdem die Temperatur schließlich auf ein paar tausend Grad gefallen war und die Elektronen und Kerne nicht mehr genügend Energie hatten, um ihre gegenseitige elektromagnetische Anziehung zu überwinden, begannen sie, sich zu Atomen zu verbinden. In seiner Gesamtheit setzte das Universum seine Ausdehnung und Abkühlung fort, doch in Regionen, deren Dichte etwas über dem Durchschnitt lag, wurde die Expansion durch zusätzliche Gravitationskräfte verlangsamt. Das brachte schließlich die Expansion in einigen Regionen zum Stillstand und leitete eine erneute Zusammenziehung ein. Die Gravitationskräfte der Materie außerhalb der zusammenstürzenden Regionen könnten diese in eine leichte Rotationsbewegung versetzt haben. Je mehr sich die zusammenstürzenden Regionen verdichteten, desto schneller musste ihre Rotation werden – wie Eisläufer sich schneller drehen, wenn sie bei der Pirouette die Arme an den Körper ziehen. Schließlich wurden die Regionen so klein, dass ihre rasche Rotation die Wirkung der Gravitationskraft gerade ausglich. Dies war die Geburt scheibenartig

rotierender Galaxien. Andere Regionen, die nicht in Rotation versetzt wurden, entwickelten sich zu ovalen Objekten, den elliptischen Galaxien. Hier kam der Zusammensturz der Region zum Stillstand, weil einzelne Teile der Galaxie in stabilen Bahnen um das Zentrum kreisen, während die Galaxie selbst nicht rotiert.

Im weiteren Verlauf, so vermutet man, teilte sich das Wasserstoff- und Heliumgas der Galaxien zu kleineren Wolken auf, die unter dem Einfluss der eigenen Schwerkraft zusammenstürzten. Bei ihrer Kontraktion und dem Zusammenstoß der Atome in ihrem Innern stieg die Temperatur des Gases, bis es schließlich so heiß wurde, dass es zu Kernfusionsreaktionen kam. Dadurch wurde weiterer Wasserstoff in Helium umgewandelt, während die freigesetzte Wärme den Druck steigerte, sodass sich die Wolken nicht weiter zusammenzogen. Als Sterne wie unsere Sonne blieben sie in diesem Zustand lange Zeit stabil, wobei sie Wasserstoff zu Helium verbrannten und die resultierende Energie in Form von Wärme und Licht abstrahlten. Sterne mit größeren Massen müssen mehr Hitze entwickeln, um ihre stärkere Schwerkraft auszugleichen. Dadurch laufen ihre Kernfusionsreaktionen so viel rascher ab, dass sie ihren Wasserstoff bereits in hundert Millionen Jahren verbraucht haben. Sie ziehen sich dann ein wenig zusammen, werden noch heißer und beginnen, das Helium in schwerere Elemente wie Kohlen- oder Sauerstoff umzuwandeln. Dadurch wird jedoch nicht viel mehr Energie freigesetzt, sodass es nach geltender Auffassung zu einer Krise kommen muss, wie sie im Kapitel über die

Schwarzen Löcher beschrieben ist. Was dann geschieht, ist nicht ganz klar; wahrscheinlich stürzen die Zentralregionen des Sterns zu einem sehr dichten Zustand zusammen, also zu einem Neutronenstern oder einem Schwarzen Loch. Man nimmt an, dass die äußeren Regionen des Sterns manchmal in einer gewaltigen Explosion fortgeschleudert werden. Solche Explosionen, Supernovae genannt, überstrahlen alle anderen Sterne in der Galaxie. Einige der schwereren Elemente, die der Stern gegen Ende seines Lebens gebildet hat, werden in das Gas der Galaxie zurückgeworfen und sind ein Teil des Rohmaterials für die nächste Sternengeneration. Unsere Sonne enthält etwa zwei Prozent dieser schwereren Elemente, weil sie ein Stern der zweiten oder dritten Generation ist, der sich vor etwa fünf Milliarden Jahren aus einer rotierenden Gaswolke mit den Überresten früherer Supernovae gebildet hat. Der größte Teil dieses Gases entwickelte sich zur Sonne oder wurde fortgeschleudert, doch ein bescheidener Anteil der schwereren Elemente schloss sich zu den Körpern zusammen, die heute, wie die Erde, die Sonne umkreisen.

Die Erde war ursprünglich sehr heiß und ohne Atmosphäre. Im Laufe der Zeit kühlte sie ab und erhielt durch die Gasemissionen des Gesteins eine Atmosphäre. In dieser frühen Atmosphäre hätten wir nicht leben können. Sie enthielt keinen Sauerstoff, sondern viele Gase, die für uns giftig sind, zum Beispiel Schwefelwasserstoff (das Gas, dem verdorbene Eier ihren unangenehmen Geruch verdanken). Es gibt jedoch primitive Formen des Lebens, die unter solchen Bedingungen existieren

können. Man nimmt an, dass sie sich im Meer entwickelt haben, möglicherweise dank Zufallsverbindungen von Atomen zu größeren Strukturen, sogenannten Makromolekülen, die in der Lage waren, andere Atome im Meer zu ähnlichen Strukturen zusammenzusetzen. Auf diese Art könnten sie sich reproduziert und vermehrt haben. In einigen Fällen wird es zu Reproduktionsfehlern gekommen sein. Die meisten Fehler dürften dazu geführt haben, dass sich die neuen Makromoleküle nicht mehr reproduzieren konnten und schließlich verschwanden. Doch einige wenige Fehler haben vermutlich neue Makromoleküle hervorgebracht, die zu noch besserer Reproduktion fähig waren. Sie waren deshalb im Vorteil und haben allmählich die ursprünglichen Makromoleküle ersetzt. Auf diese Weise wurde ein Evolutionsprozess eingeleitet, der zur Entwicklung immer komplizierterer reproduktionsfähiger Organismen führte. Die ersten primitiven Lebensformen haben verschiedene Stoffe aufgenommen, unter anderem Schwefelwasserstoff, und Sauerstoff freigesetzt. Dieser Austausch veränderte die Atmosphäre allmählich, bis sie die Zusammensetzung annahm, die wir heute vorfinden und die die Entwicklung höherer Lebensformen wie die der Fische, Reptilien, Säugetiere und schließlich des Menschen ermöglichte.

Dieses Bild eines Universums, das in sehr heißem Zustand begann und mit seiner Ausdehnung allmählich abkühlte, stimmt mit allen heute vorliegenden Beobachtungen überein. Trotzdem lässt es noch einige wichtige Fragen offen:

1. Warum war das frühe Universum so heiß?
2. Warum ist das Universum, großräumig gesehen, so gleichförmig? Warum sieht es von allen Punkten des Raumes und in alle Richtungen gleich aus? Vor allem: Warum ist die Temperatur des Mikrowellen-Hintergrundstrahlung nahezu gleich, wenn wir in verschiedene Richtungen blicken? Es ist, als stellte man einer Reihe von Studenten eine Prüfungsfrage. Wenn sie alle eine gleichlautende Antwort geben, kann man ziemlich sicher sein, dass sie sich irgendwie verständigt haben. Doch in dem oben beschriebenen Modell hätte das Licht nicht genügend Zeit gehabt, von einer fernliegenden Region in andere zu gelangen, auch wenn die Regionen im frühen Universum dicht zusammenlagen. Nach der Relativitätstheorie kann keinerlei Information von einer Region in die andere gelangen, wenn dies dem Licht nicht möglich ist. Die verschiedenen Regionen des frühen Universums können also nicht alle die gleiche Temperatur gehabt haben, wenn sie nicht aus irgendeinem ungeklärten Grund alle mit der gleichen Temperatur begonnen haben.
3. Warum hat das Universum fast genau mit der kritischen Expansionsgeschwindigkeit begonnen, mittels derer sich die Modelle, die irgendwann wieder in sich zusammenstürzen, von jenen Modellen unterscheiden lassen, die ewig expandieren, sodass es sich heute – zehn Milliarden Jahre später – noch immer fast genau mit der kritischen Geschwindigkeit ausdehnt? Wäre die Expansionsgeschwindigkeit eine

Sekunde nach dem Urknall nur um ein Hunderttausendmillionstel Millionstel kleiner gewesen, so wäre das Universum wieder in sich zusammengefallen, bevor es seine gegenwärtige Größe erreicht hätte.

4. Obwohl das Universum im großen Maßstab so gleichförmig und homogen ist, enthält es lokale Unregelmäßigkeiten, etwa Sterne und Galaxien. Man nimmt an, dass diese sich im frühen Universum durch kleine Unterschiede in der Dichte zwischen einzelnen Regionen entwickelt haben. Welchen Ursprung haben diese Dichtefluktuationen?

Mit der Allgemeinen Relativitätstheorie allein lassen sich diese Eigenschaften nicht erklären und diese Fragen nicht beantworten, weil nach der Vorhersage dieser Theorie das Universum mit der Urknall-Singularität im Zustand unendlicher Dichte begann. An der Singularität büßen die Allgemeine Relativitätstheorie und alle anderen physikalischen Gesetze ihre Gültigkeit ein: Man kann nicht vorhersagen, was sich aus der Singularität entwickelt. Wie oben dargestellt, kann man deshalb den Urknall und alle Ereignisse davor aus der Theorie ausklammern, weil sie sich auf das, was wir beobachten, nicht auswirken können. Unter diesen Umständen *hätte* die Raumzeit eine Grenze – einen Anfang mit dem Urknall.

Nun scheint die Wissenschaft aber eine Reihe von Gesetzen entdeckt zu haben, die uns innerhalb der von der Unschärferelation gezogenen Grenzen mitteilen, wie sich das Universum entwickelt, wenn wir seinen Zustand zu irgendeinem Zeitpunkt kennen. Diese Ge-

setze mögen ursprünglich von Gott gefügt worden sein, doch anscheinend hat er seither die Entwicklung des Universums diesen Gesetzen überlassen und sich selbst aller Eingriffe enthalten. Aber was für einen Zustand und was für eine Anordnung hat er ursprünglich für das Universum gewählt? Welche »Randbedingungen« lagen am Anfang der Zeit vor?

Eine mögliche Antwort wäre, dass Gott den Anfangszustand des Universums aus Gründen gewählt hat, von denen wir nicht hoffen können, sie zu verstehen. Das hätte natürlich in der Macht eines allmächtigen Wesens gelegen. Doch wenn er den Anfang auf eine für uns so unverständliche Weise gemacht hätte, warum hätte es ihm dann gefallen sollen, die weitere Entwicklung des Universums von Gesetzen regieren zu lassen, die wir verstehen können? Die ganze Geschichte der Wissenschaft ist von der allmählichen Erkenntnis geprägt, dass die Ereignisse nicht auf beliebige Weise ablaufen, sondern dass ihnen eine bestimmte Ordnung zugrunde liegt, die göttlichen Ursprungs sein mag oder auch nicht. Da ergibt sich ganz selbstverständlich der Schluss, dass diese Ordnung nicht nur für die Gesetze gilt, sondern auch für jene Grenze der Raumzeit, die den Anfangszustand des Universums markiert. Möglicherweise gibt es eine große Zahl von Modellen des Universums mit verschiedenen Anfangsbedingungen, die alle den Naturgesetzen gehorchen. Es muss irgendein Prinzip geben, anhand dessen sich ein Anfangszustand – und damit ein Modell – als angemessene Darstellung unseres Universums bestimmen lässt.

Eine dieser Möglichkeiten trägt die Bezeichnung chaotische Randbedingungen. Sie setzt implizit voraus, dass das Universum entweder räumlich unbegrenzt ist oder dass es unendlich viele Universen gibt. Unter chaotischen Randbedingungen ist die Wahrscheinlichkeit, irgendeine bestimmte Region des Raumes in irgendeiner gegebenen Anordnung anzutreffen, in gewissem Sinne genauso groß wie die Wahrscheinlichkeit, sie in irgendeiner anderen Anordnung vorzufinden: Der Anfangszustand des Universums bleibt dem reinen Zufall überlassen. Das würde heißen, dass das frühe Universum wahrscheinlich sehr chaotisch und unregelmäßig gewesen wäre, weil für das Universum viel mehr chaotische und ungeordnete Zustände denkbar sind als gleichmäßige und geordnete. (Wenn jede Anordnung gleich wahrscheinlich ist, so ist eher damit zu rechnen, dass das Universum in einem chaotischen und ungeordneten Zustand begonnen hat, einfach weil die Zahl dieser Zustände soviel größer ist.) Es ist schwer vorstellbar, wie derartige chaotische Anfangsbedingungen ein Universum hervorgebracht haben sollen, das in großem Maßstab so einheitlich und regelmäßig ist wie das unsrige. Auch müsste man davon ausgehen, dass die Dichtefluktuationen zur Bildung einer viel größeren Zahl von urzeitlichen Schwarzen Löchern geführt hätten, als der obere Grenzwert vermuten lässt, der aufgrund der Beobachtung des Gammastrahlenhintergrunds festgelegt wurde.

Wenn das Universum tatsächlich räumlich unbegrenzt ist oder es unendlich viele Universen gibt, so

würden wahrscheinlich irgendwo einige große Regionen existieren, die wirklich gleichmäßig und einheitlich begonnen haben. Es verhält sich ähnlich wie in dem bekannten Beispiel der Affen, die auf Schreibmaschinen herumhämmern – was sie schreiben, wird größtenteils Unsinn sein, doch in ganz seltenen Fällen werden sie durch reinen Zufall ein Shakespearisches Sonett zusammentippen. Könnte es im Falle des Universums der Zufall nicht ebenso wollen, dass wir in einer dieser einheitlichen und gleichförmigen Regionen leben? Auf den ersten Blick mag dies sehr unwahrscheinlich erscheinen, weil solche gleichmäßigen Regionen gegenüber den chaotischen und unregelmäßigen ungleich seltener vorkommen. Doch nehmen wir an, es könnten sich nur in den gleichmäßigen Regionen Galaxien und Sterne bilden und Bedingungen finden, die geeignet wären für die Entwicklung so komplizierter reproduktionsfähiger Geschöpfe, wie wir es sind – fähig zu der Frage: »Warum ist das Universum so gleichmäßig?« Dies ist ein Beispiel für die Anwendung dessen, was als anthropisches Prinzip bezeichnet wird und sich zusammenfassen lässt in dem Satz: »Wir sehen das Universum, wie es ist, weil wir existieren.«

Es gibt zwei Spielarten des anthropischen Prinzips, eine schwache und eine starke. Nach dem schwachen anthropischen Prinzip werden in einem Universum, das groß oder unendlich im Raum und/oder in der Zeit ist, die für die Entwicklung intelligenten Lebens erforderlichen Bedingungen nur in bestimmten, räumlich und zeitlich begrenzten Regionen erfüllt sein. Es sollte die

intelligenten Wesen, die diese Regionen bewohnen, deshalb nicht überraschen, wenn sie feststellten, dass ihr Abschnitt des Universums den Bedingungen gerecht werde, die für ihre Existenz notwendig sind. Das ähnelt ein wenig der Situation eines reichen Menschen, der keine Armut sieht, weil er in einem wohlhabenden Viertel wohnt.

Ein Beispiel für die Anwendung des schwachen anthropischen Prinzips ist die Art und Weise, wie man »erklärt«, dass der Urknall vor ungefähr zehn Milliarden Jahren stattfand: Es dauert eben so lange, bis sich intelligente Wesen entwickeln. Wie oben geschildert, musste sich zunächst eine erste Sternengeneration bilden. Diese Sterne verwandelten einen Teil des ursprünglichen Wasserstoffs und Heliums in Elemente wie Kohlen- und Sauerstoff, aus denen wir bestehen. Die Sterne explodierten als Supernovae, und aus ihren Überresten entstanden andere Sterne und Planeten, unter ihnen auch unser Sonnensystem, das ungefähr fünf Milliarden Jahre alt ist. Die Ersten ein oder zwei Milliarden Jahre im Leben der Erde waren zu heiß, als dass sich irgendwelche komplizierten Strukturen hätten entwickeln können. Die restlichen drei Milliarden Jahre benötigte der langsame Prozess der biologischen Evolution, um von den einfachsten Organismen zu Geschöpfen zu gelangen, die fähig sind, die Zeit bis zurück zum Urknall zu messen.

Wohl kaum jemand hätte etwas gegen die Gültigkeit oder Nützlichkeit des schwachen anthropischen Prinzips einzuwenden. Einige gehen jedoch viel weiter und

schlagen eine starke Version des Prinzips vor. Nach dieser Theorie gibt es entweder viele verschiedene Regionen des Universums oder viele verschiedene Universen, jedes mit einem eigenen Urzustand und vielleicht – mit seinem eigenen System von Naturgesetzen. In den meisten dieser Universen sind nach dieser Auffassung die Bedingungen nicht für die Entwicklung komplizierter Organismen geeignet. Nur in wenigen Universen wie dem unseren entwickeln sich intelligente Wesen und fragen sich: »Warum ist das Universum so, wie wir es sehen?« Unter diesen Umständen ist die Antwort einfach: Wäre es anders, wären wir nicht da!

Die Naturgesetze enthalten nach heutigem Wissenstand einige grundlegende Zahlen, etwa die Größe der elektrischen Ladung des Elektrons und das Massenverhältnis von Proton und Elektron. Wir können den Wert dieser Zahlen – zumindest zum gegenwärtigen Zeitpunkt – nicht aus der Theorie ableiten; wir müssen sie den Beobachtungsdaten entnehmen. Mag sein, dass wir eines Tages eine vollständige einheitliche Theorie entdecken, die sie alle vorhersagt, aber es ist auch möglich, dass sich einige von ihnen oder alle von Universum zu Universum oder auch innerhalb eines Universums verändern. Bemerkenswert ist, dass die Werte dieser Zahlen sehr fein darauf abgestimmt zu sein scheinen, dass sie die Entwicklung des Lebens ermöglichen. Wäre beispielsweise die elektrische Ladung des Elektrons nur ein wenig von ihrem tatsächlichen Wert abgewichen, wären die Sterne entweder nicht in der Lage gewesen, Wasserstoff und Helium zu verbrennen oder sie wären nicht

explodiert. Natürlich könnte es ganz fremde, noch nicht einmal von Science-Fiction-Autoren ersonnene Formen intelligenten Lebens geben. Sie sind vielleicht nicht angewiesen auf das Licht eines Sterns wie der Sonne oder auf die schwereren chemischen Elemente, die in Sternen produziert und bei deren Explosion in den Weltraum geschleudert werden. Dennoch scheint es, als ließen die Zahlenwerte, die die Entwicklung intelligenten Lebens ermöglichen, wenig Spielraum. Die meisten Werte würden zur Entstehung von Universen führen, die zwar sehr schön sein, aber niemanden beherbergen könnten, der diese Schönheit bestaunt. Dies kann man entweder als Beweis für den göttlichen Ursprung der Schöpfung und der Naturgesetze werten oder als Beleg für das starke anthropische Prinzip.

Es gibt ein paar Einwände, die sich gegen das starke anthropische Prinzip als Erklärung des beobachteten Zustands des Universums vorbringen lassen; zum Beispiel der Folgende: In welchem Sinne lässt sich sagen, dass diese verschiedenen Universen vorhanden sind? Wenn sie wirklich getrennt voneinander existieren, dann kann das Geschehen in einem anderen Universum keine beobachtbaren Konsequenzen für unser eigenes haben. Dann müssen wir das Ökonomieprinzip zugrunde legen und sie aus der Theorie ausklammern. Wenn sie dagegen nur verschiedene Regionen ein und desselben Universums sind, müssten in jeder Region die gleichen Naturgesetze gelten, weil wir uns sonst nicht kontinuierlich von einer Region zur anderen bewegen könnten. In diesem Falle wäre der einzige Unterschied zwischen den

Regionen ihr Anfangszustand, womit aus dem starken anthropischen Prinzip das schwache würde.

Ferner liegt das starke anthropische Prinzip – und das ist der zweite Einwand – quer zum Verlauf der gesamten Wissenschaftsgeschichte. Von den geozentrischen Kosmologien des Ptolemäus und seiner Vorläufer sind wir über die heliozentrische Kosmologie von Kopernikus und Galilei zum modernen Weltbild gelangt, in dem die Erde als mittelgroßer Planet eines durchschnittlichen Sterns in den Randzonen eines gewöhnlichen Spiralnebels erscheint, der seinerseits eine Galaxie unter etwa einer Billion anderen im beobachtbaren Universum ist. Dagegen würden allerdings die Vertreter des starken anthropischen Prinzips geltend machen, dass diese ganze gewaltige Konstruktion nur um unsretwillen da ist. Das ist sehr schwer zu glauben. Sicherlich ist unser Sonnensystem eine Voraussetzung für unsere Existenz, und man mag dies auf unsere ganze Galaxie ausweiten können, um jene frühere Sternengeneration einzubeziehen, die die schwereren Elemente hervorbrachte. Doch es scheint keine Notwendigkeit für all die anderen Galaxien zu geben noch für die Gleichförmigkeit und Ähnlichkeit, die sich großräumig in allen Richtungen abzeichnet.

Leichter könnte man sich mit dem anthropischen Prinzip anfreunden, zumindest mit seiner schwachen Spielart, wenn nachzuweisen wäre, dass sich aus einer ganzen Reihe verschiedener Anfangszustände ein Universum wie dasjenige hätte entwickeln können, das wir beobachten. In diesem Falle müsste ein Universum, das

sich aus irgendwelchen zufälligen Anfangsbedingungen entwickelt hätte, Regionen enthalten, die einheitlich und gleichmäßig sind und sich für die Evolution intelligenten Lebens eignen. Wenn andererseits der Anfangszustand des Universums außerordentlich sorgfältig hätte gewählt werden müssen, um zu einem Universum zu führen, wie wir es um uns herum erblicken, so würde das Universum aller Wahrscheinlichkeit nach *keine* Region enthalten, die Leben hervorbringen könnte. In dem oben beschriebenen Modell des heißen Urknalls blieb der Wärme im frühen Universum nicht genügend Zeit, um von einer Region in die andere zu gelangen. Mit anderen Worten: Um erklären zu können, warum der Mikrowellenhintergrund in allen Richtungen, in die wir blicken, die gleiche Temperatur aufweist, müsste auch der Anfangszustand des Universums überall exakt die gleichen Temperaturen gehabt haben. Die anfängliche Ausdehnungsgeschwindigkeit hätte sehr genau ausgewählt werden müssen, um zu erreichen, dass die gegenwärtige Expansionsgeschwindigkeit noch immer so nahe der kritischen Geschwindigkeit liegt, die erforderlich ist, um einen erneuten Zusammensturz zu vermeiden. Der Anfangszustand des Universums hätte also in der Tat eine sehr sorgfältige Wahl erfordert, wenn das Modell des heißen Urknalls eine zutreffende Beschreibung bis zurück zum Anbeginn der Zeit liefert. Warum das Universum gerade auf diese Weise angefangen haben sollte, wäre sehr schwer zu erklären, ohne das Eingreifen eines Gottes anzunehmen, der beabsichtigt hätte, Wesen wie uns zu erschaffen.

In dem Bemühen, ein Modell des Universums zu entwickeln, in dem sich viele verschiedene Anfangszustände zu einem Gebilde wie dem gegenwärtigen Universum hätten entwickeln können, hat Alan Guth vom Massachusetts Institute of Technology die Vermutung geäußert, das frühe Universum könnte eine Zeit sehr rascher Ausdehnung durchlaufen haben. Eine solche Ausdehnung wird »inflationär« genannt, was heißen soll, dass sich das Universum zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht, wie heute, mit abnehmender, sondern mit zunehmender Geschwindigkeit ausgedehnt hat.¹² Laut Guth wuchs der Radius des Universums in einem winzigen Sekundenbruchteil um das Million-Millionen-Millionen-Millionen-Millionenfache (eine 1 mit dreißig Nullen) an.

Guth meint, der Zustand des Universums sei unmittelbar nach dem Urknall sehr heiß, aber ziemlich chaotisch gewesen. Bei so hohen Temperaturen hätten sich die Teilchen im Universum sehr rasch bewegt und über hohe Energien verfügt. Wie oben dargestellt, wäre bei solchen Temperaturen zu erwarten, dass die starke Wechselwirkung, die schwache Kernkraft und die elektromagnetische Kraft in einer einzigen Kraft vereinigt waren. Mit der Ausdehnung und Abkühlung des Universums verringerte sich die Teilchenenergie. Schließlich fand ein sogenannter Phasenübergang statt, und die Symmetrie zwischen den Kräften wurde aufgehoben: Es kam zu einer Unterscheidung zwischen der starken Wechselwirkung und der schwachen sowie der elektromagnetischen Kraft. Ein alltägliches Beispiel für

einen Phasenübergang ist das Gefrieren des Wassers bei Abkühlung. Im flüssigen Zustand ist Wasser symmetrisch – an jedem Punkt und in jeder Richtung gleich. Wenn sich jedoch Eiskristalle bilden, so nehmen sie bestimmte Positionen an und reihen sich in bestimmter Richtung auf. Dieser Prozess bricht die Symmetrie des Wassers.

Bei entsprechenden Vorkehrungen kann man Wasser »unterkühlen«, das heißtt, man kann es auf Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes (0°C) bringen, ohne dass sich Eis bildet. Guth meinte, das Universum könnte sich ähnlich verhalten haben: Die Temperatur fiel unter den kritischen Wert, ohne dass die Symmetrie zwischen den Kräften brach. Wenn Guths Vermutung zutrifft, so hätte sich das Universum dann in einem instabilen Zustand befunden, in dem es mehr Energie besaß, als wenn es zu einem Bruch der Symmetrie gekommen wäre. Es lässt sich nachweisen, dass eine solche Zusatzenergie antigravativ wirkt: Sie hätte die gleiche Wirkung wie die kosmologische Konstante gehabt, die Einstein in die Allgemeine Relativitätstheorie eingeführt hat, als er versuchte, ein statisches Modell des Universums zu entwickeln. Da nach Guth das Universum – wie im Modell des heißen Urknalls – bereits in Ausdehnung begriffen war, sorgte die Abstoßungswirkung dieser kosmologischen Konstante dafür, dass das Universum mit ständig wachsender Geschwindigkeit expandierte. Selbst in Bereichen mit überdurchschnittlich vielen Materieteilchen wurden die Anziehungskräfte der Materie durch die Abstoßung der effektiven kosmolo-

gischen Konstante aufgewogen. Also expandierten auch diese Regionen auf beschleunigte inflationäre Weise. Während sie expandierten und die Teilchen sich immer weiter voneinander entfernten, wies das expandierende Universum kaum noch Teilchen auf und behielt seinen unterkühlten Zustand bei. Alle Unregelmäßigkeiten im Universum wurden durch die Expansionsbewegung geglättet, wie die Falten in einem Luftballon glattgezogen werden, wenn man ihn aufbläst. Der glatte und einheitliche Zustand des Universums hätte sich nach dieser Theorie also aus vielen verschiedenen ungleichförmigen Anfangszuständen entwickeln können.

In einem solchen Universum, in dem die Expansion durch eine kosmologische Konstante beschleunigt worden wäre, statt durch die Gravitationskräfte der Materie gebremst zu werden, hätte das Licht genügend Zeit gehabt, um von einer Region des frühen Universums in die andere zu gelangen. Das könnte eine Lösung für das oben angesprochene Problem sein, warum verschiedene Regionen im frühen Universum die gleichen Eigenschaften haben. Ferner würde sich die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums automatisch der kritischen Geschwindigkeit nähern, die durch die Energie dichte des Universums bestimmt wird. So ließe sich erklären, warum die Ausdehnungsgeschwindigkeit noch immer in solcher Nähe zur kritischen Geschwindigkeit liegt, ohne dass man von der Annahme auszugehen hätte, die ursprüngliche Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums sei mit Bedacht gewählt worden.

Mit der Inflationstheorie ließe sich auch erklären,

warum das Universum so viel Materie enthält. In der Region des Universums, die wir beobachten können, gibt es etwa zehn Millionen (eine 1 mit 85 Nullen) Teilchen. Wo kommen sie alle her? Die Antwort lautet, dass nach der Quantentheorie Energie in Form von Teilchen-Antiteilchen-Paaren entstehen kann. Das aber wirft die Frage auf, woher die Energie kam. Die Antwort auf diese Frage: Die Gesamtenergie des Universums ist exakt gleich Null. Die Materie des Universums besteht aus positiver Energie. Doch alle diese Materie zieht sich mittels der Gravitationskraft an. Zwei Materiestücke, die nahe beieinander sind, besitzen weniger Energie als die gleichen Stücke, wenn sie sich in größerer Entfernung voneinander befinden, weil man Energie aufwenden muss, um sie gegen den Widerstand der Gravitationskraft zu trennen, die bestrebt ist, die Materiestücke aufeinander zuzubewegen. In gewissem Sinne besitzt das Gravitationsfeld also negative Energie. Für ein Universum, das in räumlicher Hinsicht weitgehend einheitlich beschaffen ist, kann man nachweisen, dass diese negative Gravitationsenergie die durch die Materie repräsentierte positive Energie exakt aufhebt. Deshalb ist die Gesamtenergie des Universums gleich Null.

Nun ist zwei mal Null ebenfalls Null. Das Universum kann also den Betrag der positiven Materieenergie und der negativen Gravitationsenergie verdoppeln, ohne gegen das Gesetz von der Erhaltung der Ener-

gie zu verstößen. Dies geschieht nicht bei der normalen Ausdehnung des Universums, in deren Verlauf die Energiedichte der Materie geringer wird, wohl aber während der Inflationsphase, weil die Energiedichte des unterkühlten Zustands konstant bleibt, während sich das Universum ausdehnt: Wenn sich die Größe des Universums verdoppelt, verdoppeln sich auch die positive Materieenergie und die negative Gravitationsenergie, sodass die Gesamtenergie Null bleibt. Während der Inflationsphase wächst die Größe des Universums enorm an. Damit wird die Gesamtenergie, die zur Hervorbringung von Teilchen zur Verfügung steht, sehr groß. Guths Kommentar: »Es heißt, von nichts kommt nichts. Doch das Universum ist die Verkörperung des entgegengesetzten Prinzips in höchster Vollendung.«

Heute hat das Universum seine Inflationsphase längst hinter sich gelassen. Es müsste also einen Mechanismus geben, der die überaus wirksame kosmologische Konstante aufgehoben und die beschleunigte Ausdehnung so verändert hat, dass sie von der Gravitation abgebremst wird, wie wir es heute beobachten. Bei der Expansion während der Inflationsphase wäre zu erwarten, dass die Symmetrie zwischen den Kräften irgendwann aufgehoben wird, so wie auch unterkühltes Wasser am Ende stets gefriert. Dann würde die zusätzliche Energie der ungebrochenen Symmetrie freigesetzt werden und das Universum auf eine Temperatur erwärmen, die unmittelbar unter dem kritischen Wert für die Symmetrie zwischen den Kräften läge. Das Universum würde sich dann wie im Modell des heißen Urknalls ausdehnen

und abkühlen, aber es gäbe jetzt eine Erklärung, warum es sich mit genau der kritischen Geschwindigkeit ausdehnt und warum verschiedene Regionen die gleiche Temperatur aufweisen.

In seinem ursprünglichen Vorschlag ging Guth davon aus, dass der Phasenübergang plötzlich auftrat, vergleichbar dem Erscheinen von Eiskristallen in sehr kaltem Wasser. Danach bildeten sich »Blasen« der neuen Phase gebrochener Symmetrie in der alten, wie sich Dampfblasen inmitten kochenden Wassers bilden. Die Blasen – so die These – dehnten sich aus und verbanden sich miteinander, bis sich das ganze Universum in der neuen Phase befand. Wie viele Wissenschaftler, unter anderem auch ich, nachwiesen, hat sich das Universum jedoch so rasch ausgedehnt, dass sich die Blasen, selbst wenn sie mit Lichtgeschwindigkeit gewachsen wären, zu schnell voneinander entfernt hätten, um sich miteinander verbinden zu können. Das Universum wäre in einem sehr ungleichförmigen Zustand geblieben, mit einer Reihe von Regionen, in denen noch Symmetrie zwischen den verschiedenen Kräften geherrscht hätte. Ein solches Modell des Universums entspricht nicht dem, was wir sehen.

Im Oktober 1981 besuchte ich in Moskau eine Konferenz über Quantengravitation. Danach hielt ich am Sternberg-Institut für Astronomie eine Reihe von Vorträgen über die Inflationstheorie und ihre Probleme. Sonst hatte ich immer jemanden damit betraut, die Vorträge in meiner Anwesenheit vorzulesen, da die meisten Leute meine Aussprache nicht verstehen konn-

ten. Doch diesmal blieb mir keine Zeit zur Vorbereitung, und so hielt ich die Vorträge selbst und ließ die Sätze von einem meiner Studenten wiederholen. Das ging gut, und ich hatte viel mehr Kontakt zu meinen Zuhörern. Unter ihnen befand sich der junge russische Wissenschaftler Andrej Linde vom Lebedew-Institut in Moskau. Er meinte, die Probleme mit den Blasen würden nicht entstehen, wenn sie so groß wären, dass unsere ganze Region des Universums in einer einzigen Blase enthalten wäre. Dazu, so fuhr er fort, muss sich der Wandel von der Symmetrie zur gebrochenen Symmetrie innerhalb der Blase sehr langsam vollzogen haben, doch das ist nach den Großen Vereinheitlichten Theorien durchaus möglich. Lindes Gedanke vom langsamem Bruch der Symmetrie war sehr gut, doch später wurde mir klar, dass seine Blasen hätten größer sein müssen als das Universum zum betreffenden Zeitpunkt! Ich wies nach, dass die Symmetrie gleichzeitig überall gebrochen wäre und nicht nur innerhalb der Blasen. Das brächte ein gleichförmiges Universum hervor, wie wir es beobachten. Dieser Gedanke versetzte mich in ziemliche Aufregung und ich erörterte ihn mit Ian Moss, einem meiner Studenten. Als Lindes Freund geriet ich deshalb in Verlegenheit, als mir später sein Artikel von einer wissenschaftlichen Zeitschrift zugesandt wurde und ich zu der Frage Stellung nehmen sollte, ob er sich zur Veröffentlichung eigne. Ein Fehler sei, so antwortete ich, dass die Blasen größer gewesen wären als das Universum, der Grundgedanke eines langsamen Symmetriebruches sei aber sehr gut. Ich empfahl, den

Artikel in der vorliegenden Form zu veröffentlichen, weil Linde mehrere Monate gebraucht hätte, um ihn zu korrigieren, denn alles, was in den Westen geschickt wurde, musste durch die sowjetische Zensur, die solche wissenschaftlichen Artikel weder sehr geschickt noch sehr schnell bearbeitete. Statt dessen schrieb ich zusammen mit Ian Moss für dieselbe Zeitschrift einen kurzen Aufsatz, in dem wir auf das Problem der Blasengröße hinwiesen und zeigten, wie es sich lösen lässt.

An dem Tag nach meiner Rückkehr aus Moskau machte ich mich auf den Weg nach Philadelphia, wo ich eine Medaille des Franklin Institute entgegennehmen sollte. Meine Sekretärin Judy Fella hatte es mit ihrem unwiderstehlichen Charme erreicht, dass die British Airways ihr und mir einen Freiflug in einer Concorde zur Verfügung stellten – eine Maßnahme, die unter Öffentlichkeitsarbeit verbucht wurde. Auf dem Weg zum Flughafen wurde ich jedoch durch einen Wolkenbruch aufgehalten und versäumte das Flugzeug. Trotzdem kam ich noch rechtzeitig nach Philadelphia, um meine Medaille entgegenzunehmen. Dort bat man mich, an der Drexel University eine Reihe von Vorträgen über kosmische Inflation zu halten, über das gleiche Thema also wie in Moskau.

Unabhängig davon entwickelten ein paar Monate später Paul Steinhardt und Andreas Albrecht von der University of Pennsylvania einen Gedanken, der Linde's Theorie sehr ähnelte. Diese beiden Wissenschaftler gelten heute zusammen mit Linde als Begründer der »neuen Inflationstheorie«, die auf dem Gedanken

eines langsamen Symmetriebruchs beruht. (Die alte Inflationstheorie war Guths ursprüngliche These vom raschen Symmetriebruch mit der Bildung von Blasen.)

Die neue Inflationstheorie war ein guter Ansatz zur Erklärung des gegenwärtigen Zustands des Universums. Doch haben mehrere Wissenschaftler, unter anderem auch ich, nachgewiesen, dass diese Theorie weit größere Schwankungen in der Temperatur des Mikrowellen-Strahlungshintergrundes vorhersagt, als tatsächlich zu beobachten sind. Aufgrund späterer Arbeiten ist auch zu bezweifeln, ob im sehr frühen Universum ein Phasenübergang der erforderlichen Art möglich gewesen ist. Nach meiner Überzeugung ist das neue Inflationsmodell heute überholt, obwohl sich dies bei vielen Wissenschaftlern noch nicht herumgesprochen zu haben scheint, sodass sie ihr Artikel widmen, als sei es noch ein zukunftsweisender Ansatz. Ein besseres Modell, die sogenannte chaotische Inflationstheorie, wurde 1983 von Linde vorgeschlagen. In ihr gibt es keinen Phasenübergang und keine Unterkühlung, stattdessen ein Feld mit dem Spin 0, das im frühen Universum infolge von Quantenfluktuationen hohe Werte in einigen Regionen aufwies. Die Energie des Feldes in diesen Regionen würde genau die Wirkung einer kosmologischen Konstante haben. Sie hatte einen abstoßenden Gravitationseffekt und veranlasste die betreffenden Regionen, eine Inflationsphase zu durchlaufen und sich beschleunigt auszudehnen. Bei dieser Ausdehnung nahm die Feldenergie der Regionen langsam ab, bis aus der Inflationsphase eine Expansionsbewegung wurde, wie sie im Mo-

dell des heißen Urknalls vorliegt. Eine dieser Regionen, so Linde, wurde zu dem, was wir heute als beobachtbares Universum vor Augen haben. Dieses Modell hat alle Vorteile der vorangegangenen Inflationsmodelle, beruft sich aber nicht auf einen zweifelhaften Phasenübergang und kann darüber hinaus einen vernünftigen Wert für die Temperaturschwankungen des Mikrowellenhintergrundes angeben – das heißt, einen Wert, der sich mit den Beobachtungen deckt.

Diese Arbeit über Inflationstheorien zeigte, dass sich das Universum in seinem gegenwärtigen Zustand aus einer recht großen Zahl verschiedener Anfangszustände hätte entwickeln können. Das ist wichtig, weil daraus deutlich wird, dass der Anfangszustand des von uns bewohnten Teils des Universums nicht mit großer Sorgfalt ausgewählt werden musste. Deshalb können wir uns, wenn wir es möchten, des schwachen anthropischen Prinzips bedienen, um zu erklären, warum das Universum heute so aussieht und nicht anders. Andererseits ist es nicht möglich, dass *jeder* Anfangszustand zu einem Universum geführt hätte, wie wir es heute beobachten. Das lässt sich nachweisen, indem man für das gegenwärtige Universum einen ganz anderen Zustand annimmt, sagen wir, einen sehr klumpigen und unregelmäßigen. Mit Hilfe der Naturgesetze lässt sich seine Entwicklung zurückverfolgen und sein Zustand in früheren Zeiten bestimmen. Nach den Singularitätstheorien der klassischen Allgemeinen Relativitätstheorie hätte es auch in diesem Fall eine Urknall-Singularität gegeben. Verfolgt man die Entwicklung eines solchen Universums nach

den gleichen Gesetzen in der Zeit vorwärts, so gelangt man zu einem ebenso klumpigen und unregelmäßigen Zustand wie dem, mit dem man begonnen hat. Es muss also Anfangszustände geben, die nicht zu einem Universum geführt hätten, wie wir es heute beobachten können. Also verrät uns auch das Inflationsmodell nicht, warum der Anfangszustand nicht so beschaffen war, dass er etwas ganz Anderes hervorgebracht hätte, als wir es beobachten. Müssen wir auf das anthropische Prinzip zurückgreifen, um eine Erklärung zu bekommen? War alles nur ein glücklicher Zufall? Das käme einem Offenbarungseid gleich, einem Abschied von unserer Hoffnung, wir könnten die dem Universum zugrunde liegende Ordnung verstehen.

Um vorhersagen zu können, wie das Universum begonnen hat, brauchen wir Gesetze, die auch für den Anbeginn der Zeit gelten. Wenn die klassische Allgemeine Relativitätstheorie richtig ist, so folgte aus den Singularitätstheoremen, die Roger Penrose und ich bewiesen haben, dass der Anfang der Zeit ein Punkt von unendlicher Dichte und unendlicher Krümmung der Raumzeit war. Alle bekannten Naturgesetze würden an einem solchen Punkt ihre Gültigkeit verlieren. Man könnte annehmen, dass sich neue Gesetze finden lassen, die auch für Singularitäten gelten, doch es wäre sehr schwer, Gesetze für Punkte mit so extremen Eigenschaften auch nur zu formulieren, und unsere Beobachtungen würden uns keinerlei Hinweis auf die mögliche Beschaffenheit solcher Gesetze geben. Indes, eines lässt sich den Singularitätstheoremen entnehmen: Das Gravitationsfeld

wird so stark, dass Quantengravitationseffekte Bedeutung gewinnen. Wir befinden uns an einem Punkt, wo die klassische Theorie keine brauchbare Beschreibung des Universums mehr liefert. Wir müssen uns also einer Quantentheorie der Gravitation bedienen, um die sehr frühen Stadien des Universums zu erörtern. Wie noch zu zeigen sein wird, bleiben die normalen Naturgesetze in der Quantentheorie überall, auch am Anfang der Zeit, gültig: Man braucht für Singularitäten keine neuen Gesetze zu postulieren, weil in der Quantentheorie keine Singularitäten erforderlich sind.

Noch gibt es keine vollständige und widerspruchsfreie Theorie, in der Quantenmechanik und Gravitation zusammengefasst wären. Wir wissen jedoch mit ziemlicher Sicherheit von einigen Eigenschaften, die eine solche einheitliche Theorie haben müsste. Zum einen müsste sie Feynmans Vorschlag aufgreifen, die Quantentheorie als »Summe über alle Möglichkeiten« auszudrücken. Nach diesem Ansatz hat ein Teilchen nicht nur eine einzige Geschichte, wie es in einer klassischen Theorie der Fall wäre, sondern man geht davon aus, dass es jedem möglichen Weg in der Raumzeit folgt. Mit jeder dieser Geschichten ist ein Zahlenpaar verknüpft, wobei die eine Zahl für die Wellengröße und die andere für die Position im Zyklus (die Phase) steht. Die Wahrscheinlichkeit, dass zum Beispiel der Weg des Teilchens durch einen bestimmten Punkt führt, wird ermittelt, indem man die Wellen addiert, die mit jeder möglichen durch diesen Punkt verlaufenden Geschichte verknüpft sind. Versucht man jedoch, diese Summen tatsächlich auszu-

rechnen, so sieht man sich mit erheblichen technischen Schwierigkeiten konfrontiert. Die einzige Möglichkeit, sie zu umgehen, besteht darin, dass man der folgenden merkwürdig klingenden Anweisung folgt: Man addiere die Wellen von Teilchengeschichten, die nicht in der »wirklichen«, von Ihnen und mir erlebten Zeit liegen, sondern in der sogenannten imaginären Zeit. Imaginäre Zeit mag sich nach Science-Fiction anhören, ist aber tatsächlich ein genau definierter mathematischer Begriff. Wenn wir eine herkömmliche (Mathematiker würden sagen: ›reelle‹) Zahl nehmen und sie mit sich selbst multiplizieren, so erhalten wir eine positive Zahl. (So ist 2 mal 2 gleich 4, genauso auch -2 mal -2 .) Es gibt jedoch besondere Zahlen (man bezeichnet sie als imaginär), die negative Zahlen ergeben, wenn man sie mit sich selbst multipliziert. (Eine von ihnen heißt i ; multipliziert man i mit sich selbst, so erhält man -1 ; $2i$ mit sich selbst mal genommen ergibt -4 und so fort.) Reelle und imaginäre Zahlen lassen sich wiedergeben, indem man die reellen Zahlen durch eine von links nach rechts verlaufende Linie darstellt: 0 in der Mitte, die negativen Zahlen wie -1 , -2 usw. links und die positiven Zahlen 1 , 2 usw. rechts. Dann werden die imaginären Zahlen durch eine senkrecht verlaufende Linie abgebildet, wobei sich i , $2i$ usw. über der Mitte und $-i$, $-2i$ usw. unter der Mitte befinden. In diesem Sinne liegen die imaginären Zahlen also im rechten Winkel zu den gewöhnlichen reellen Zahlen. Um die technischen Schwierigkeiten der Feynmanschen Aufsummierung von Möglichkeiten (Pfadintegralmethode) zu vermeiden, muss man sich der

imaginären Zeit bedienen. Mit anderen Worten: Für die Berechnung muss man die Zeit nicht mit realen, sondern mit imaginären Zahlen messen.

Das hat für die Raumzeit einen interessanten Effekt: Der Unterschied zwischen Zeit und Raum verliert sich vollständig. Eine Raumzeit, in der die Zeitkoordinatenwerte für Ereignisse imaginär sind, wird euklidisch genannt, nach dem griechischen Mathematiker, der die Geometrie zweidimensionaler Flächen begründet hat. Die euklidische Raumzeit ist diesen Flächen sehr ähnlich, nur hat sie vier Dimensionen und nicht zwei. In der euklidischen Raumzeit gibt es keinen Unterschied zwischen der Zeitrichtung und den Richtungen des Raums. Dagegen lässt sich dieser Unterschied in der wirklichen Raumzeit, in der Ereignisse durch gewöhnliche reale Zahlenwerte auf der Zeitkoordinate repräsentiert werden, ohne Schwierigkeiten angeben – die Zeitrichtung liegt auf allen Punkten innerhalb des Lichtkegels, während die Raumrichtungen außerhalb liegen. In allen Fällen, welche die alltägliche Quantenmechanik betreffen, ist die imaginäre Zeit und die euklidische Raumzeit ein bloßes mathematisches Werkzeug (oder ein Trick), um bestimmte Lösungen zur realen Raumzeit zu berechnen.

Eine zweite Eigenschaft, die unserer Überzeugung nach jede übergreifende Theorie aufweisen muss, ist Einsteins Überlegung, dass dem Gravitationsfeld eine Krümmung der Raumzeit entspricht: Die Teilchen versuchen in einem gekrümmten Raum, der größten Annäherung an einen geraden Weg zu folgen, aber da

die Raumzeit nicht flach ist, erscheinen ihre Wege gekrümmt, als seien sie dem Einfluss eines Gravitationsfeldes unterworfen. Wenn wir auf die Einsteinsche Gravitationstheorie die Feynmansche Aufsummierung von Möglichkeiten anwenden, entspricht jetzt der Geschichte eines Teilchens eine vollständige gekrümmte Raumzeit, die die Geschichte des ganzen Universums repräsentiert. Um die technischen Schwierigkeiten zu vermeiden, auf die man stößt, wenn man die Möglichkeiten tatsächlich aufsummieren will, muss man diese gekrümmten Raumzeiten euklidisch auffassen. Das heißt, die Zeit ist imaginär und ununterscheidbar von den Richtungen im Raum. Die Wahrscheinlichkeit einer realen Raumzeit mit irgendeiner bestimmten Eigenschaft, etwa der, dass sie an jedem Punkt und in jeder Richtung gleich aussieht, lässt sich errechnen, indem man die Wellen addiert, die mit allen diesen Eigenschaften aufweisenden Geschichten verknüpft sind.

In der klassischen Allgemeinen Relativitätstheorie sind viele verschiedene gekrümmte Raumzeiten möglich, von denen jede einem anderen Anfangszustand des Universums entspricht. Würden wir den Anfangszustand unseres Universums kennen, würden wir seine ganze Geschichte kennen. Entsprechend sind in der Quantentheorie der Gravitation viele verschiedene Quantenzustände des Universums möglich. Abermals gilt: Wüssten wir, wie sich zu früheren Zeitpunkten die euklidischen gekrümmten Raumzeiten in der Aufsummierung von Möglichkeiten verhalten haben, würden wir den Quantenzustand des Universums kennen.

In der klassischen Gravitationstheorie, die auf realer Raumzeit beruht, gibt es für das Verhalten des Universums nur zwei Möglichkeiten: Entweder es existiert seit unendlicher Zeit oder es hat zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Vergangenheit mit einer Singularität begonnen. In der Quantentheorie der Gravitation ergibt sich dagegen noch eine dritte Möglichkeit. Da man euklidische Raumzeiten verwendet, in denen sich die Zeitrichtung nicht von den Richtungen im Raum unterscheidet, kann die Raumzeit endlich in der Ausdehnung sein und doch keine Singularitäten aufweisen, die ihre Grenze oder ihren Rand bilden. Die Raumzeit ist dann wie die Oberfläche der Erde, nur dass sie zwei Dimensionen mehr aufweist. Die Erdoberfläche ist endlich in der Ausdehnung, besitzt aber keine Grenze und keinen Rand. Wer in den Sonnenuntergang hineinsiegelt, fällt von keinem Rand und trifft auf keine Singularität. (Ich muss es wissen, weil ich die Welt schon umrundet habe!)

Wenn euklidische Zeit in unendliche imaginäre Zeit zurückreicht oder an einer Singularität in imaginärer Zeit beginnt, stehen wir vor dem gleichen Problem wie in der klassischen Theorie, wenn wir den Anfangszustand des Universums bestimmen wollen: Gott mag wissen, wie das Universum begonnen hat, aber wir können keinen triftigen Grund für die Annahme nennen, dass es eher auf die eine als auf die andere Weise begonnen hat. Dagegen hat die Quantentheorie der Gravitation die Möglichkeit eröffnet, dass die Raumzeit gar keine Grenze, keinen Rand hat. Es wäre in dem Falle also gar

nicht nötig, eine Randbedingung anzugeben. Es gäbe keine Singularitäten, an denen die Naturgesetze ihre Gültigkeit einbüßten, und keinen Raumzeitrand, an dem man sich auf Gott oder irgendein neues Gesetz berufen müsste, um die Randbedingungen der Raumzeit festzulegen. Man könnte einfach sagen: »Die Randbedingung des Universums ist, dass es keine Grenze hat.« Das Universum wäre völlig in sich abgeschlossen und keinerlei äußerer Einflüssen unterworfen. Es wäre weder erschaffen noch zerstörbar. Es würde einfach SEIN.

Die These, dass Zeit und Raum möglicherweise eine gemeinsame Fläche bilden, die von endlicher Größe, aber ohne Grenze oder Rand ist, trug ich erstmals auf jener Konferenz im Vatikan vor, von der schon die Rede war. Mein Vortrag war jedoch ziemlich mathematisch gehalten, sodass seine Bedeutung für die Rolle Gottes in der Schöpfung des Universums damals noch nicht allgemein erkannt wurde (von mir übrigens auch nicht). Zurzeit der Vatikankonferenz wusste ich noch nicht, wie sich aus der Keine-Grenzen-Vorstellung Vorhersagen über das Universum ableiten ließen. Den nächsten Sommer verbrachte ich jedoch an der University of California in Santa Barbara. Dort half mir mein Freund und Kollege Jim Hartle bei der Ausarbeitung der Bedingungen, die das Universum erfüllen muss, damit die Raumzeit keine Grenze hat. Nach Cambridge zurückgekehrt, setzte ich diese Arbeit mit meinen Doktoranden Julian Luttrell und Jonathan Halliwell fort.

Ich möchte betonen, dass die Vorstellung von einer endlichen Raumzeit ohne Rand nur ein *Vorschlag* ist:

Sie lässt sich von keinem anderen Prinzip ableiten. Wie jede andere wissenschaftliche Theorie mag sie ursprünglich aus ästhetischen oder metaphysischen Gründen vorgebracht worden sein, doch ihre Bewährungsprobe kommt, wenn überprüft wird, ob sie Vorhersagen macht, die mit den Beobachtungsdaten übereinstimmen. Das lässt sich allerdings im Falle der Quantengravitation aus zwei Gründen nur schwer entscheiden. Erstens sind wir uns, wie in Kapitel 11 erklärt, noch nicht ganz sicher, welche Theorie eine gelungene Verbindung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik darstellt, obwohl uns schon viele Eigenschaften bekannt sind, die eine solche Theorie aufweisen müsste. Zweitens wäre jedes Modell, welches das ganze Universum in allen Einzelheiten beschreibe, mathematisch viel zu kompliziert, um mit seiner Hilfe genaue Vorhersagen errechnen zu können. Deshalb ist man zu vereinfachenden Annahmen und Näherungen gezwungen – und selbst unter diesen Umständen bleibt es ungeheuer schwer, Vorhersagen abzuleiten.

Jede Geschichte in der Aufsummierung von Möglichkeiten beschreibt nicht nur die Raumzeit, sondern auch alle Einzelheiten darin, einschließlich so hochentwickelter Organismen wie der Menschen, die die Geschichte des Universums beobachten können. Das mag eine weitere Rechtfertigung für das anthropische Prinzip liefern, denn wenn alle Geschichten möglich sind, dann können wir, solange wir in einer der Geschichten vorhanden sind, das anthropische Prinzip benutzen, um die gegenwärtige Beschaffenheit des Universums zu er-

klären. Welche Bedeutung den anderen Geschichten, in denen wir nicht vorkommen, zugeschrieben werden kann, ist nicht klar. Dieser Aspekt einer Quantentheorie der Gravitation wäre weit befriedigender, wenn sich nachweisen ließe, dass bei der Verwendung der Pfadintegralmethode unser Universum nicht nur eine der möglichen Geschichten ist, sondern auch eine der wahrscheinlichsten. Dazu müssen wir die Aufsummierung der Möglichkeiten für alle möglichen euklidischen Raumzeiten berechnen, die keinen Rand haben.

Legt man die Keine-Grenzen-These zugrunde, so zeigt sich, dass man die Wahrscheinlichkeit der meisten möglichen Geschichten des Universums vernachlässigen kann, dass es aber eine bestimmte Familie von Geschichten gibt, die wahrscheinlicher sind als die anderen. Diese Geschichten kann man sich vorstellen wie die Oberfläche der Erde, wobei der Abstand vom Nordpol der imaginären Zeit entspricht und die Größe eines Kreises mit gleichbleibendem Abstand vom Nordpol die räumliche Ausdehnung des Universums angibt. Das Universum beginnt als ein einziger Punkt am Nordpol. Je weiter man sich südlich bewegt, desto größer werden die Breitenkreise mit gleichbleibendem Abstand zum Nordpol, die der Ausdehnung des Universums mit der imaginären Zeit entsprechen (Abb. 27). Am Äquator würde das Universum seine maximale Größe erreichen und sich mit fortschreitender imaginärer Zeit am Südpol wieder zu einem einzigen Punkt zusammenziehen. Obwohl die Größe des Universums am Nord- und am Südpol Null wäre, wären diese Punkte keine Singulari-

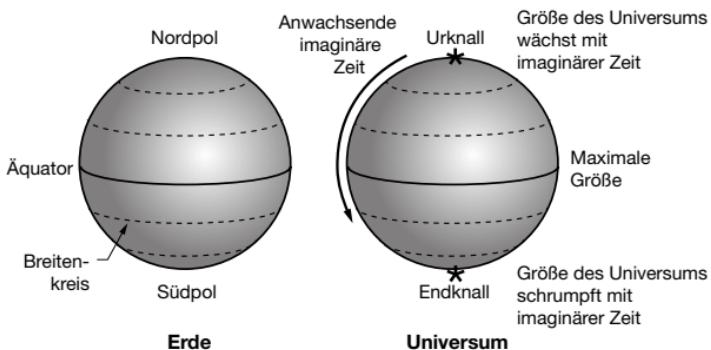


Abbildung 27

täten, genauso wenig wie der Nord- und der Südpol der Erde singulär sind. Die Naturgesetze behalten an ihnen ihre Gültigkeit, wie es am Nord- und Südpol der Erde der Fall ist.

Die Geschichte des Universums in der wirklichen Zeit würde jedoch ganz anders aussehen. Vor ungefähr zehn bis zwanzig Milliarden Jahren hätte es eine minimale Größe gehabt, was dem maximalen Radius der Geschichte in der imaginären Zeit entspricht. Zu einem späteren Zeitpunkt würde sich das Universum ausdehnen, wie es Linde im chaotischen inflationären Modell vorschlägt (doch müsste man nun nicht mehr von der Annahme ausgehen, dass das Universum auf irgend eine Weise im richtigen Zustand erschaffen wurde). Das Universum würde sich enorm ausdehnen und sich schließlich wieder zu einem Zustand zusammenziehen, der in der realen Zeit wie eine Singularität aussähe. In gewissem Sinne sind wir also alle immer noch vom Untergang bedroht, auch wenn wir Schwarzen Löchern

aus dem Wege gehen. Nur wenn wir das Universum unter dem Blickwinkel der imaginären Zeit darstellen könnten, gäbe es keine Singularitäten.

Wenn sich das Universum wirklich in einem solchen Quantenzustand befände, existierten keine Singularitäten in einer Geschichte des Universums, die nach den Gesetzen der imaginären Zeit verlief. Deshalb könnte es so aussehen, als hätten meine neueren Untersuchungen die Ergebnisse meiner früheren Arbeit über Singularitäten völlig überflüssig gemacht. Doch wie oben erwähnt, lag die wirkliche Bedeutung der Singularitätstheoreme in dem Nachweis, dass die Gravitationseffekte der Quantenmechanik nicht außer Acht gelassen werden können, wenn das Gravitationsfeld extrem stark wird. Dies führte wiederum zu der Überlegung, dass das Universum endlich in der imaginären Zeit sein könnte, ohne indessen Grenzen oder Singularitäten aufzuweisen. Wenn wir jedoch in die reale Zeit zurückkehren, in der wir leben, scheint es noch immer Singularitäten zu geben. Der arme Astronaut, der in ein Schwarzes Loch fällt, wird nach wie vor ein böses Ende finden; nur wenn er in der imaginären Zeit lebte, würde er auf keine Singularitäten stoßen.

Das könnte zu der Vermutung führen, die sogenannte imaginäre Zeit sei in Wirklichkeit die reale und das, was wir die reelle (und ja auch die reale) Zeit nennen,¹³ nur ein Produkt unserer Einbildungskraft. In der realen Zeit hat das Universum einen Anfang und ein Ende an Singularitäten, die für die Raumzeit eine Grenze bilden und an denen die Naturgesetze ihre Gültigkeit verlieren.

tigkeit verlieren. In der imaginären Zeit dagegen gibt es keine Singularitäten oder Grenzen. So ist möglicherweise das, was wir imaginäre Zeit nennen, von viel grundlegenderer Bedeutung und das, was wir real nennen, lediglich ein Begriff, den wir erfinden, um unsere Vorstellung vom Universum zu beschreiben. Nach der Auffassung jedoch, die ich im ersten Kapitel erläutert habe, ist eine wissenschaftliche Theorie nicht mehr als ein mathematisches Modell, das wir entwerfen, um unsere Beobachtungen zu beschreiben: Es existiert nur in unserem Kopf. Deshalb ist es sinnlos zu fragen: Was ist wirklich, die »reale« oder die »imaginäre« Zeit? Es geht lediglich darum, welche von beiden die nützlichere Beschreibung ist.

Man kann auch Feynmans Pfadintegralmethode (Aufsummierung von Möglichkeiten) zusammen mit der Keine-Grenzen-These verwenden, um zu bestimmen, welche Eigenschaften des Universums der Wahrscheinlichkeit nach zusammen auftreten. So lässt sich beispielsweise errechnen, wie wahrscheinlich es ist, dass sich das Universum zu einem Zeitpunkt, da seine Dichte den gegenwärtigen Wert aufweist, in verschiedenen Richtungen mit nahezu gleicher Geschwindigkeit ausdehnt. In den vereinfachten Modellen, die bisher untersucht wurden, erweist sich diese Wahrscheinlichkeit als sehr groß. Mit anderen Worten: Die vorgeschlagene Keine-Grenzen-Bedingung führt zu der Vorhersage, dass die gegenwärtige, in jeder Richtung nahezu gleiche Ausdehnung des Universums außerordentlich wahrscheinlich ist. Das deckt sich mit den Beobachtungen des

Mikrowellen-Strahlungshintergrunds, der fast genau die gleiche Intensität in allen Richtungen zeigt. Wenn sich das Universum in einigen Richtungen rascher ausdehnt als in anderen, würde die Strahlung in diesen Richtungen durch eine zusätzliche Rotverschiebung gemindert.

Gegenwärtig werden weitere Vorhersagen der Keine-Grenzen-Bedingung ausgearbeitet. Ein besonders interessantes Problem ist die Größe der kleinen Abweichungen von der gleichförmigen Dichte im frühen Universum, die zunächst zur Bildung der Galaxien, dann der Sterne und schließlich unserer Art führten. Aus der Unschärferelation folgt, dass das frühe Universum nicht völlig gleichförmig gewesen sein kann, weil es einige Ungewissheiten oder Fluktuationen in der Position und Geschwindigkeit der Teilchen gegeben haben muss. Wenn wir von der Keine-Grenzen-Bedingung ausgehen, so stellen wir fest, dass das Universum mit der kleinstmöglichen Nichteinheitlichkeit begonnen haben muss, die von der Unschärferelation zugelassen wird. Danach war das Universum, wie in den Inflationsmodellen, einer Phase rascher Expansion unterworfen. Während dieser Phase, so ergibt sich aus unserem Ansatz, haben sich die anfänglichen Inhomogenitäten verstärkt, bis sie groß genug waren, um die Entstehung der Strukturen zu erklären, die wir um uns her wahrnehmen. 1992 entdeckte der Satellit Cosmic Background Explorer (COBE) richtungsabhängige, winzige Unregelmäßigkeiten in der Intensität der Hintergrundstrahlung. Die Art und Weise, wie diese Ungleichförmigkeiten von der Richtung abhängen, scheint mit den Vorhersagen des

Inflationsmodells und der Keine-Grenzen-Bedingung übereinzustimmen. Also ist die Keine-Grenzen-Bedingung eine gute wissenschaftliche Theorie im Sinne Karl Poppers: Sie hätte durch Beobachtungen falsifiziert werden können, doch stattdessen haben sich ihre Vorhersagen bestätigt. In einem expandierenden Universum, in dem die Dichte der Materie von Ort zu Ort leichten Veränderungen unterworfen war, verlangsamte sich in den dichteren Regionen infolge der Gravitation die Expansionsbewegung und ging in Kontraktion über. Das führte zur Bildung von Galaxien, Sternen und schließlich sogar zu so unbedeutenden Geschöpfen wie uns. So lassen sich vielleicht all die komplizierten Strukturen, die wir im Universum erblicken, durch die Keine-Grenzen-Bedingung in Verbindung mit der Unschärferelation der Quantenmechanik erklären.

Die Vorstellung, dass Raum und Zeit möglicherweise eine geschlossene Fläche ohne Begrenzung bilden, hat auch weitreichende Konsequenzen für die Rolle Gottes in den Geschicken des Universums. Als es wissenschaftlichen Theorien immer besser gelang, den Ablauf der Ereignisse zu beschreiben, sind die meisten Menschen zu der Überzeugung gelangt, dass Gott dem Universum gestatte, sich nach einer Reihe von Gesetzen zu entwickeln, und auf alle Eingriffe verzichte, die in Widerspruch zu diesen Gesetzen stünden. Doch diese Gesetze verraten uns nicht, wie das Universum in seinen Anfängen ausgesehen hat – es wäre immer noch Gottes Aufgabe gewesen, das Uhrwerk aufzuziehen und zu entscheiden, wie alles beginnen sollte. Wenn das Univer-

sum einen Anfang hatte, können wir von der Annahme ausgehen, dass es durch einen Schöpfer geschaffen worden sei. Doch wenn das Universum wirklich völlig in sich selbst abgeschlossen ist, wenn es wirklich keine Grenze und keinen Rand hat, dann hätte es auch weder einen Anfang noch ein Ende: Es würde einfach *sein*. Wo wäre dann noch Raum für einen Schöpfer?

9

DER ZEITPFEIL

In den vorigen Kapiteln haben wir gesehen, wie sich unser Zeitbegriff im Laufe der Jahre verändert hat. Bis zum Anfang dieses Jahrhunderts glaubten die Menschen an eine absolute Zeit. Man war überzeugt, dass sich jedem Ereignis eine Zahl, die man »Zeit« nannte, eindeutig zuweisen lasse und dass alle guten Uhren das Zeitintervall zwischen zwei Ereignissen übereinstimmend anzeigen. Doch die Entdeckung, dass die Lichtgeschwindigkeit jedem Beobachter unabhängig von seiner Geschwindigkeit gleich erscheint, führte zur Relativitätstheorie – und damit zum Verzicht auf einen absoluten Zeitbegriff. Nach der Relativitätstheorie hat jeder Beobachter sein eigenes Zeitmaß, das eine von ihm mitgeführte Uhr registriert: Uhren, die verschiedene Beobachter bei sich tragen, müssen nicht unbedingt übereinstimmen. So wurde die Zeit zu einem persönlicheren Begriff, abhängig von dem Beobachter, der sie misst.

Bei dem Versuch, die Gravitation mit der Quantenmechanik zu vereinen, musste das Konzept der »imagi-

nären« Zeit eingeführt werden. Diese lässt sich von den Richtungen im Raum nicht unterscheiden. Wenn man nach Norden geht, kann man kehrtmachen und sich südwärts halten. Genauso kann man, wenn man sich in der imaginären Zeit vorwärts bewegt, kehrtmachen und rückwärts gehen. Mit anderen Worten: Es kann keinen bedeutenden Unterschied zwischen der Vorwärts- und der Rückwärtsrichtung in der imaginären Zeit geben. Dagegen gibt es in der »realen« Zeit, wie wir alle wissen, einen gewaltigen Unterschied zwischen Vorwärts- und Rückwärtsrichtung. Woher kommt dieser Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft? Warum erinnern wir uns an die Vergangenheit, aber nicht an die Zukunft?

Die Naturgesetze unterscheiden nicht zwischen Vergangenheit und Zukunft. Genauer: Diese Gesetze, die das Verhalten der Materie in allen normalen Situationen bestimmen, bleiben, wie erläutert, bei einer Kombination der Operationen (oder Symmetrien) C, P und T unverändert. (C heißt Austausch der Antiteilchen gegen Teilchen. P heißt Umkehrung ins Spiegelbild, also Austausch von links und rechts. T heißt schließlich Umkehr der Bewegungsrichtung aller Teilchen – mit anderen Worten: der Ablauf der Bewegung rückwärts.) Auch bei einer Kombination der beiden Operationen C und P verändern sich die Naturgesetze nicht. Das Leben von Bewohnern eines anderen Planeten, die sowohl unser Spiegelbild wären als auch aus Antimaterie bestünden statt aus Materie, unterschiede sich also nicht von dem unseren.

Wenn die Naturgesetze weder durch die Kombination der Operationen C und P noch von C, P und T verändert werden, dann müssen sie auch bei der Operation T allein unverändert bleiben.¹⁴ Trotzdem gibt es einen gravierenden Unterschied zwischen der Vorwärts- und der Rückwärtsrichtung realer Zeit im alltäglichen Leben. Stellen wir uns eine Tasse Wasser vor, die vom Tisch fällt und auf dem Boden in tausend Stücke zerbricht. Wenn man diesen Vorgang filmt, ist es leicht zu sagen, ob er vorwärts oder rückwärts läuft. Läuft er rückwärts, so sieht man, wie sich die Scherben auf dem Fußboden plötzlich wieder zur unversehrten Tasse zusammenfügen und auf den Tisch zurückspringen. Man kann sagen, dass der Film rückwärts läuft, weil ein solches Verhalten im normalen Leben niemals zu beobachten ist. Wäre dies der Fall, könnten die Porzellanmanufakturen schließen.

Warum sich zerbrochene Tassen nicht auf dem Fußboden zusammenfügen und auf Tische zurückspringen, wird gewöhnlich mit dem Hinweis auf den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik erklärt. Danach nimmt in jedem geschlossenen System die Unordnung oder Entropie mit der Zeit zu – wie in Murphys Gesetz: Alles, was schiefgehen kann, wird auch schiefgehen! Eine heile Tasse auf dem Tisch repräsentiert einen Zustand höherer Ordnung, während eine zerbrochene Tasse auf dem Fußboden einen ungeordneten Zustand bedeutet.

Man kann leicht von der Tasse auf dem Tisch in der Vergangenheit zur zerbrochenen Tasse auf dem Fußboden in der Zukunft gelangen, nicht aber umgekehrt.

Das Anwachsen der Unordnung oder Entropie mit der Zeit ist ein Beispiel für das, was wir Zeitpfeil nennen, für etwas, das die Vergangenheit von der Zukunft unterscheidet, indem es der Zeit eine Richtung gibt. Es gibt mindestens drei verschiedene Zeitpfeile: Den thermodynamischen Zeitpfeil, die Richtung der Zeit, in der die Unordnung oder Entropie zunimmt; den psychologischen Zeitpfeil, die Richtung, in der unserem Gefühl nach die Zeit fortschreitet, die Richtung, in der wir die Vergangenheit, aber nicht die Zukunft erinnern; und den kosmologischen Zeitpfeil, die Richtung der Zeit, in der sich das Universum ausdehnt und nicht zusammenzieht.

In diesem Kapitel möchte ich zeigen, dass die Keine-Grenzen-Bedingung in Verbindung mit dem schwachen anthropischen Prinzip eine Erklärung dafür bietet, warum alle drei Pfeile in die gleiche Richtung zeigen – mehr noch, warum es überhaupt einen festgelegten Zeitpfeil geben muss. Ich werde die Auffassung vertreten, dass der psychologische Pfeil durch den thermodynamischen bestimmt wird und dass diese beiden Pfeile stets in die gleiche Richtung zeigen müssen. Wenn man für das Universum die Keine-Grenzen-Bedingung annimmt, so muss es, wie wir sehen werden, einen bestimmten thermodynamischen und kosmologischen Zeitpfeil geben, doch sie werden nicht während der ganzen Geschichte des Universums in die gleiche Richtung zeigen. Meine Überlegung ist: Nur wenn sie in die gleiche Richtung zeigen, sind die Bedingungen für die Entwicklung intelligenter Lebewesen geeignet,

die fragen können: Warum nimmt die Unordnung in der gleichen Zeilrichtung zu, in der sich auch das Universum ausdehnt?

Zunächst will ich mich mit dem thermodynamischen Zeitpfeil befassen. Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik ergibt sich aus dem Umstand, dass es stets mehr ungeordnete Zustände als geordnete gibt. Nehmen wir beispielsweise die Teile eines Puzzles in einer Schachtel. Es gibt eine und nur eine Anordnung, in der sich die Teile zu einem Bild zusammenfügen. Dagegen gibt es eine sehr große Zahl von Kombinationen, in denen Teile ungeordnet sind und kein Bild ergeben.

Nehmen wir an, ein System beginnt mit einem der wenigen geordneten Zustände. Im Laufe der Zeit wird sich das System nach den Naturgesetzen entwickeln und seinen Zustand verändern. Die Wahrscheinlichkeit spricht dafür, dass sich das System zu einem späteren Zeitpunkt in einem ungeordneten Zustand und nicht in einem geordneten befindet, weil es mehr ungeordnete Zustände gibt. Deshalb wird die Unordnung in der Regel anwachsen, wenn das System sich in einem Anfangszustand großer Ordnung befindet.

Ein Beispiel: Die Teile des Puzzles haben am Anfang in der Schachtel den geordneten Zustand, in dem sie sich zu einem Bild zusammenfügen. Schüttelt man die Schachtel, werden die Teile eine andere Anordnung annehmen. Das wird wahrscheinlich ein ungeordneter Zustand sein, in dem die Teile kein Bild ergeben, weil es viel mehr ungeordnete Zustände gibt. Einige Bruchstücke werden noch Teile des Bildes erkennen lassen, doch

je mehr man die Schachtel schüttelt, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass auch diese Kombinationen sich auflösen und in einen völlig durcheinandergewürfelten Zustand geraten. Deshalb wird die Unordnung der Teile wahrscheinlich mit der Zeit zunehmen, wenn sie die Anfangsbedingung erfüllen, dass sie in einem Zustand großer Ordnung beginnen.

Nehmen wir nun den entgegengesetzten Fall an, Gott hätte beschlossen, das Universum solle in einem Zustand großer Ordnung enden, doch es sei gleichgültig, in welchem es beginne. Dann würde sich das Universum anfangs wahrscheinlich in einem ungeordneten Zustand befinden. Folglich würde die Unordnung mit der Zeit *abnehmen*. Zersplitterte Tassen würden sich zusammenfügen und auf den Tisch springen. Alle Menschen, die solche Tassen beobachteten, würden in einem Universum leben, in dem die Unordnung mit der Zeit abnähme. Ich behaupte, solche Geschöpfe würden einen rückwärts gerichteten psychologischen Zeitpfeil haben. Das heißt, sie würden sich an Ereignisse in der Zukunft erinnern, nicht an Ereignisse in ihrer Vergangenheit. Wenn die Tasse zersprungen wäre, würden sie sich daran erinnern, wie sie auf dem Tisch gestanden hat, während sie, wenn sie auf dem Tisch stünde, sich nicht daran erinnerten, dass sie auf dem Boden lag.

Es ist schwer, über das menschliche Gedächtnis zu sprechen, weil wir nicht wissen, wie das Gehirn im Detail funktioniert. Wir wissen jedoch sehr genau, wie Computergedächtnisse – ihre Speicher – arbeiten. Ich werde deshalb den psychologischen Zeitpfeil anhand

von Computern erläutern. Ich glaube, es ist vernünftig, davon auszugehen, dass sich der Pfeil für Computer nicht von dem für Menschen unterscheidet – sonst könnte man sein Glück an der Börse machen, indem man sich einen Computer zulegte, der sich an die Preise von morgen erinnern kann!

Im Prinzip enthält der Speicher eines Computers Bausteine, die nur zwei verschiedene Zustände annehmen können. Ein einfaches Beispiel ist ein Abakus. Er besteht aus einer Reihe von Drähten. Auf jedem Draht befindet sich eine Kugel, die in zwei verschiedene Positionen gerückt werden kann. Bevor eine Einheit im Computergedächtnis gespeichert wird, befindet sich dieses in einem ungeordneten Zustand mit der gleichen Wahrscheinlichkeit für beide möglichen Zustände. (Die Kugeln des Abakus sind nach dem Zufallsprinzip über seine Drähte verteilt.) Sobald das Computergedächtnis in Wechselwirkung mit dem System tritt, das gespeichert, »erinnert« werden soll, ist es eindeutig in dem einen oder anderen Zustand, je nach dem Zustand des Systems. (Jede Abakuskugel befindet sich entweder auf der linken oder rechten Seite des Drahtes.) Der Speicher ist also von einem ungeordneten in einen geordneten Zustand übergegangen. Doch um dafür zu sorgen, dass sich der Speicher im richtigen Zustand befindet, muss eine bestimmte Energiemenge aufgewendet – die Kugel bewegt, der Computer mit Elektrizität versorgt werden. Diese Energie wird in Wärme umgewandelt und erhöht das Maß an Unordnung im Universum. Es lässt sich nachweisen, dass diese Zunahme an Unordnung stets

größer ist als die Zunahme an Ordnung im Speicher selbst. Die Wärme, die der Computer über sein Kühlgebläse abgibt, wenn er etwas in seinem Gedächtnis speichert, bedeutet also, dass die Gesamtmenge an Unordnung im Universum weiter zunimmt. Der Computer »erinnert« die Vergangenheit in derselben Zeitrichtung, in der die Unordnung zunimmt.

Folglich wird unser subjektives Empfinden für die Richtung der Zeit, der psychologische Zeitpfeil, im Gehirn vom thermodynamischen Zeitpfeil bestimmt. Wie ein Computer müssen wir uns an die Dinge in der Reihenfolge erinnern, in der die Entropie anwächst. Das macht den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik fast zu einer Trivialität. Die Unordnung wächst mit der Zeit, weil wir die Zeit in der Richtung messen, in der die Unordnung wächst. Darauf lässt sich getrost eine Wette wagen!

Doch warum muss es den thermodynamischen Zeitpfeil überhaupt geben? Anders gefragt: Warum muss sich das Universum an dem einen Ende der Zeit, dem Ende, das wir Vergangenheit nennen, in einem Zustand ausgeprägter Ordnung befinden? Warum ist es nicht ständig im Zustand völliger Unordnung? Das wäre doch wohl wahrscheinlicher. Und warum ist die Zeitrichtung, in der die Unordnung zunimmt, die Gleiche, in der das Universum expandiert?

Aus der klassischen Allgemeinen Relativitätstheorie lässt sich nicht ableiten, wie das Universum begonnen hat, weil alle bekannten Naturgesetze an der Urknall-Singularität ihre Gültigkeit verlieren. Das Universum

könnte in einem sehr gleichmäßigen und geordneten Zustand begonnen haben. Dies hätte zu den eindeutig definierten thermodynamischen und kosmologischen Zeitpfeilen geführt, die wir beobachten. Es könnte aber auch in einem sehr klumpigen und ungeordneten Zustand begonnen haben. In diesem Falle hätte sich das Universum bereits in einem Zustand völliger Unordnung befunden, sodass die Unordnung mit der Zeit nicht mehr hätte wachsen können. Sie bliebe heute entweder gleich, dann gäbe es keinen festgelegten thermodynamischen Zeitpfeil, oder sie nähme ab, dann wäre die Richtung des thermodynamischen Zeitpfeils gegenläufig zu der des kosmologischen. Keine dieser Möglichkeiten entspricht unseren Beobachtungen. Doch wie gezeigt, sagt die klassische Allgemeine Relativitätstheorie ihren eigenen Zusammenbruch voraus. Wenn sich die Krümmung der Raumzeit verstärkt, gewinnt die Wirkung der Quantengravitation an Bedeutung und die klassische Theorie ist nicht mehr in der Lage, eine gute Beschreibung des Universums zu liefern. Wir brauchen eine Quantentheorie der Gravitation, um zu verstehen, wie das Universum begonnen hat.

Im letzten Kapitel haben wir gesehen, dass man, um den Zustand des Universums zu beschreiben, auch in einer Quantentheorie der Gravitation noch angeben müsste, wie sich die möglichen Entwicklungsgeschichten des Universums an der Grenze der Raumzeit in der Vergangenheit verhielten. Die Schwierigkeit, beschrieben zu müssen, was wir nicht wissen und nicht wissen können, lässt sich nur vermeiden, wenn die Geschich-

ten der Keine-Grenzen-Bedingung genügen: Wenn sie also endlich in der Ausdehnung sind, aber keine Grenzen, Ränder oder Singularitäten besitzen. Nach dieser Auffassung war der Anfang der Zeit ein regelmäßiger Punkt der Raumzeit, und das Universum hat seine Ausdehnung in einem sehr gleichmäßigen und geordneten Zustand begonnen. Allerdings konnte es nicht völlig gleichförmig sein, weil das ein Verstoß gegen die Unschärferelation der Quantentheorie gewesen wäre. Es mussten also kleine Fluktuationen in der Dichte und Geschwindigkeit der Teilchen auftreten. Aus der Keine-Grenzen-Bedingung folgt jedoch, dass diese Fluktuationen so klein waren, wie es nach dem Unschärfeprinzip nur irgend möglich war.

Das Universum begann – so diese Hypothese – mit einer Inflationsphase mit exponentieller Expansion, in der seine Größe um einen riesigen Faktor anwuchs. Während dieser Ausdehnung blieben die Dichtefluktuationen zunächst klein, fingen aber später an zu wachsen. Regionen, in denen die Dichte etwas über dem Durchschnitt lag, wurden in ihrer Expansion durch die Gravitationskräfte der zusätzlichen Masse gebremst. Schließlich hielten diese Regionen in ihrer Expansionsbewegung inne, stürzten zusammen und bildeten Galaxien, Sterne und Wesen wie uns. Nach dieser Auffassung hat das Universum also in einem gleichmäßigen und geordneten Zustand begonnen und ist mit fortschreitender Zeit klumpig und ungeordnet geworden. Dies würde die Existenz des thermodynamischen Zeitpfeils erklären.

Doch was geschähe, wenn das Universum in seiner Ausdehnung innehielte und anfinge, sich zusammenzuziehen? Würde der thermodynamische Pfeil sich umkehren und die Unordnung mit der Zeit abnehmen? Das würde für die Menschen, die die Kontraktionsphase noch erleben, eine Fülle Science-Fiction-artiger Möglichkeiten eröffnen. Würden sie beobachten, wie sich die Scherben von Tassen auf dem Fußboden zusammenfügen und auf den Tisch zurückspringen? Würden sie sich an die Kurse von morgen erinnern und ein Vermögen an der Börse verdienen können? Es mag ein bisschen theoretisch erscheinen, wenn ich mir hier Gedanken darüber mache, was geschieht, wenn das Universum wieder zusammenstürzt, da in den nächsten zehn Milliarden Jahren nicht damit zu rechnen ist. Aber man kann auch schneller herausfinden, was geschehen wird: Man braucht nur in ein Schwarzes Loch zu springen. Der Zusammensturz eines Sterns zu einem Schwarzen Loch hat große Ähnlichkeit mit den Endphasen des kollabierenden Universums. Wenn wir also davon ausgingen, dass die Unordnung in der Kontraktionsphase des Universums abnähme, so könnten wir auch erwarten, dass die Ordnung im Innern des Schwarzen Loches größer würde. Ein Astronaut, der in ein Schwarzes Loch fiele, würde also vielleicht ein Vermögen am Roulettetisch gewinnen, weil er sich erinnern könnte, wohin die Kugel fiele, bevor er noch sein Geld gesetzt hätte. (Leider bliebe ihm nicht viel Zeit zum Spielen, denn allzu rasch würde er in eine Fadennudel verwandelt werden. Auch könnte er uns nichts über die Umkehr des ther-

modynamischen Pfeils verraten oder gar seine Gewinne auf die Bank tragen, wäre er doch hinter dem Ereignishorizont des Schwarzen Loches gefangen.)

Zunächst nahm ich an, die Unordnung nähme ab, wenn das Universum wieder in sich zusammenstürzt. Denn ich meinte, das Universum müsse während des Schrumpfungsprozesses in einen geordneten und gleichmäßigen Zustand zurückkehren. Dann wäre die Kontraktionsphase praktisch die zeitliche Umkehrung der Ausdehnungsphase. Die Menschen in der Kontraktionsphase würden rückwärts leben: Sie würden sterben, bevor sie geboren wären, und mit der Kontraktion des Universums jünger werden.

Wegen ihrer Symmetrie zwischen der Ausdehnungs- und der Kontraktionsphase ist diese Hypothese sehr verlockend. Doch man kann sie nicht einfach um ihrer selbst willen anerkennen, unabhängig von anderen Hypothesen über das Universum. Die Frage lautet: Lässt sie sich aus der Keine-Grenzen-Bedingung ableiten oder befindet sie sich im Widerspruch zu ihr? Wie gesagt, ich glaubte zunächst, aus der Keine-Grenzen-Bedingung folge tatsächlich, dass die Unordnung in der Kontraktionsphase abnähme. Zum Teil ließ ich mich durch die Analogie mit der Erdoberfläche irreführen. Wenn man davon ausgeht, dass der Anfang des Universums dem Nordpol entspreche, dann müsste das Ende des Universums dem Anfang ähnlich sein, genauso wie der Südpol dem Nordpol gleicht. Nun entsprechen aber Nord- und Südpol der Erde dem Anfang und Ende des Universums in imaginärer Zeit. Der Anfang und

das Ende in der realen Zeit können sehr verschieden voneinander sein. Ich wurde auch irregeführt durch eine Arbeit über ein einfaches Modell des Universums, in der ich zu dem Ergebnis gekommen war, dass die Kollapsphase wie die zeitliche Umkehrung der Ausdehnungsphase aussähe. Doch mein Kollege Don Page von der Penn State University konnte zeigen, dass die Keine-Grenzen-Bedingung nicht unbedingt zu dieser Annahme zwinge. Überdies stellte Raymond Laflamme, einer meiner Studenten, fest, dass schon in einem etwas komplizierteren Modell der Zusammensturz des Universums ganz anders verläuft als die Ausdehnung. Mir wurde klar, dass ich einen Fehler gemacht hatte: Aus der Keine-Grenzen-Bedingung folgte, dass die Unordnung auch während der Kontraktionsphase zunehmen würde. Danach kommt es zu keiner Umkehrung des psychologischen und des thermodynamischen Zeitpfeils während der Kontraktion des Universums oder im Innern Schwarzer Löcher.

Was soll man tun, wenn man feststellt, dass man einen solchen Fehler begangen hat? Manche Menschen geben nie zu, dass sie unrecht haben, und finden ständig neue, oft sehr widersprüchliche Argumente, um ihren Standpunkt zu vertreten – wie Eddington, als er sich gegen die Theorie der Schwarzen Löcher wandte. Andere behaupten, sie hätten die falsche Auffassung niemals vertreten oder wenn doch, dann nur, um zu zeigen, dass sie unhaltbar sei. Mir erscheint es weit besser und klarer, wenn man schwarz auf weiß zugibt, dass man sich geirrt hat. Man denke an Einstein, der

die kosmologische Konstante, die er einführte, um ein statisches Modell des Universums aufrechterhalten zu können, als größten Fehler seines Lebens bezeichnete.

Um auf den Zeitpfeil zurückzukommen – es bleibt die Frage: Warum beobachten wir, dass der thermodynamische und der kosmologische Pfeil in die gleiche Richtung zeigen? Anders gefragt: Warum nimmt die Unordnung in der gleichen Richtung der Zeit zu, in der das Universum sich ausdehnt? Wenn man, wie es die Keine-Grenzen-These nahe zu legen scheint, die Auffassung vertritt, dass sich das Universum zunächst ausdehnt und dann wieder zusammenzieht, so stellt sich außerdem die Frage, warum wir uns in der Phase der Ausdehnung und nicht in der Kontraktion befinden.

Diese Frage lässt sich mit dem schwachen anthropischen Prinzip beantworten. Die Bedingungen in der Kontraktionsphase wären nicht für die Existenz intelligenter Wesen geeignet, die fragen könnten: Warum nimmt die Unordnung in der gleichen Zeitrichtung zu, in der das Universum sich ausdehnt? Aus der Inflation in den frühen Stadien des Universums, die von der Keine-Grenzen-These postuliert wird, folgt, dass sich die Ausdehnung des Universums sehr nahe an der kritischen Geschwindigkeit vollziehen muss, bei der es ihm gerade noch gelingt, einen Zusammensturz zu vermeiden. Für einen sehr langen Zeitraum ist dieser Kollaps also auszuschließen. Dann werden alle Sterne ausgebrannt sein; ihre Protonen und Neutronen werden wahrscheinlich zu leichten Teilchen und Strahlung

zerfallen sein. Das Universum befände sich in einem Zustand fast vollständiger Unordnung. Es gäbe keinen ausgeprägten thermodynamischen Zeitpfeil mehr. Die Unordnung könnte nicht mehr zunehmen, weil das Universum bereits in einem fast völlig ungeordneten Zustand wäre. Nun ist aber ein ausgeprägter thermodynamischer Pfeil eine notwendige Vorbedingung intelligenten Lebens. Um zu leben, müssen Menschen Nahrung aufnehmen, die Energie in geordneter Form ist, und sie in Wärme, Energie in ungeordneter Form, umwandeln. Deshalb kann es kein intelligentes Leben in der Kontraktionsphase des Universums geben. Aus diesem Grund beobachten wir, dass der thermodynamische und der kosmologische Zeitpfeil in die gleiche Richtung zeigen. Nicht die Expansion des Universums verursacht die Zunahme der Unordnung, sondern die Keine-Grenzen-Bedingung bewirkt, dass nur in der Ausdehnungsphase die Unordnung zunimmt und die Verhältnisse für intelligentes Leben geeignet sind.

Fassen wir zusammen: Die Naturgesetze machen keinen Unterschied zwischen der Vorwärts- und der Rückwärtsrichtung der Zeit. Es gibt jedoch mindestens drei Zeitpfeile, die die Vergangenheit von der Zukunft unterscheiden: Der thermodynamische Pfeil, die Zeitrichtung, in der die Unordnung zunimmt; der psychologische Pfeil, die Zeitrichtung, in der wir die Vergangenheit und nicht die Zukunft erinnern; und der kosmologische Pfeil, die Zeitrichtung, in der das Universum sich ausdehnt und nicht zusammenzieht. Ich

habe gezeigt, dass der psychologische Pfeil im Wesentlichen der gleiche wie der thermodynamische ist, sodass die beiden stets in die gleiche Richtung weisen. Die Hypothese, dass das Universum keine Grenze habe, sagt die Existenz eines ausgeprägten thermodynamischen Zeitpfeils voraus, weil das Universum in einem gleichmäßigen und geordneten Zustand beginnen muss. Und wir beobachten die Übereinstimmung des thermodynamischen mit dem kosmologischen Pfeil, weil es intelligente Wesen nur in der Ausdehnungsphase geben kann. Die Kontraktionsphase wird für Geschöpfe wie uns ungeeignet sein, weil sie keinen ausgeprägten thermodynamischen Pfeil hat.

Die wachsende Fähigkeit der Menschheit, das Universum zu verstehen, hat einen kleinen Winkel der Ordnung in einem zunehmend der Unordnung verfallenden Universum geschaffen. Wenn Sie sich an jedes Wort in diesem Buch erinnern, sind in Ihrem Gedächtnis etwa zwei Millionen Informationseinheiten gespeichert: Die Ordnung in Ihrem Gehirn ist um zwei Millionen Einheiten angewachsen. Doch während Sie das Buch gelesen haben, sind mindestens tausend Kalorien geordneter Energie – in Form von Nahrung – in ungeordnete Energie umgewandelt worden – in Form von Wärme, die Sie durch Wärmeleitung und Schweiß an die Luft abgegeben haben. Dies wird die Unordnung des Universums um ungefähr zwanzig Millionen Millionen Millionen Millionen Einheiten erhöhen – also ungefähr um das Zehnmillionenmillionenmillionenfache der Ordnungszunahme in Ihrem Gehirn. Und das gilt

nur für den Fall, dass Sie sich an *alles*, was in diesem Buch steht, erinnern.

Im nächsten Kapitel werde ich versuchen, die Ordnung in unserer Ecke der Welt ein bisschen zu vergrößern, indem ich erkläre, wie die Menschen versuchen, jene Teiltheorien, die ich beschrieben habe, zu einer vollständigen einheitlichen Theorie zusammenzuführen, die alle Aspekte des Universums erfassen würde.

10

WURMLÖCHER UND ZEITREISEN

Im vorigen Kapitel haben wir uns mit der Frage beschäftigt, warum die Zeit vorwärts gerichtet ist – warum die Unordnung anwächst und weshalb wir uns an die Vergangenheit statt an die Zukunft erinnern. Wir haben so getan, als sei die Zeit ein schnurgerades Bahngleis, auf dem man nur in die eine oder die andere Richtung fahren kann.

Was aber wäre, wenn das Bahngleis Schleifen und Abzweigungen aufwiese, sodass der Zug stets vorwärts führe, aber trotzdem an einen Bahnhof gelangen könnte, an dem er schon früher einmal gehalten hätte? Mit anderen Worten: Könnte jemand in der Lage sein, in die Zukunft oder die Vergangenheit zu reisen?

H. G. Wells hat diese Möglichkeiten in seiner Erzählung »Die Zeitmaschine« ausgelotet und wurde damit zum Vorbild für ungezählte Science-Fiction-Autoren. Nun sind aber viele Fantasiegebilde der Science-Fiction-Literatur – U-Boote und Mondreisen zum Beispiel – längst zu wissenschaftlicher und technischer Wirklichkeit

geworden. Wie steht es also mit den Aussichten für Zeitreisen?

Der Gedanke, dass die physikalischen Gesetze solche Zeitreisen tatsächlich zulassen könnten, gewann erstmals konkrete Gestalt, als Kurt Gödel 1949 im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie auf eine neue Raumzeit stieß. Seinen Ruf als Mathematiker verdankte Gödel vor allem dem Beweis, dass es unmöglich ist, alle wahren Aussagen zu beweisen, selbst wenn man diesen Versuch auf das scheinbar so gut verstandene Gebiet der Arithmetik beschränkt. Wie die Unschärferelation könnte Gödels Unvollständigkeitssatz eine grundsätzliche Begrenzung unserer Fähigkeit darstellen, das Universum zu verstehen und vorherzusagen, doch scheint er sich bislang noch nicht als Hindernis bei unserer Suche nach einer vollständigen vereinheitlichten Theorie ausgewirkt zu haben.

Gödel lernte die Allgemeine Relativitätstheorie kennen, als er in späteren Jahren mit Einstein zusammen am Institute for Advanced Study in Princeton (IAS) lehrte. Seine Raumzeit hat die seltsame Eigenschaft, dass das ganze Universum rotiert. Dabei stellt sich die Frage: »Rotieren in Bezug auf was?« Die Antwort: Ferne Materie würde in diesem Fall relativ zu Richtungen rotieren, die von kleinen Kreiseln oder Gyroskopen angezeigt würden.

Unter anderem hätte dies zur Folge, dass jemand mit einem Raumschiff ins All aufbrechen und zur Erde zurückkehren könnte, bevor er sie verlassen hätte. Diese Eigenschaft ging Einstein gewaltig gegen den Strich,

denn der hatte gedacht, die Allgemeine Relativitätstheorie lasse keine Zeitreisen zu. Doch wenn man bedenkt, auf welch tönernen Füßen seine Einwände gegen den Gravitationskollaps und die Unschärferelation gestanden hatten, war das vielleicht ein ganz ermutigendes Zeichen. Allerdings entspricht die Gödelsche Lösung nicht der Welt, in der wir leben, denn es lässt sich nachweisen, dass unser Universum nicht rotiert. Außerdem ist in dieser Lösung die kosmologische Konstante, die Einstein eingeführt hatte, als er glaubte, das Universum sei unveränderlich, nicht gleich Null. Seit Hubble die Expansion des Universums entdeckt hat, ist die kosmologische Konstante überflüssig. Heute nimmt man allgemein an, sie sei Null.¹⁵ Doch inzwischen hat man im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie plausiblere Raumzeiten entdeckt, die Zeitreisen zulassen. In einer davon sind Zeitreisen im Innern eines rotierenden Schwarzen Loches möglich. Eine andere enthält zwei kosmische Strings, die sich mit hoher Geschwindigkeit aneinander vorbeibewegen. Wie der Name sagt, handelt es sich bei kosmischen Strings um saitenartige Objekte, das heißt, sie haben Länge, aber nur einen winzigen Querschnitt. Tatsächlich sind sie eher Gummibänder als Saiten, denn sie stehen unter enormer Spannung – etwa einer Million Millionen Millionen Millionen Tonnen. Ließe sich ein kosmischer String an der Erde befestigen, so könnte es diese in einer dreißigstel Sekunde von 0 auf 100 Kilometer pro Stunde beschleunigen. Mag dies auch noch so sehr nach Science-Fiction klingen, es gibt gute Gründe für die Annahme,

dass sich solche kosmischen Strings im frühen Universum als Ergebnis einer Symmetriebrechung gebildet haben könnten, wie wir sie in Kapitel fünf betrachtet haben. Da sie unter ungeheurer Spannung stünden und anfangs in beliebigen Konfigurationen entstünden, könnten sie sich auf extreme Geschwindigkeiten beschleunigen, wenn sie sich zu voller Länge entfalten.

Die Raumzeit der Gödelschen Lösung und die der kosmischen Strings sind von Anfang an so verzerrt, dass Reisen in die Vergangenheit darin jederzeit möglich sind. Es wäre zwar denkbar, dass Gott ein derart verzerrtes Universum geschaffen hat, aber wir haben keinen Grund zu dieser Annahme. Die Daten über den Mikrowellenhintergrund und die Vorkommen an leichten Elementen deuten darauf hin, dass das frühe Universum nicht hinreichend stark gekrümmt war, um Zeitreisen zuzulassen. Die gleiche Schlussfolgerung ergibt sich aus theoretischen Gründen, falls die Keine-Grenzen-Bedingung richtig ist. Also lautet die Frage: Wenn schon der Anfangszustand des Universums keine Krümmung aufweist, wie sie für Zeitreisen erforderlich ist, können wir dann vielleicht wenigstens im Nachhinein lokale Regionen der Raumzeit so stark verzerren, dass Zeitreisen doch noch möglich sind?

Eng verwandt mit dieser Frage ist das Problem schneller interstellarer oder intergalaktischer Reisen – auch dies ein Punkt, für den sich Science-Fiction-Autoren brennend interessieren. Nach den Gesetzen der Relativitätstheorie kann sich nichts schneller fort-

bewegen als das Licht. Wollten wir also ein Raumschiff zu unserem nächsten Nachbarstern Alpha Centauri schicken, der ungefähr vier Lichtjahre von uns entfernt ist, dann würden wir die tapferen Besatzungsmitglieder frühestens in acht Jahren zurückerwarten können, um von ihnen zu hören, was sie entdeckt haben. Führte die Expedition ins Zentrum unserer Galaxis, so würden bis zu ihrer Rückkehr mindestens hunderttausend Jahre verstreichen. Einen Trost gewährt die Relativitätstheorie allerdings: das im zweiten Kapitel geschilderte Zwilingsparadoxon.

Wie erwähnt, gibt es kein einheitliches Zeitmaß; vielmehr hat jeder Beobachter eine eigene Zeit, die er auf seiner mitgeführten Uhr misst. Daher kann die Reise den Raumfahrern wesentlich kürzer erscheinen als den Freunden und Verwandten auf der Erde. Allerdings wäre es kaum sehr angenehm, einige Jahre älter von einer Reise durchs All zurückzukehren und feststellen zu müssen, dass alle Menschen, die man auf der Erde zurückgelassen hat, seit Jahrtausenden tot und vergessen sind. So mussten die Science-Fiction-Autoren, um ihren Geschichten einen menschlichen Anstrich zu geben, voraussetzen, wir würden eines Tages einen Weg finden, uns schneller als das Licht fortzubewegen. Allerdings scheint den meisten dieser Autoren nicht klar zu sein, dass nach der Relativitätstheorie jemand, der schneller als das Licht ist, auch in der Zeit zurückkreisen kann, wie dem folgenden Limerick zu entnehmen ist:

There was a young lady of Wight
Who travelled much faster than light.
She departed one day,
In a relative way,
And arrived on the previous night.

Entscheidend ist, dass es nach der Relativitätstheorie kein einheitliches Zeitmaß gibt, das die Zustimmung aller Beobachter fände. Jeder Beobachter hat seinen eigenen Zeitbegriff. Wenn eine Rakete, die sich langsamer als das Licht bewegte, von Ereignis A (nehmen wir das Hundertmeterfinale bei den Olympischen Spielen 2012) zu Ereignis B (sagen wir, die Eröffnung der 100 004. Sitzung des Kongresses von Alpha Centauri) gelangen könnte, dann wären sich alle Beobachter, ungeachtet ihres unterschiedlichen Zeitmaßes, darin einig, dass Ereignis A vor Ereignis B stattgefunden hat. Gehen wir jetzt jedoch von der Annahme aus, das Raumschiff müsste schneller als das Licht fliegen, um dem Kongress das Ergebnis des Hundermeterlaufs zu überbringen. Unter diesen Umständen können sich Beobachter, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen, uneins sein, ob sich A vor B ereignet hat oder umgekehrt. Zwar mag der Kongress nach der Zeit eines Beobachters, der sich relativ zur Erde in Ruhe befindet, nach dem Lauf eröffnet worden sein. Dieser Beobachter wäre also der Meinung, das Raumschiff könne rechtzeitig von A nach B gelangen, wenn es nicht an die Grenze der Lichtgeschwindigkeit gebunden wäre. Andererseits hätte ein Beobachter in der Nähe von Alpha Centauri,

der sich fast mit Lichtgeschwindigkeit von der Erde fortbewegte, den Eindruck, Ereignis B, die Kongresseröffnung, fände vor Ereignis A, dem Hundertmeterlauf, statt. Nun besagt aber die Relativitätstheorie, dass auch Beobachtern, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen, die physikalischen Gesetze gleich erscheinen.

Dies hat sich in vielen Experimenten bestätigt und dürfte seine Gültigkeit behalten, selbst wenn wir eine noch bessere Theorie finden und sie an die Stelle der Relativitätstheorie setzen sollten. Der in Bewegung befindliche Beobachter würde also erklären: Falls Reisen mit Überlichtgeschwindigkeit möglich seien, müsse man von Ereignis B, der Kongresseröffnung, zu Ereignis A, dem Hundertmeterlauf, gelangen können. Noch ein bisschen mehr Tempo, und man könnte vor Beginn des Laufs eintreffen und eine todsichere Wette abschließen, da einem der Ausgang ja bekannt wäre.

Allerdings dürfte es nicht ganz leicht sein, die Schranke der Lichtgeschwindigkeit zu überwinden. Nach der Relativitätstheorie wird die Antriebsenergie, die erforderlich ist, um ein Raumschiff zu beschleunigen, um so größer, je näher es der Lichtgeschwindigkeit kommt. Dafür gibt es auch experimentelle Beweise, die zwar nicht Raumschiffe betreffen, wohl aber Elementarteilchen in Teilchenbeschleunigern, wie sie Fermilab oder CERN betreiben. Diese Teilchen können wir auf 99,99 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigen, aber wieviel Energie auch immer wir aufwenden, wir schaffen es nicht, sie über die Schranke der Licht-

geschwindigkeit zu treiben. Gleiches gilt für Raumschiffe: Egal, wie viel Antriebsenergie sie besitzen, über die Lichtgeschwindigkeit hinaus können sie nicht beschleunigen.

Damit scheinen beide Möglichkeiten ausgeschlossen zu sein – schnelle Raumfahrten und Zeitreisen in die Vergangenheit. Doch es gibt einen Ausweg. Möglicherweise kann man nämlich die Raumzeit so stark krümmen, dass eine Abkürzung zwischen A und B entsteht. Unter anderem ließe sich dies durch die Schaffung eines Wurmloches zwischen A und B bewerkstelligen. Wie der Name erkennen lässt, ist ein Wurmloch eine dünne Röhre, ein schmaler Gang in der Raumzeit, der zwei weit auseinanderliegende, nahezu flache Regionen verbinden kann.

Zwischen der Länge des Wurmloches und dem Abstand seiner Enden auf dem nahezu flachen Hintergrund muss keine Beziehung bestehen. Es lässt sich also ein künstliches oder natürliches Wurmloch denken, das aus der Nachbarschaft des Sonnensystems zu Alpha Centauri führt. Dabei könnte die Entfernung durchs Wurmloch nur einige Millionen Kilometer betragen, obwohl Erde und Alpha Centauri im gewöhnlichen Raum vierzig Billionen Kilometer auseinanderliegen. So wäre es möglich, das Ergebnis des Hundertmeterlaufs bei der Kongresseröffnung zu verkünden. Doch dann sollte ein Beobachter auf dem Weg zur Erde auch in der Lage sein, ein anderes Wurmloch zu finden, mit dessen Hilfe er von der Eröffnung des Kongresses auf Alpha Centauri noch vor dem Start des Laufs auf die

Erde gelangen könnte. Somit würden Wurmlöcher, wie alle anderen vorstellbaren Bewegungen mit Überlichtgeschwindigkeit, Reisen in die Vergangenheit gestatten.

Das Konzept von Wurmlöchern, die verschiedene Regionen der Raumzeit miteinander verbinden, ist keine Erfindung von Science-Fiction-Autoren, sondern kann sich einer viel vornehmeren Herkunft rühmen.

1935 haben Einstein und Nathan Rosen in einem Artikel nachgewiesen, dass nach der Allgemeinen Relativitätstheorie »Brücken« möglich sind – das, was wir heute Wurmlöcher nennen. Die Einstein-Rosen-Brücken hätten eine extrem kurze Lebensdauer, sodass kein Raumschiff sie passieren könnte – jedes Gefährt müsste an den Singularitäten scheitern, zu denen sich die Brücken verjüngen würden. Man hat allerdings die Vermutung geäußert, eine hochentwickelte Zivilisation könnte in der Lage sein, Wurmlöcher offenzuhalten. Dazu – wie zu jeder anderen Raumzeitverwerfung, die Zeitreisen ermöglicht – braucht man, wie sich zeigen lässt, eine Raumzeitregion mit negativer Krümmung, ähnlich der Oberfläche eines Sattels. Gewöhnliche Materie besitzt eine positive Energiedichte und verleiht der Raumzeit deshalb eine positive Krümmung, wie sie die Oberfläche einer Kugel aufweist. Um Raumzeit also derart zu krümmen, dass sie Reisen in die Vergangenheit zulässt, braucht man Materie mit negativer Energiedichte.

Energie hat eine gewisse Ähnlichkeit mit Geld: Bei einer positiven Bilanz dürfen Sie sie nach Belieben verbrauchen, doch ist es Ihnen nach den klassischen Gesetzen, die zu Beginn des 20. Jahrhundert galten, nicht

erlaubt, das Konto zu überziehen. Daher schließen diese Gesetze jede Möglichkeit von Zeitreisen aus. Doch wie in früheren Kapiteln beschrieben, wurden die klassischen Gesetze durch die Quantenmechanik ersetzt, die auf der Unschärferelation beruht. Die Quantengesetze sind großzügiger und gestatten es Ihnen, ein oder zwei Konten zu überziehen, vorausgesetzt, die Gesamtbilanz bleibt positiv. Mit anderen Worten: Die Quantentheorie lässt negative Energiedichte an einigen Stellen zu, so lange sie durch positive Energiedichte an anderen Stellen ausgeglichen wird, sodass die Gesamtenergie positiv bleibt. Wie es kommt, dass nach der Quantentheorie negative Energiedichten möglich sind, zeigt das Beispiel des Casimir-Effekts. Im siebten Kapitel haben wir gesehen, dass sogar der Raum, den wir »leer« wähnen, mit Paaren virtueller Teilchen und Antiteilchen gefüllt ist, die gemeinsam entstehen, sich trennen und wieder zusammenkommen, um sich zu annihilieren. Stellen wir uns nun zwei parallele Metallplatten vor, die in geringem Abstand aufgestellt sind. Für die virtuellen Photonen oder Lichtteilchen haben die Platten die Funktion von Spiegeln. Sie bilden also praktisch einen Hohlraum, ähnlich einer Orgelpfeife, die nur bei bestimmten Tönen in Resonanz gerät. Das heißt, virtuelle Photonen können in dem Zwischenraum der Platten nur auftreten, wenn der Plattenabstand einem ganzzahligen Vielfachen ihrer Wellenlänge (des Abstands zwischen zwei Wellenkämmen) entspricht. Ergibt die Breite des Hohlräums bei Division durch eine bestimmte Wellenlänge eine ganze Zahl plus einen Bruchteil, so treffen nach

mehreren Reflexionen zwischen den Platten die Kämme einer Welle mit den Tälern einer anderen zusammen, sodass die Wellen sich aufheben.

Da virtuelle Photonen zwischen den Platten nur resonante Wellenlängen besitzen können, werden sie dort in etwas geringerer Zahl vorkommen als in der Region außerhalb der Platten, wo es für virtuelle Photonen keine Einschränkung hinsichtlich ihrer Wellenlänge gibt. Folglich wird auf die Innenseiten der Platten eine geringfügig kleinere Zahl von Photonen treffen als auf die Außenseiten. Somit ist zu erwarten, dass eine Kraft auf die Platten einwirkt, die bestrebt ist, sie einander anzunähern. Tatsächlich ist eine solche Kraft mit der vorausgesagten Stärke gemessen worden. Damit haben wir den experimentellen Beweis, dass es virtuelle Teilchen gibt und dass sie reale Auswirkungen haben.

Wenn sich weniger virtuelle Photonen zwischen den Platten befinden, so ist deren Energiedichte geringer als außerhalb der Platten. Doch die Gesamtenergiedichte im »leeren« Raum fern von den Platten muss Null sein, weil die Energiedichte sonst den Raum verzerren würde und er nicht fast flach wäre. Wenn also die Energiedichte zwischen den Platten geringer ist als die Energiedichte außerhalb, dann muss sie negativ sein.

Damit verfügen wir über experimentelle Hinweise darauf, dass die Raumzeit gekrümmt sein kann (erkennbar an der Beugung des Lichts bei Sonnenfinsternissen) und dass sie die Art Krümmung aufweisen kann, die für Zeitreisen erforderlich ist (dies zeigt der Casimir-Effekt). So können wir hoffen, dass es uns eines Ta-

ges bei entsprechenden Fortschritten in Wissenschaft und Technik möglich sein wird, eine Zeitmaschine zu bauen. Aber falls das stimmt, warum ist dann noch niemand aus der Zukunft gekommen, um uns zu sagen, wie es geht? Es könnte gute Gründe geben, warum es unklug wäre, uns in unserem heutigen primitiven Entwicklungsstadium das Geheimnis der Zeitreise anzuvertrauen. Doch falls sich die Natur der Menschen in der Zwischenzeit nicht grundlegend gewandelt hätte, ist es andererseits kaum vorstellbar, dass nicht irgendein Besucher aus der Zukunft sich verplappern würde. Natürlich wird mancher einwenden, die Ufos seien ein Beweis dafür, dass uns Außerirdische oder Menschen aus der Zukunft regelmäßig besuchen. (Außerirdische könnten die Reise zur Erde nur dann in einer vernünftigen Zeit zurücklegen, wenn sie sich mit Überlichtgeschwindigkeit fortbewegten. Insofern wären beide Möglichkeiten gleichbedeutend.)

Allerdings bin ich der Meinung, dass jeder Besuch von Außerirdischen oder Menschen aus der Zukunft erheblich auffälliger und wahrscheinlich auch erheblich unerfreulicher wäre. Wenn sie sich zu erkennen geben, warum dann nur gegenüber Leuten, die nicht als glaubwürdige Zeugen gelten? Sollten sie versuchen, uns vor einer großen Gefahr zu warnen, dann haben sie keine sehr effektive Methode gewählt.

Um zu erklären, warum wir keinen Besuch aus der Zukunft erhalten, könnte man unter anderem darauf verweisen, dass die Vergangenheit festgelegt ist, denn wir haben sie beobachtet und in ihr keine Spur von

jener Verzerrung erkennen können, die erforderlich wären, um eine Reise zurück aus der Zukunft zu ermöglichen. Andererseits ist die Zukunft unbekannt und offen, sodass sie durchaus die erforderliche Krümmung enthalten könnte. Dann wäre jede Zeitreise auf die Zukunft beschränkt. Captain Kirk und die Enterprise hätten keine Chance, in der Gegenwart aufzutauchen.

Das würde eine Erklärung dafür bieten, warum wir noch nicht von Touristen aus der Zukunft überlaufen werden, es würde allerdings nicht die Probleme beseitigen, die die Vorstellung aufwirft, Menschen könnten in der Lage sein, in die Vergangenheit zu reisen und die Geschichte zu verändern. Nehmen Sie beispielsweise an, Sie gingen zurück und brächten Ihren Ururgroßvater zur Strecke, als er noch ein Kind war. Es gibt viele Spielarten dieses Paradoxons, im Wesentlichen aber gleichen sie sich alle: Man würde auf Widersprüche stoßen, wenn man die Möglichkeit hätte, die Vergangenheit zu verändern.

Für die Paradoxa der Zeitreise scheint es zwei Lösungsansätze zu geben: Den einen nenne ich hier den Ansatz der konsistenten Geschichten (*consistent histories*). Danach muss das, was in der Raumzeit geschieht, auch wenn diese derart gekrümmt ist, dass Reisen in die Vergangenheit möglich sind, mit den Naturgesetzen zu vereinbaren sein. Diesem Ansatz zufolge könnten Sie nicht in der Zeit zurückkreisen, es sei denn, die Geschichte zeigte, dass Sie bereits in der Vergangenheit waren und bei Ihrem Aufenthalt dort nicht ihren Ururgroßvater umgebracht oder irgendwelche anderen

Handlungen vollzogen haben, die zu Ihrer jetzigen Situation in der Gegenwart in Widerspruch stehen. Mehr noch – gingen Sie zurück, wären Sie nicht in der Lage, die überlieferte Geschichte zu verändern. Ihnen stünde also nicht frei zu tun, wozu Sie Lust hätten. Natürlich könnte man einwenden, dass die Willensfreiheit sowieso eine Illusion ist. Wenn es wirklich eine vollständige, vereinheitlichte Theorie gibt, die alles festlegt, dann bestimmt sie vermutlich auch unser Handeln. Doch das geschieht in einer Weise, die sich bei einem Organismus, der so kompliziert wie der Mensch ist, beim besten Willen nicht berechnen lässt. Von der Willensfreiheit des Menschen sprechen wir nur, weil wir nicht vorhersagen können, was er tut. Doch wenn er sich in ein Raumschiff setzt, ins All fliegt und zurück kommt, bevor er aufgebrochen ist, dann werden wir durchaus vorhersagen können, was er tun wird, weil sein Handeln Teil der überlieferten Geschichte ist. In dieser Situation hätte der Zeitreisende also keine Willensfreiheit mehr.

Die andere Möglichkeit, die Paradoxa der Zeitreise aufzulösen, könnte als Hypothese der alternativen Geschichte (*alternative histories*) bezeichnet werden. Ihr liegt die Überlegung zugrunde, dass Zeitreisende bei ihrem Eintritt in die Vergangenheit in alternative Geschichten geraten, die sich von der überlieferten Geschichte unterscheiden. So können sie frei handeln, ohne dem Zwang der Konsistenz mit ihrer bisherigen Geschichte unterworfen zu sein. Auf amüsante Art hat Robert Zemeckis dies in seinen »Zurück in die Zu-

kunft»-Filmen demonstriert: Marty McFly hat dort die Möglichkeit, in die Vergangenheit zu reisen und die frühe Liebesbeziehung seiner Eltern in einen befriedigenderen Verlauf zu bringen.

Die Hypothese der alternativen Geschichten hat große Ähnlichkeit mit Richard Feynmans Aufsummierung von Möglichkeiten, jener neuen Methode zur Beschreibung der Quantentheorie, die ich in den Kapiteln vier und acht erläutert habe. Feynman nimmt an, das Universum habe nicht nur eine einzige Geschichte, sondern jede denkbare Geschichte, wobei jede ihre eigene Wahrscheinlichkeit besitzt. Allerdings scheint es einen wichtigen Unterschied zwischen Feynmans Methode und der Hypothese der alternativen Geschichten zu geben. In Feynmans Aufsummierung ist jede Geschichte eine vollständige Raumzeit mit allem, was sie enthält. Dabei kann die Raumzeit durchaus so gekrümmt sein, dass es möglich ist, mit einem Raumschiff in die Vergangenheit zu fliegen. Aber die Rakete bliebe in derselben Raumzeit und damit in derselben Geschichte, die konsistent, widerspruchsfrei zu sein hätte. Mithin scheint Feynmans Aufsummierung von Möglichkeiten für die Hypothese der konsistenten und nicht für die alternativen Geschichten zu sprechen.

Allerdings gestattet Feynmans Aufsummierung von Möglichkeiten die Reise in die Vergangenheit auf der mikroskopischen Ebene. Im neunten Kapitel haben wir gesehen, dass die Naturgesetze bei Kombination der Operationen C, P und T unverändert bleiben. Daraus folgt, dass ein Antiteilchen, dessen Spin gegen den Uhr-

zeigersinn verläuft und das von A nach B reist, auch als ein gewöhnliches Teilchen verstanden werden kann, das sich im Uhrzeigersinn dreht und sich rückwärts in der Zeit von B nach A bewegt. Entsprechend ist ein gewöhnliches Teilchen, das sich in der Zeit vorwärts bewegt, gleichbedeutend mit einem Antiteilchen, das sich in der Zeit rückwärts bewegt. Wie in diesem und im siebten Kapitel dargelegt, ist »leerer« Raum mit Paaren aus virtuellen Teilchen und Antiteilchen gefüllt, die zusammen entstehen, sich trennen und wieder zusammenkommen, um sich gegenseitig zu annihilieren.

Daher kann man das Teilchenpaar auch als ein einzelnes Teilchen ansehen, das in einer geschlossenen Schleife durch die Raumzeit reist. Bewegt sich das Paar in der Zeit vorwärts (von dem Ereignis, bei dem es entsteht, zu dem Ereignis, bei dem es sich annihiliert), heißt es Teilchen. Doch wenn sich das Teilchen rückwärts in der Zeit bewegt (von dem Ereignis, bei dem sich das Paar annihiliert, zu dem Ereignis, bei dem es entsteht), bezeichnet man es als Antiteilchen, das sich in der Zeit vorwärts bewegt.

Die Fähigkeit Schwarzer Löcher, Teilchen und Strahlung zu emittieren, wurde (im siebten Kapitel) damit erklärt, dass ein Partner eines Paars aus virtuellem Teilchen und Antiteilchen in das Schwarze Loch fallen könnte, sodass der andere ohne einen Partner zurückbliebe, mit dem er sich annihilieren könnte. Nun könnte das verlassene Teilchen zwar ebenfalls ins Loch fallen, es hätte aber auch die Möglichkeit, der Anziehungskraft des Schwarzen Loches zu entkommen. In

diesem Fall würde ein Beobachter aus der Ferne den Eindruck gewinnen, das Schwarze Loch hätte ein Teilchen abgestrahlt.

Man kann sich noch ein anderes, allerdings ebenso intuitives Bild von dem Mechanismus machen, der für die Strahlung Schwarzer Löcher verantwortlich ist. Der Partner des virtuellen Paars, der ins Schwarze Loch fällt, lässt sich als Teilchen verstehen, das sich rückwärts in der Zeit aus dem Loch herausbewegt. Wenn es an den Punkt gelangt, wo das virtuelle Teilchen und das virtuelle Antiteilchen gemeinsam als Paar entstanden sind, wird es vom Gravitationsfeld zu einem Teilchen gestreut, das sich in der Zeit vorwärts bewegt und dem Schwarzen Loch entkommt. Wäre es hingegen das Teilchen des virtuellen Paars, das ins Loch fielet, könnte man es als Antiteilchen ansehen, das sich in der Zeit zurück bewegt und aus dem Schwarzen Loch hervorkommt. Folglich zeigt die Strahlung Schwarzer Löcher, dass die Quantentheorie auf mikroskopischer Ebene die Bewegung zurück in die Vergangenheit erlaubt und dass eine solche Reise beobachtbare Wirkungen hervorrufen kann.

Daher stellt sich die Frage: Gestattet die Quantentheorie auf makroskopischer Ebene Zeitreisen, die für den Menschen praktischen Wert hätten? Auf den ersten Blick scheint das der Fall zu sein. Die Feynmansche Aufsummierung von Möglichkeiten soll für *alle* Geschichten gelten. Folglich müsste sie auch die Geschichten einbeziehen, in denen die Raumzeit so gekrümmkt ist, dass Reisen in die Vergangenheit möglich sind. Warum

haben wir dann keine Probleme mit der Geschichte? Nehmen wir beispielsweise an, jemand ginge zurück und verriete den Nazis das Geheimnis der Atombombe.

Diese Probleme würden vermieden, wenn sich die Chronologieschutz-Hypothese, wie ich sie nenne, als gültig erwiese. Danach verhindern die Naturgesetze in ihrem Zusammenwirken, dass *makroskopische* Körper Informationen in die Vergangenheit tragen können. Wie die Hypothese von der kosmischen Zensur ist sie unbewiesen, hat aber so gute Gründe auf ihrer Seite, dass sie wahr sein könnte.

Welchen Grund haben wir zu der Annahme, dass es den Chronologieschutz wirklich gibt? Wenn die Raumzeit so stark gekrümmmt ist, dass Reisen in die Vergangenheit möglich sind, können virtuelle Teilchen, die in geschlossenen Schleifen durch die Raumzeit reisen, zu realen Teilchen werden, die sich mit Lichtgeschwindigkeit oder langsamer vorwärts durch die Zeit bewegen. Da diese Teilchen die Schleife beliebig oft durchlaufen können, passieren sie jeden Punkt auf ihrem Weg sehr häufig. So schlägt ihre Energie wieder und wieder zu Buche, was zu einem entsprechenden Anwachsen der Energiedichte führt. Dadurch könnte die Raumzeit eine positive Krümmung erhalten, die Reisen in die Vergangenheit ausschließen würde. Noch ist nicht klar, ob diese Teilchen eine positive oder negative Krümmung verursachen würden oder ob die Krümmung, die bestimmte Arten virtueller Teilchen hervorriefen, durch die Krümmung, die auf Einwirkung anderer Arten zurückginge, aufgehoben würde. So bleibt die Frage von

Zeitreisen offen. Ich werde darauf jedoch keine Wette abschließen. Der andere könnte ja den unfairen Vorteil haben, die Zukunft zu kennen.

11

DIE VEREINHEITLICHUNG DER PHYSIK

Wie im ersten Kapitel dargelegt, wäre es sehr schwer gewesen, auf Anhieb eine vollständige einheitliche Theorie von allem zu entwickeln, was im Universum geschieht. Stattdessen haben wir Fortschritte erzielt, indem wir Teiltheorien erarbeiteten, die einen begrenzten Ausschnitt von Ereignissen beschreiben, und indem wir andere Effekte außer Acht ließen oder für sie Näherungen in Form bestimmter Zahlen einsetzten. (In der Chemie kann man beispielsweise die Wechselwirkung von Atomen berechnen, ohne dass die innere Struktur eines Atomkerns bekannt ist.) Letztlich hoffen wir jedoch, eine vollständige, widerspruchsfreie und einheitliche Theorie zu finden, die alle diese Teiltheorien als Näherungen zusammenfasst und die nicht durch irgendwelche willkürlichen Zahlen ergänzt werden muss, um sie mit den Beobachtungsdaten zur Deckung zu bringen. Die Suche nach einer solchen Theorie läuft unter dem Stichwort »Vereinheitlichung der Physik«. Einstein verbrachte den größten Teil seines späteren Lebens mit der

erfolglosen Suche nach einer einheitlichen Theorie. Die Zeit war eben noch nicht reif: Es gab Teiltheorien für die Gravitation und die elektromagnetische Kraft, doch über die Kernkräfte war sehr wenig bekannt. Überdies weigerte sich Einstein, an die Realität der Quantenmechanik zu glauben, obwohl er wesentlich zu ihrer Entwicklung beigetragen hatte. Nun scheint aber die Unschärferelation eine elementare Eigenschaft des Universums zu sein. Eine Vereinheitlichung der Theorie muss deshalb dieses Prinzip unbedingt berücksichtigen.

Wie ich noch beschreiben werde, sind die Aussichten, eine solche Theorie zu finden, heute ungleich besser, weil wir wesentlich mehr über das Universum wissen. Doch hüten wir uns vor allzu großer Zuversicht – zu oft schon haben wir »Heureka« gerufen! Zu Anfang dieses Jahrhunderts glaubte man beispielsweise, dass sich alles mit den Eigenschaften kontinuierlicher Materie, etwa der Elastizität und der Wärmeleitung, erklären lasse. Die Entdeckung des Atomaufbaus und der Unschärferelation setzten dieser Hoffnung ein jähes Ende. 1928 war es wieder soweit: Der Physiker und Nobelpreisträger Max Born erklärte einer Gruppe von Besuchern an der Universität Göttingen: »Mit der Physik, wie wir sie kennen, ist es in einem halben Jahr vorbei.« Seine Zuversicht gründete sich auf die Entdeckung der Elektronengleichung, die Dirac kurz zuvor gelungen war. Man nahm an, dass eine ähnliche Gleichung das Proton bestimmen würde, das damals als einziges anderes Teilchen bekannt war, und dass damit die theoretische Physik an ihr Ende gelangt sei. Doch die Entdeckung des Neutrons und der

Kernkräfte machte auch diese Hoffnung zunichte. Trotz dieser Feststellung glaube ich, dass wir Grund zu vorsichtigem Optimismus haben. Möglicherweise stehen wir jetzt wirklich kurz vor dem Abschluss der Suche nach den letzten Gesetzen der Natur.

In den vorangegangenen Kapiteln habe ich die Allgemeine Relativitätstheorie, also die Teiltheorie der Gravitation, und die Teiltheorien beschrieben, welche die schwache, die starke und die elektromagnetische Kraft bestimmen. Die letzten drei lassen sich zu den sogenannten Großen Vereinheitlichten Theorien, den GUTs, zusammenfassen, die aber noch nicht sehr befriedigend sind, weil sie die Gravitation nicht einbeziehen und weil sie eine Reihe von Größen, zum Beispiel die relativen Massen der verschiedenen Teilchen, enthalten, die sich nicht aus der Theorie ableiten lassen, sondern so gewählt werden müssen, dass sie mit den Beobachtungsdaten übereinstimmen. Die Hauptschwierigkeit, eine Theorie zu finden, die die Gravitation mit den anderen Kräften vereinigt, liegt darin, dass die Allgemeine Relativitätstheorie eine »klassische Theorie« ist, das heißt, die Unschärferelation der Quantenmechanik nicht berücksichtigt. Andererseits beruhen die anderen Teiltheorien wesentlich auf der Quantenmechanik. Deshalb ist es zunächst erforderlich, die Allgemeine Relativitätstheorie mit der Unschärferelation zu verbinden. Wie wir gesehen haben, kann das zu bemerkenswerten Konsequenzen führen, etwa der, dass Schwarze Löcher nicht schwarz sind oder dass das Universum keine Singularitäten enthält, sondern ohne irgendeine

Grenze völlig in sich abgeschlossen ist. Wie ich im siebten Kapitel gezeigt habe, folgt aus der Unschärferelation leider auch, dass sogar »leerer« Raum mit Paaren virtueller Teilchen und Antiteilchen gefüllt ist. Diese Teilchen müssten über eine unendliche Energiemenge und damit – nach Einsteins berühmter Gleichung $E = mc^2$ – auch über eine unendliche Masse verfügen. Ihre Gravitationskräfte würden das Universum folglich zu unendlich kleiner Ausdehnung krümmen.

Zu ähnlichen, scheinbar absurden Unendlichkeiten kommt es in den anderen Teiltheorien, doch in allen diesen Fällen lassen sich die unendlichen Größen durch einen Prozess aufheben, der als Renormierung bezeichnet wird – die Aufhebung unendlicher Größen durch Einführung anderer unendlicher Größen. Obwohl dieses Verfahren mathematisch ziemlich zweifelhaft ist, scheint es sich in der Praxis zu bewähren und hat in Verbindung mit diesen Theorien zu Vorhersagen geführt, die sich mit den Beobachtungsdaten außerordentlich genau decken. Unter dem Gesichtspunkt einer Vereinheitlichung der Theorien hat die Renormierung jedoch einen schwerwiegenden Nachteil, denn die tatsächlichen Werte der Massen und Kräfte lassen sich nicht aus der Theorie vorhersagen, sondern müssen so gewählt werden, dass sie den Beobachtungsdaten entsprechen.

Bei dem Versuch, die Unschärferelation in die Allgemeine Relativitätstheorie einzugliedern, hat man nur zwei Größen, die sich anpassen lassen: die Stärke der Gravitation und den Wert der kosmologischen Kon-

stante. Durch ihre Anpassung lassen sich jedoch nicht alle unendlichen Werte beseitigen. So hat man eine Theorie, aus der die Unendlichkeit bestimmter Größen, zum Beispiel der Raumzeitkrümmung, zu folgen scheint, obwohl die Beobachtungen und Messungen ergeben, dass sie durchaus endlich sind. Dieses Problem bei der Verbindung von Allgemeiner Relativitätstheorie und Unschärferelation wurde schon einige Zeit vermutet, bevor eingehende Berechnungen es 1972 bestätigten. Vier Jahre danach wurde eine mögliche Lösung, »Supergravitation« genannt, vorgeschlagen: Man wollte das Teilchen mit dem Spin 2, das Graviton, das Träger der Gravitation ist, mit bestimmten neuen Teilchen verbinden, die den Spin $\frac{3}{2}$, 1, $\frac{1}{2}$ und 0 haben. In gewissem Sinne könnten dann alle diese Teilchen als verschiedene Aspekte ein und desselben »Superteilchens« betrachtet werden, wodurch die Materienteilchen mit dem Spin $\frac{1}{2}$ und $\frac{3}{2}$ mit den kräftetragenden Teilchen vereinigt wären, die den Spin 0, 1 und 2 haben. Die virtuellen Teilchen-Antiteilchen-Paare mit dem Spin $\frac{1}{2}$ und $\frac{3}{2}$ besäßen negative Energie und wären bestrebt, die positive Energie der virtuellen Paare mit dem Spin 2, 1 und 0 aufzuheben. Das wiederum würde zur Aufhebung vieler der möglichen Unendlichkeiten führen, doch man vermutete, dass einige noch übrigbleiben könnten. Die Berechnungen allerdings, die erforderlich waren, um herauszufinden, ob solche Unendlichkeiten bestehen bleiben oder nicht, wären so lang und schwierig gewesen, dass sich niemand fand, sie vorzunehmen. Selbst mithilfe eines Computers hätte man für dies Unterfan-

gen nach Schätzungen mindestens vier Jahre benötigt, wobei eine hohe Wahrscheinlichkeit bestand, dass es dabei zu mindestens einem, vermutlich sogar zu mehreren Fehlern gekommen wäre. Also hätten andere den Vorgang wiederholen müssen, um zu prüfen, ob man zu dem gleichen Ergebnis käme – womit kaum zu rechnen war!¹⁶

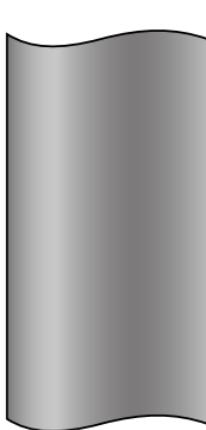
Trotz dieser Probleme und obwohl die Teilchen in den Supergravitationstheorien sich nicht mit den beobachteten Teilchen zu decken schienen, hielten die meisten Wissenschaftler die Supergravitation für den richtigen Weg zur Vereinheitlichung der Physik. Sie schien die beste Möglichkeit zur Verbindung der Gravitation mit den anderen Kräften zu sein. Doch 1984 kam es zu einem jähnen Meinungsumschwung zugunsten der sogenannten Stringtheorien. Das grundlegende Objekt in diesen Theorien ist nicht das Teilchen, das nur einen einzigen Punkt im Raum einnehmen kann, sondern etwas, das eine bestimmte Länge besitzt, aber sonst keine weitere Dimension – wie ein unendlich dünnes Saitenstück, im Englischen als »String« bezeichnet. Diese Strings (Abb. 28 und 29) können Enden haben (dann handelt es sich um sogenannte offene Strings) oder sie können sich in sich selbst zu Schleifen zusammenschließen (geschlossene Strings). Ein Teilchen nimmt in jedem gegebenen Augenblick einen Punkt des Raumes ein. Deshalb lässt sich seine Geschichte als eine Linie in der Raumzeit (die »Weltlinie«) darstellen. Ein String dagegen nimmt zu jedem gegebenen Zeitpunkt eine Linie im Raum ein. Folglich ist seine Geschichte



Offenes String



Geschlossenes String



Zeit
↑

Weltfläches des
offenen String



Weltfläches des
geschlossenen String

Abbildung 28

Abbildung 29

in der Raumzeit eine zweidimensionale Fläche, die als »Weltfläche« bezeichnet wird. (Jeder Punkt auf einer solchen Weltfläche lässt sich mittels zweier Zahlen beschreiben: die eine gibt die Zeit an und die andere die Position des Punktes auf dem String.) Die Weltfläche eines offenen String ist ein Streifen: Seine Ränder repräsentieren die Wege, welche die Stringenden in der Raumzeit zurücklegen (Abb. 28). Die Weltfläche eines geschlossenen String ist ein Zylinder oder eine Röhre (Abb. 29): Ein Querschnitt der Röhre ist ein Kreis, der der Position des String zu einem bestimmten Zeitpunkt entspricht.

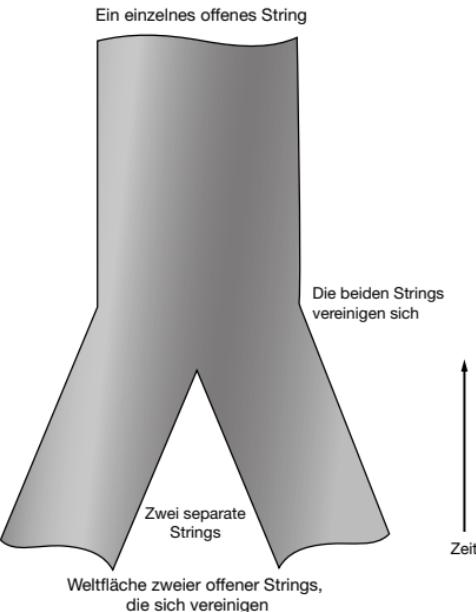


Abbildung 30

Zwei Stringstücke können sich zu einem einzigen String verbinden: Im Falle offener Strings schließen sie sich einfach an den Enden zusammen (Abb. 30), während der Vorgang bei geschlossenen Strings der Verbindung zweier Hosenbeine zu einer Hose ähnelt (Abb. 31). Entsprechend kann sich ein einzelnes Stringstück in zwei Strings aufteilen. In der Stringtheorie werden die Objekte, die man sich vorher als Teilchen vorstellte, als Wellen dargestellt, die den String entlangwandern wie die Wellen auf einer vibrierenden Drachenschnur. Die Emission eines Teilchens und seine Absorption durch ein anderes entspricht der Teilung beziehungsweise dem Zusammenschluss von Strings. So führen Teilchentheo-

Ein einzelnes geschlossenes String

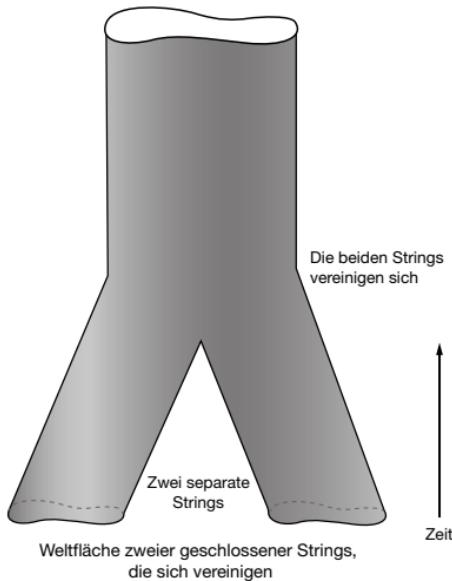


Abbildung 31

rien zum Beispiel die Gravitationswirkung der Sonne auf die Erde darauf zurück, dass ein Graviton von einem Teilchen in der Sonne emittiert und von einem Teilchen in der Erde absorbiert wird (Abb. 32). In der Stringtheorie entspricht dieser Vorgang einem H-förmigen Rohr (Abb. 33). (In gewisser Weise hat die Stringtheorie Ähnlichkeit mit der Klempnerei.) Die beiden senkrechten Seiten des H repräsentieren das Teilchen in der Sonne und in der Erde, während die waagerechte Querverbindung dem Graviton entspricht, das sich von einem zum anderen bewegt.

Die Stringtheorie hat eine eigenartige Geschichte. Sie wurde Ende der 1960er Jahre entwickelt, weil man nach

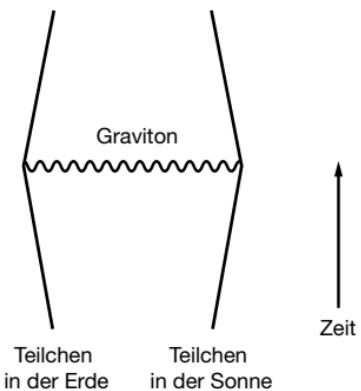


Abbildung 32

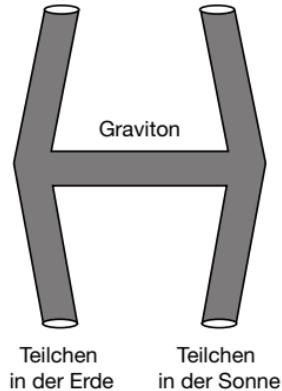


Abbildung 33

einer Theorie suchte, die die starke Kraft beschreibt. Man ging von dem Gedanken aus, dass Teilchen wie Protonen und Neutronen als Wellen auf einer Saite (String) angesehen werden können. Die starken Kräfte zwischen den Teilchen entsprechen dann den Stringstücken, die wie in einem Spinnennetz andere Stringabschnitte miteinander verbinden. Um den beobachteten Wert der starken, zwischen Teilchen wirksamen Kraft zu erreichen, mussten die Strings Gummibänder gleichen, die mit einer Zugkraft von ungefähr zehn Tonnen ausgestattet sind.

1974 veröffentlichten Joël Scherk aus Paris und John Schwartz vom California Institute of Technology einen Artikel, in dem sie zeigten, dass sich mit der Stringtheorie auch die Gravitationskraft beschreiben lässt, allerdings nur, wenn man eine sehr viel höhere Stringspannung von ungefähr tausend Millionen Millionen Millionen Millionen Millionen Millionen Millionen (eine 1 mit

39 Nullen) Tonnen zugrunde lege. Bei normalen Größenverhältnissen kommt man mit der Stringtheorie zu den gleichen Vorhersagen wie die Allgemeine Relativitätstheorie. Bei sehr geringen Abständen jedoch – kleineren als einem Tausend-Millionen-Millionen-Millionen-Millionen-Millionen-Millionstel eines Zentimeters (ein Zentimeter geteilt durch eine 1 mit dreiunddreißig Nullen) – zeigten sich Unterschiede. Doch die Arbeit der beiden Wissenschaftler fand nicht viel Resonanz, weil damals die meisten Physiker die ursprüngliche Stringtheorie über die starke Kraft zugunsten der Theorie aufgaben, die auf Quarks und Gluonen beruht, weil diese sich sehr viel besser mit den Beobachtungsdaten zu decken schien. Scherk starb unter tragischen Umständen (er litt unter Diabetes und fiel in ein Koma, als niemand in seiner Nähe war, um ihm eine Insulinspritze zu geben). Damit blieb Schwartz als einziger Vertreter der Stringtheorie übrig, doch jetzt mit dem sehr viel höher veranschlagten Wert für die Stringspannung.

1984 scheint das Interesse an Strings einen plötzlichen Auftrieb erhalten zu haben – offenbar aus zwei Gründen: Zum einen wollte der Nachweis nicht so recht gelingen, dass die Supergravitation endlich sei oder dass sie die Teilchenarten erklären könne, die wir beobachten. Zum anderen veröffentlichten John Schwartz und Mike Green vom Londoner Queen Mary College einen Artikel, in dem sie zeigten, dass die Stringtheorie in der Lage sein könnte, das Vorhandensein von Teilchen zu erklären, die, wie die Beobachtung zeigt, einen natürlichen »Linksdrall« haben. Was für Gründe auch

immer ausschlaggebend gewesen sein mögen – auf einmal befasste sich jedenfalls eine große Zahl von Wissenschaftlern mit der Stringtheorie. Bald wurde eine neue Version entwickelt, die sogenannte »heterotische« Stringtheorie, und es schien, als könnte sie die beobachteten Teilchenarten erklären.

Auch die Stringtheorien führen zu Unendlichkeiten, von denen man aber annimmt, dass sie sich in Versionen wie dem heterotischen String aufheben. (Allerdings herrscht darüber noch keine Gewissheit.) Die Stringtheorien werfen jedoch ein beträchtliches Problem auf: Sie scheinen nur dann widerspruchsfrei zu sein, wenn die Raumzeit entweder zehn oder 26 Dimensionen, nicht aber, wenn sie die üblichen vier Dimensionen hat. Gewiss, zusätzliche Raumzeitdimensionen sind ein Allgemeinplatz der Science-Fiction-Literatur, ja, sie sind dort geradezu eine Notwendigkeit, denn aus der Relativitätstheorie folgt, dass man sich nicht schneller als das Licht fortbewegen oder rückwärts in der Zeit reisen kann (vgl. Kapitel 10). Das beruht auf der Idee einer Abkürzung durch die Extradimension. Dies kann man sich folgendermaßen vorstellen: Nehmen wir an, der Raum, in dem wir leben, hätte nur zwei Dimensionen und wäre wie die Oberfläche eines Ankerrings oder Torus gekrümmmt (Abb. 34). Befände man sich auf der einen Seite des Innenrandes und wollte auf einen Punkt der anderen Seite gelangen, so hätte man dem inneren Rand des Ringes zu folgen. Wäre man hingegen in der Lage, sich in der dritten Dimension fortzubewegen, so könnte man den geraden Weg hinüber nehmen.

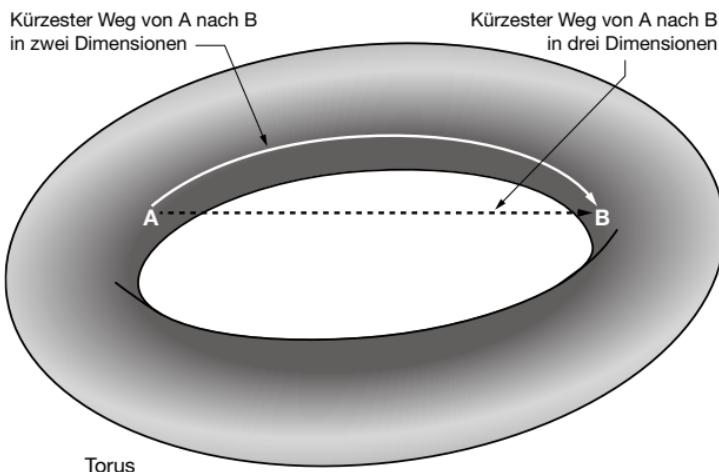


Abbildung 34

Warum bemerken wir alle diese zusätzlichen Dimensionen nicht, wenn es sie wirklich gibt? Warum nehmen wir nur drei Dimensionen des Raumes und eine der Zeit wahr? Man nimmt an, dass die anderen Dimensionen in einem Raum von sehr geringer Ausdehnung gekrümmmt sind – etwa in der Größenordnung von einem Millionstel Millionstel Millionstel Millions-tel Millionstel Zentimeter. Die Dimensionen sind also einfach zu klein, um von uns bemerkt zu werden: Für uns sind nur vier Dimensionen erkennbar, in denen die Raumzeit ziemlich flach ist. Das ist wie bei der Oberfläche eines Strohhalms: Schaut man sie sich von Nahem an, dann sieht man, dass sie zweidimensional ist (um den Ort eines Punktes auf dem Strohhalm zu beschreiben, muss man zwei Zahlenwerte angeben: die Länge in Richtung des Strohhalms und den Abstand entlang

der kreisförmigen zweiten Dimension). Aber wenn man den Strohhalm aus der Ferne betrachtet, sieht er wie ein eindimensionales Gebilde aus (bei dem der Ort eines Punktes durch einen einzigen Zahlenwert angegeben ist, nämlich die Länge in Richtung des Strohhalmes). Genau so ist es mit der Raumzeit: Auf winzigen Größenskalen ist sie zehndimensional und in sich zusammengerollt, aber auf größeren Größenskalen sieht man die zusammengerollten Extradimensionen nicht mehr. Wenn diese Vorstellung richtig ist, so bedeutet sie nichts Gutes für die Leute, die von Reisen durch die Weiten des Weltraums träumen: Die zusätzlichen Dimensionen wären viel zu klein, um ein Raumschiff durchzulassen. Außerdem wirft diese Theorie ein weiteres schwieriges Problem auf: Warum sind nur einige und nicht alle Dimensionen in einem kleinen Ball zusammengerollt? Vermutlich waren im frühen Universum alle Dimensionen stark gekrümmmt. Warum haben sich drei Dimensionen des Raumes und eine der Zeit abgeflacht, während die anderen fest zusammengerollt blieben?

Eine mögliche Antwort liefert das anthropische Prinzip. Zwei Raumdimensionen scheinen für die Entwicklung so komplizierter Wesen, wie wir es sind, nicht auszureichen. Beispielsweise müssten zweidimensionale Tiere, die auf einer zweidimensionalen Erde lebten, übereinanderklettern, um aneinander vorbeizukommen. Wenn ein zweidimensionales Geschöpf etwas fressen würde, müsste es die unverdaulichen Überreste auf dem gleichen Weg nach draußen befördern, auf dem die Nahrung nach innen gelange, denn gäbe es einen Weg durch

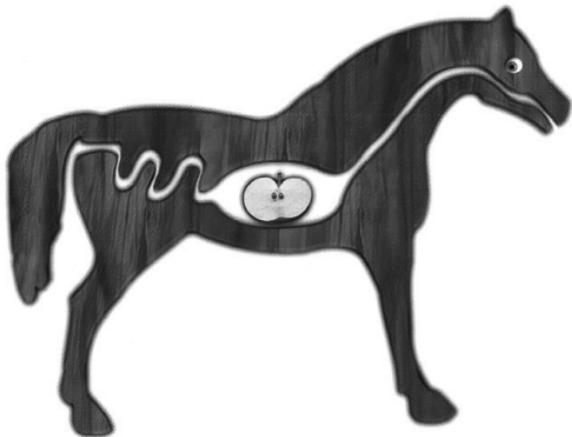


Abbildung 35

den Körper des Geschöpfes, würde er es in zwei separate Hälften zerlegen – unser zweidimensionales Wesen fiele auseinander (Abb. 35). Entsprechend lässt es sich schwer vorstellen, wie der Blutkreislauf eines solchen zweidimensionalen Geschöpfes aussehen sollte.

Probleme würde es auch bei mehr als drei Raumdimensionen geben. Die Gravitationskraft zwischen zwei Körpern würde mit der Entfernung rascher abnehmen als in drei Dimensionen. (In drei Dimensionen verringert sich die Gravitation auf ein Viertel der ursprünglichen Stärke, wenn man die Entfernung verdoppelt. In vier Dimensionen würde sie auf ein Achtel zurückgehen, in fünf Dimensionen auf ein Sechzehntel und so fort.) Damit würden die Umlaufbahnen der Planeten, zum Beispiel die der Erde um die Sonne, instabil werden: Die geringste Ablenkung von einer kreisförmigen

gen Umlaufbahn (wie sie etwa die Gravitation anderer Planeten verursachen könnte) würde dazu führen, dass sich die Erde in Spiralen auf die Sonne zu- oder von ihr fortbewegte. Dieses Verhalten der Gravitation bei wachsender Entfernung in mehr als drei Dimensionen hätte auch zur Folge, dass die Sonne keinen stabilen Gleichgewichtszustand zwischen Druck und Gravitation herstellen könnte. Sie würde entweder auseinanderfallen oder zu einem Schwarzen Loch zusammenstürzen. In beiden Fällen wäre sie als Wärme- und Lichtquelle für das Leben auf der Erde ohne großen Wert. Genauso wie die Gravitationskräfte verhielten sich im kleinräumigen Bereich die elektrischen Kräfte, die das Elektron veranlassen, um den Atomkern zu kreisen. Das Elektron würde sich also entweder gänzlich von dem Atom entfernen oder spiralförmig in den Kern wandern. In beiden Fällen hätten wir es nicht mehr mit Atomen zu tun, wie wir sie kennen.

Daraus scheint zu folgen, dass das Leben, zumindest in der uns bekannten Form, nur in Regionen der Raumzeit vorkommen kann, in denen drei Raum- und eine Zeitdimension nicht eng zusammengerollt sind. Das würde bedeuten, dass man sich auf das schwache anthropische Prinzip berufen könnte, vorausgesetzt, man kann beweisen, dass die Stringtheorie solche Regionen des Universums zumindest zulässt – und dies scheint der Fall zu sein. Es mag durchaus andere Regionen des Universums geben – oder andere Universen (was immer das bedeuten mag) –, in denen alle Dimensionen eng zusammengerollt oder in denen mehr als vier Dimen-

sionen nahezu flach sind, doch in solchen Regionen gäbe es keine intelligenten Wesen, die die Auswirkungen anderszahliger Dimensionen beobachten könnten.

Ein anderes Problem besteht darin, dass es mindestens vier verschiedene Stringtheorien gibt (eine mit offenen und drei verschiedene mit geschlossenen Strings) und Millionen Möglichkeiten, wie die von der Stringtheorie vorhergesagten Extradimensionen aufgerollt werden könnten. Warum sollte man nur eine Theorie und eine Art des Aufrollens herausgreifen? Zu der Zeit schien es keine Antwort zu geben, und der Fortschritt war ins Stocken geraten. Doch ab etwa 1994 begannen die Forscher sogenannte Dualitäten zu entdecken: Verschiedene Stringtheorien kombiniert mit verschiedenen Möglichkeiten, die Extradimensionen aufzurichten, führten in vier Dimensionen zu denselben Ergebnissen. Außerdem wurden neben Teilchen, die nur einen Punkt im Raum einnehmen, und Strings, die Linien sind, noch andere Objekte gefunden, sogenannte p-Branen, die zweidimensionale Flächen oder höherdimensionale Volumina im Raum einnehmen. (Ein Teilchen kann als 0-Bran und ein String als 1-Bran angesehen werden, aber es gibt auch p-Branen für $p = 2$ bis $p = 9$). Das scheint darauf schließen zu lassen, dass zwischen Supergravitation, Stringtheorie und p-Branen-Theorie eine Art Demokratie herrscht: Sie scheinen zusammenzupassen, aber von keiner lässt sich sagen, sie sei grundlegender als die anderen. Offenbar sind sie verschiedene Annäherungen an eine fundamentale Theorie, die in verschiedenen Situationen gültig sind.

Bislang sind alle Versuche, diese fundamentale Theorie zu finden, ohne Erfolg geblieben. Allerdings glaube ich nicht, dass sich die grundlegende Theorie in einer einzigen Formulierung zusammenfassen lässt, so wenig wie sich – nach Gödel – die Arithmetik in einer endlich langen Liste von Axiomen ausdrücken lässt. Vielleicht verhält es sich wie bei Karten: Man kann die Oberfläche der Erde oder einen Ankerring nicht auf einer einzigen Karte darstellen: Im Fall der Erde braucht man mindestens zwei Karten und für den Ankerring sogar vier Karten, um jeden Punkt zu überdecken. Jede Karte ist nur in einer begrenzten Region gültig, aber verschiedene Karten werden einen Überschneidungsbereich besitzen. Der Kartensatz liefert eine vollständige Beschreibung der Oberfläche. Entsprechend könnte es in der Physik notwendig sein, verschiedene Formulierungen in unterschiedlichen Situationen zu verwenden. Aber zwei verschiedene Formulierungen würden in Situationen übereinstimmen, in denen sie beide anwendbar wären. Der ganze Satz verschiedener Formulierungen könnte als eine vollständige einheitliche Theorie betrachtet werden, obwohl sie nicht durch einen einzigen Satz von Postulaten ausgedrückt werden kann.

Doch kann es überhaupt eine solche einheitliche Theorie geben? Oder jagen wir vielleicht nur einem Phantom hinterher? Drei Möglichkeiten zeichnen sich ab:

1. Es gibt wirklich eine vollständige einheitliche Theorie, die wir eines Tages entdecken werden, wenn wir findig genug sind.
2. Es gibt keine endgültige Theorie des Universums, nur eine unendliche Folge von Theorien, die das Universum von Mal zu Mal genauer beschreiben.
3. Es gibt keine Theorie des Universums; Ereignisse können nicht über ein gewisses Maß an Genauigkeit hinaus vorhergesagt werden, jenseits dessen sie zufällig und beliebig auftreten.

Manch einer wird der dritten Möglichkeit zuneigen, weil ein vollständiges System von Gesetzen Gottes Freiheit einschränken würde, seine Meinung zu ändern und in die Welt einzudringen. Dies erinnert ein bisschen an das alte Paradoxon: Kann Gott einen Stein so schwer machen, dass er ihn nicht zu heben vermag? Doch der Gedanke, Gott könnte seine Meinung ändern, ist ein Beispiel für den Trugschluss, auf den Augustinus hingewiesen hat – die Vorstellung nämlich, Gott existiere in der Zeit. Die Zeit ist nur eine Eigenschaft des Universums, das Gott geschaffen hat. Vermutlich wusste er, was er vorhatte, als er es machte!

Mit der Entwicklung der Quantenmechanik sind wir zu der Erkenntnis gekommen, dass sich Ereignisse nicht mit gänzlicher Genauigkeit vorhersagen lassen. Wenn man möchte, kann man dieses Zufallselement natürlich dem Eingreifen Gottes zuschreiben, doch es wäre eine sehr merkwürdige Form der Intervention: Es gibt keinen Anhaltspunkt dafür, dass sie irgendeinem Zweck

dienen würde. Denn wäre das der Fall, könnte dieser Eingriff definitionsgemäß nicht zufällig sein. In neuerer Zeit haben wir die dritte Möglichkeit durch eine Neudefinition der wissenschaftlichen Zielsetzungen ausgeschlossen: Unsere Absicht ist es, ein System von Gesetzen zu formulieren, mit deren Hilfe wir Ereignisse nur innerhalb der Grenzen vorhersagen können, die durch die Unschärferelation gesetzt werden.

Die zweite Möglichkeit – dass es eine unendliche Folge von immer genaueren Theorien gibt – deckt sich mit allen Erfahrungen, die wir bisher gemacht haben. Immer wieder haben wir die Genauigkeit unserer Messungen verbessert oder eine neue Klasse von Beobachtungen erreicht, woraufhin wir neue Phänomene entdeckt haben, die von der vorhandenen Theorie nicht vorhergesagt wurden, und um sie zu erklären, mussten wir unsere Theorie abändern und weiterentwickeln. Deshalb wäre es keine große Überraschung, wenn die gegenwärtige Generation Großer Vereinheitlichter Theorien unrecht hätte mit ihrer Behauptung, dass nichts Wesentliches geschehen wird zwischen der elektroschwachen Vereinheitlichungsenergie von ungefähr 100 GeV und der Großen Vereinheitlichungsenergie von ungefähr einer Billiarde GeV. Man könnte durchaus unterhalb der Struktur des Standardmodells noch eine oder weitere Struktur-Ebenen finden, mit Teilchen, die noch elementarer sind als die heute als »Elementarteilchen« geltenden Quarks und Elektronen.

Allerdings scheint es, als könnte die Gravitation dieser Folge von »Schachteln in Schachteln« ein Ende setzen.

zen. Hätte ein Teilchen eine Energie über der Grenze, die als Planck-Energie bezeichnet wird – zehn Millionen Millionen Millionen GeV (eine 1 mit 19 Nullen) –, wäre seine Energie so konzentriert, dass es sich vom übrigen Universum trennen und ein kleines Schwarzes Loch bilden würde. Deshalb scheint die Folge von immer genauereren Theorien irgendwo ein Ende haben zu müssen, wenn wir zu immer höheren Energien greifen. Es müsste also eine endgültige Theorie des Universums geben. Natürlich ist die Planck-Energie durch Welten getrennt von den etwa hundert GeV, die wir gegenwärtig in unseren Laboratorien erzeugen können. Diesen Abstand werden wir in absehbarer Zukunft sicherlich nicht mit Teilchenbeschleunigern überbrücken können! In sehr frühen Stadien des Universums müssten jedoch solche Energien aufgetreten sein. Ich glaube, dass die Untersuchung des frühen Universums und die Forderung mathematischer Widerspruchsfreiheit gute Voraussetzungen dafür bieten, dass einige von uns noch eine vollständige einheitliche Theorie erleben werden – immer vorausgesetzt, dass wir uns nicht vorher in die Luft jagen.

Was würde es bedeuten, wenn wir tatsächlich die endgültige Theorie des Universums entdeckten? Wie im ersten Kapitel dargelegt, könnten wir nie ganz sicher sein, ob wir tatsächlich die richtige Theorie gefunden hätten, da Theorien sich nicht beweisen lassen. Doch wenn die Theorie mathematisch schlüssig wäre und stets Vorhersagen lieferte, die sich mit den Beobachtungen deckten, so könnten wir mit einiger Sicherheit da-

von ausgehen, dass es die richtige wäre. Damit wäre ein langes und ruhmreiches Kapitel in der Geschichte des menschlichen Bemühens um das Verständnis des Universums abgeschlossen. Aber auch der Laie würde eine ganz neue Vorstellung von den Gesetzen gewinnen, die das Universum regieren. Zu Newtons Zeit konnte der Gebildete noch den gesamten Horizont menschlichen Wissens überblicken, zumindest in groben Umrissen. Seither aber hat sich die Entwicklung der Wissenschaften so beschleunigt, dass dazu niemand mehr imstande ist. Da man die Theorien ständig verändert, um sie neuen Beobachtungen anzupassen, können sie nie zu einer für den Laien verständlichen Form verarbeitet und vereinfacht werden. Man muss schon ein Spezialist sein, und selbst dann kann man nur hoffen, einen kleinen Ausschnitt aus dem Spektrum wissenschaftlicher Theorien wirklich zu verstehen. Überdies ist das Tempo des Fortschritts so groß, dass der Wissensstoff, den man an der Schule oder Universität vermittelt bekommt, stets schon ein bisschen veraltet ist. Nur wenige Menschen vermögen mit dem raschen Wandel unserer Erkenntnisse Schritt zu halten, und das nur, wenn sie dafür ihre ganze Zeit opfern und sich auf ein kleines Fachgebiet spezialisieren. Alle anderen haben kaum eine Vorstellung von den Fortschritten, die erzielt werden, und der Aufregung, die sie hervorrufen. Vor knapp hundert Jahren haben, wenn man Eddington Glauben schenken darf, nur zwei Menschen die Allgemeine Relativitätstheorie verstanden. Heute sind es Zehntausende von Hochschulabsolventen, und viele Millionen Men-

schen sind zumindest in großen Zügen mit ihr vertraut. Würde man eine vollständige und einheitliche Theorie entdecken, wäre es nur eine Frage der Zeit, bis man sie in der gleichen Weise so weit verarbeitet und vereinfacht hätte, dass sie sich zumindest skizzenhaft in den Schulen vermitteln ließe. Wir wären dann alle bis zu einem gewissen Grad in der Lage, die Gesetze zu verstehen, die unser Universum bestimmen und die für unsere Existenz verantwortlich sind.

Selbst wenn wir eine vollständige einheitliche Theorie entdecken, würde dies nicht bedeuten, dass wir ganz allgemein Ereignisse vorhersagen könnten. Das hat zwei Gründe: Erstens wird unsere Vorhersagefähigkeit durch die Unschärferelation der Quantenmechanik eingeschränkt. Dieses Prinzip lässt sich durch nichts außer Kraft setzen. In der Praxis wirkt sich diese Einschränkung jedoch weniger restriktiv aus als die zweite. Sie erwächst aus unserer Unfähigkeit, die Gleichungen der Theorie, von sehr einfachen Situationen abgesehen, exakt zu lösen. (Wir können noch nicht einmal exakte Lösungen für die Bewegung dreier Körper in Newtons Gravitationstheorie finden, und die Schwierigkeiten wachsen mit der Zahl der Körper und der Komplexität der Theorie.) Die Gesetze, die – von ganz extremen Bedingungen abgesehen – das Verhalten der Materie regieren, sind uns bereits bekannt. Vor allem kennen wir die grundlegenden Gesetze, die chemische und biologische Prozesse steuern. Aber das berechtigt uns nicht, von gelösten Problemen in jenen Bereichen zu sprechen. Jedenfalls haben wir zum Beispiel bislang wenig

Erfolg damit gehabt, menschliches Verhalten aus mathematischen Gleichungen vorherzusagen. Selbst wenn wir also ein vollständiges System von grundlegenden Gesetzen fänden, stünden wir in den folgenden Jahren noch immer vor der schwierigen Aufgabe, bessere Näherungsmethoden zu entwickeln, um brauchbare Vorhersagen über wahrscheinliche Konsequenzen komplizierter realer Situationen zu machen. Eine vollständige, widerspruchsfreie einheitliche Theorie ist nur der erste Schritt: Unser Ziel ist ein vollständiges *Verständnis* der Ereignisse, die uns umgeben, und unserer Existenz.

12

SCHLUSS

Wir sehen uns in einer befremdlichen Welt leben. Wir möchten verstehen, was wir um uns her wahrnehmen, und fragen: Wie ist das Universum beschaffen? Welchen Platz nehmen wir in ihm ein, woher kommt es und woher kommen wir? Warum ist es so und nicht anders?

Indem wir versuchen, diese Fragen zu beantworten, machen wir uns ein »Weltbild« zu eigen. Nicht anders als der unendliche Turm von Riesenschildkröten, auf dem die flache Erde ruht, ist auch die Superstringtheorie ein solches Weltbild. Wenn diese auch sehr viel mathematischer und genauer ist als der Schildkrötenturm, so sind sie doch beide nur Theorien des Universums. Beide sind sie durch Beobachtung nicht zu belegen: Niemand hat je die Riesenschildkröte mit der Erde auf ihrem Rücken entdeckt, aber ein Superstring ist bislang auch noch nicht gesichtet worden. Doch kann die Schildkrötentheorie nicht als gute wissenschaftliche Theorie gelten, weil aus ihr folgt, dass die Menschen vom Rand der Welt hinunterfallen müssen. Dies deckt sich nicht mit unserer Erfahrung, es sei denn, es erwiese

sich als die Erklärung für das angebliche Verschwinden der Menschen im Bermuda-Dreieck.

Die ersten theoretischen Versuche, das Universum zu beschreiben und zu erklären, beriefen sich auf Götter und Geister, die die Ereignisse und Naturerscheinungen lenkten und auf sehr menschliche, unberechenbare Weise handelten. Sie bewohnten die Natur – Flüsse und Berge, aber auch Himmelskörper wie Sonne und Mond. Sie mussten besänftigt und freundlich gestimmt werden, wenn die Felder fruchtbar sein und die Jahreszeiten ihren gewohnten Gang nehmen sollten. Allmählich bemerkten die Menschen jedoch gewisse Regelmäßigkeiten: Die Sonne ging immer im Osten auf und im Westen unter, ganz gleich, ob man dem Sonnengott geopfert hatte oder nicht. Sonne, Mond und Planeten folgten genau festgelegten Himmelsbahnen, die man genau vorhersagen konnte. Die Sonne und der Mond mochten zwar Götter sein, aber sie gehorchten dennoch strengen Gesetzen, offenbar ohne sich gelegentliche Seitensprünge zu gestatten – lässt man Geschichten wie die des Josua außer acht, für den die Sonne auf ihrem Weg innehaltet.

Zunächst zeigten sich diese Regelmäßigkeiten und Gesetze nur in der Astronomie und einigen wenigen anderen Situationen. Doch mit fortschreitender Entwicklung der menschlichen Kultur wurden immer mehr Regelmäßigkeiten und Gesetze entdeckt – vor allem in den letzten dreihundert Jahren. Der Erfolg dieser Gesetze ermutigte Laplace Anfang des 19. Jahrhunderts, den wissenschaftlichen Determinismus zu verkünden.

Es werde ein System von Gesetzen geben, behauptete er, aus dem sich die Entwicklung des Universums detailliert ableiten lasse, wenn dessen Zustand zu einem beliebigen Zeitpunkt vollständig bekannt sei.

Der Laplacesche Determinismus war in zweierlei Hinsicht unvollständig: Er ließ offen, woran man diese Gesetze erkennen könne, und er versäumte es, den Anfangszustand des Universums zu bestimmen. Das blieb Gott überlassen. Nach dieser Auffassung entschied Gott über den Beginn des Universums und über die Gesetze, die den Ablauf der Ereignisse bestimmen. Er enthält sich aber aller Eingriffe in das Universum, sobald der Anfang gemacht ist. Damit wurde Gott in die Gebiete abgedrängt, die die Wissenschaft des 19. Jahrhunderts nicht verstand.

Wir wissen heute, dass sich die deterministischen Hoffnungen Laplaces nicht einlösen lassen, jedenfalls nicht so, wie er sich das vorstellte. Aus der Unschärferelation der Quantenmechanik folgt, dass sich bestimmte Größenpaare, also etwa die Position und die Geschwindigkeit eines Teilchens, nicht beide mit absoluter Genauigkeit vorhersagen lassen.

Die Quantenmechanik löst dieses Problem durch eine Klasse von Quantentheorien, in denen Teilchen keine festgelegten Positionen und Geschwindigkeiten haben, sondern durch eine Welle repräsentiert werden. Die Quantentheorien sind insofern deterministisch, als sie Gesetze für die Entwicklung der Welle mit der Zeit angeben: Wenn man die Welle zu einem bestimmten Zeitpunkt kennt, dann kann man sie für einen anderen

Zeitpunkt berechnen. Das unvorhersagbare Zufallselement kommt nur dann ins Spiel, wenn wir versuchen, die Welle in Hinblick auf die Positionen und Geschwindigkeiten der Teilchen zu interpretieren. Aber vielleicht ist das unser Fehler: Vielleicht gibt es keine Teilchenpositionen und -geschwindigkeiten, sondern nur Wellen. Mag sein, dass wir lediglich versuchen, die Wellen in unser vorgefasstes Schema von Positionen und Geschwindigkeiten hineinzuzwingen. Das daraus resultierende Missverhältnis wäre die Ursache der scheinbaren Unvorhersagbarkeit.

So haben wir die Aufgabe der Wissenschaft neu definiert: Es geht um die Entdeckung von Gesetzen, die es uns ermöglichen, Ereignisse innerhalb der Grenzen vorherzusagen, die uns die Unschärferelation setzt. Die Frage bleibt jedoch: Wie oder warum wurden die Gesetze und der Anfangszustand des Universums gewählt?

In diesem Buch habe ich mich auf die Gesetze konzentriert, die die Gravitation betreffen, weil sie den großräumigen Aufbau des Universums bestimmt, auch wenn sie die schwächste der vier Kräfte ist. Die Gravitationsgesetze vertragen sich nicht mit der in die Moderne hineinragenden Auffassung, das Universum verändere sich nicht mit der Zeit. Da die Gravitation stets als Anziehungskraft wirkt, muss es sich entweder ausdehnen oder zusammenziehen. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie muss es in der Vergangenheit einen Zustand unendlicher Dichte gegeben haben, den Urknall, der den Anfang der Zeit markiert, und muss es entsprechend bei der Umkehrung dieses Prozesses und

dem Zusammensturz des gesamten Universums einen weiteren Zustand unendlicher Dichte in der Zukunft geben, den großen Kollaps, das Ende der Zeit. Selbst wenn das ganze Universum nicht wieder in sich zusammenstürzt, so gibt es doch Singularitäten in allen abgegrenzten Regionen, die zu Schwarzen Löchern kolabiert sind. Diese Singularitäten bedeuten für jeden, der in das Schwarze Loch hineinfällt, das Ende der Zeit. Beim Urknall und in anderen Singularitäten – so die Theorie – büßen alle Gesetze ihre Geltung ein, sodass es noch immer in Gottes Belieben stünde, zu wählen, was geschehen ist und wie alles begonnen hat.

Wenn wir die Quantenmechanik mit der Allgemeinen Relativitätstheorie verbinden, so scheint sich eine neue Möglichkeit zu eröffnen: Raum und Zeit können zusammen einen endlichen, vierdimensionalen Raum ohne Singularitäten und Grenzen bilden, ähnlich wie die Oberfläche der Erde, nur mit mehr Dimensionen. Es scheint, dass diese Theorie viele der beobachteten Eigenschaften des Universums erklären kann – zum Beispiel seine großräumige Gleichförmigkeit und die kleinräumigen Verstöße gegen die Einheitlichkeit in Gestalt von Galaxien, Sternen und auch Menschen. Sie kann sogar den Zeitpfeil erklären, den wir beobachten. Doch wenn das Universum vollständig in sich abgeschlossen ist, ohne Singularitäten und Grenzen, und sich erschöpfend durch eine einheitliche Theorie beschreiben ließe, so hätte dies tiefgreifende Auswirkungen auf Gottes Rolle als Schöpfer.

Einstein hat einmal gefragt: »Wie viel Entschei-

dungsfreiheit hatte Gott bei der Erschaffung des Universums?« Wenn die Keine-Grenzen-These zutrifft, so blieb ihm bei der Wahl der Anfangsbedingungen überhaupt keine Freiheit. Natürlich hätte es immer noch in seinem Ermessen gestanden, die Gesetze zu wählen, die das Universum bestimmen. Doch eine echte Entscheidungsfreiheit könnte er bei dieser Wahl auch nicht gehabt haben, denn es ist durchaus möglich, dass es nur sehr wenige vollständige einheitliche Theorien gibt – vielleicht sogar nur eine, zum Beispiel die heterotische Stringtheorie –, die in sich widerspruchsfrei sind und die Existenz von so komplizierten Gebilden wie den Menschen zulassen, die die Gesetze des Universums erforschen und nach dem Wesen Gottes fragen können.

Auch wenn nur *eine* einheitliche Theorie möglich ist, so wäre sie doch nur ein System von Regeln und Gleichungen. Wer bläst den Gleichungen den Odem ein und erschafft ihnen ein Universum, das sie beschreiben können? Die übliche Methode, nach der die Wissenschaft sich ein mathematisches Modell konstruiert, kann die Frage, warum es ein Universum geben muss, welches das Modell beschreibt, nicht beantworten. Warum muss sich das Universum all dem Ungemach der Existenz unterziehen? Ist die einheitliche Theorie so zwingend, dass sie diese Existenz herbeizitiert? Oder braucht das Universum einen Schöpfer, und wenn ja, wirkt er noch in irgendeiner anderen Weise auf das Universum ein? Und wer hat ihn erschaffen?

Bislang waren die meisten Wissenschaftler zu sehr mit der Entwicklung neuer Theorien beschäftigt, in

denen sie zu beschreiben versuchten, *was* das Universum ist, um die Frage nach dem *Warum* zu stellen. Andererseits waren die Leute, deren Aufgabe es ist, nach dem *Warum* zu fragen – die Philosophen –, nicht in der Lage, mit der Entwicklung naturwissenschaftlicher Theorien Schritt zu halten. Im 18. Jahrhundert betrachteten die Philosophen den gesamten Bereich menschlicher Erkenntnis, einschließlich der Naturwissenschaften, als ihr angestammtes Gebiet und erörterten auch Fragen wie etwa die nach dem Anfang des Universums. Im 19. und 20. Jahrhundert jedoch wurde die Naturwissenschaft zu fachlich und mathematisch für Laien, zu denen nun auch die Philosophen gehörten. Sie engten den Horizont ihrer Fragen immer weiter ein, bis schließlich Wittgenstein, einer der bekanntesten Philosophen unseres Jahrhunderts, erklärte: »Alle Philosophie ist ›Sprachkritik‹ ... [ihr] Zweck ist die logische Klärung von Gedanken.« Was für ein Niedergang für die große philosophische Tradition von Aristoteles bis Kant!

Wenn wir jedoch eine vollständige Theorie entdecken, dürfte sie nach einer gewissen Zeit in ihren Grundzügen für jedermann verständlich sein, nicht nur für eine Handvoll Spezialisten. Dann werden wir uns alle – Philosophen, Naturwissenschaftler und Laien – mit der Frage auseinandersetzen können, warum es uns und das Universum gibt. Wenn wir die Antwort auf diese Frage finden, wäre das der endgültige Triumph der menschlichen Vernunft – denn dann würden wir Gottes Plan kennen.

EINSTEIN, GALILEI, NEWTON

EINSTEINS Engagement in Fragen der Kernwaffenpolitik ist allgemein bekannt: Er unterzeichnete den berühmten Brief an Präsident Franklin Roosevelt, in dem die Vereinigten Staaten beschworen wurden, dieses Problem ernst zu nehmen, und er beteiligte sich nach 1945 an den Bestrebungen, einen Atomkrieg zu verhindern. Doch das waren nicht nur einzelne Aktionen eines Wissenschaftlers, der in die Politik hineingezogen wurde. Einsteins ganzes Leben war, wie er es selbst ausgedrückt hat, »hin- und hergerissen zwischen Politik und Gleichchungen«.

Einsteins früheste politische Aktivitäten fielen in den Ersten Weltkrieg, als er Professor in Berlin war. Erschüttert vom Kriegsgeschehen, nahm er an Protestkundgebungen gegen den Krieg teil. Sein Eintreten für zivilen Ungehorsam und die Beteiligung an öffentlichen Aufrufen zur Kriegsdienstverweigerung machten ihn bei seinen Kollegen nicht gerade beliebt. Nach dem Krieg bemühte er sich um die Aussöhnung der Völker und um bessere internationale Beziehungen. Auch diese Aktionen schadeten seinem Ansehen, und schon bald wurde es ihm erschwert, in die Vereinigten Staaten zu

reisen, auch wenn er dort nur Vorlesungen und Vorträge halten wollte.

Das zweite große Wirkungsfeld Einsteins war der Zionismus. Obwohl jüdischer Herkunft, lehnte er die biblische Gottesvorstellung ab. Als ihm jedoch die antisemitischen Tendenzen vor und während des Zweiten Weltkriegs immer bewusster wurden, begann er sich nach und nach mit dem Judentum zu identifizieren und wurde später ein überzeugter Anhänger des Zionismus. Abermals hinderte ihn die Tatsache, dass seine Auffassungen alles andere als populär waren, nicht daran, seine Meinung zu sagen. Man griff seine Theorien an. Eine Anti-Einstein-Organisation wurde gegründet. Ein Mann wurde wegen Anstiftung zum Mord an Einstein vor Gericht gestellt (und zu einer lächerlichen Geldstrafe von sechs Dollar verurteilt). Doch Einstein war nicht aus der Ruhe zu bringen. Als ein Buch mit dem Titel »100 Autoren gegen Einstein« erschien, meinte er: »Wenn ich unrecht hätte, wäre einer genug!«

1933 kam Hitler an die Macht. Einstein hielt sich gerade in Amerika auf und erklärte, er werde nicht nach Deutschland zurückkehren. Die Nazis plünderten sein Haus und zogen sein Bankguthaben ein, und die Schlagzeile einer Berliner Tageszeitung lautete: »Gute Nachrichten von Einstein – er kommt nicht zurück.« Angesichts der nationalsozialistischen Bedrohung sagte sich Einstein vom Pazifismus los und empfahl den Vereinigten Staaten, eine eigene Atombombe zu entwickeln, weil er befürchtete, dass deutsche Wissenschaftler eine solche Bombe bauen könnten. Doch noch bevor

die erste Atombombe explodiert war, warnte er öffentlich vor den Gefahren eines Atomkriegs und schlug eine internationale Kernwaffenkontrolle vor.

Alles, was Einstein sein Leben lang für den Frieden tat, hat wahrscheinlich wenig Dauer gehabt – ganz gewiss hat er sich damit keine Freunde gemacht. Nur sein öffentliches Eintreten für den Zionismus fand gebührende Anerkennung: 1952 wurde ihm die Präsidentschaft des jungen Staates Israel angeboten. Er lehnte ab mit der Begründung, er sei zu naiv für die Politik. Vielleicht hatte er in Wirklichkeit einen anderen Grund. Um ihn noch einmal zu zitieren: »Gleichungen sind wichtiger für mich, weil die Politik für die Gegenwart ist, aber eine Gleichung ist etwas für die Ewigkeit.«

* * *

GALILEI hat wahrscheinlich mehr als irgendein anderer zur Entstehung der modernen Naturwissenschaften beigetragen. Sein berühmter Konflikt mit der katholischen Kirche war von zentraler Bedeutung für seine Philosophie, denn Galilei hat als einer der Ersten die Auffassung vertreten, der Mensch könne verstehen, was die Welt bewegt, und – mehr noch – er könne zu diesem Verständnis durch Beobachtung der wirklichen Welt gelangen.

Von Anfang an hatte Galilei an die Kopernikanische Theorie geglaubt (dass die Planeten die Sonne umkreisen), doch erst als er die erforderlichen Beweise entdeckte, begann er, öffentlich für sie einzutreten. Er

publizierte seine Schriften über die Theorie des Kopernikus in italienischer Sprache (nicht auf Latein, wie damals in akademischen Kreisen üblich), sodass seine Auffassungen bald breite Zustimmung außerhalb der Universitäten fanden. Das verärgerte die aristotelischen Professoren, die sich gegen ihn verbündeten und die katholische Kirche zu einem Verbot der Kopernikanischen Lehre aufriefen.

Beunruhigt reiste Galilei zu einem Gespräch mit den kirchlichen Autoritäten nach Rom. Es liege nicht in der Absicht der Bibel, uns über wissenschaftliche Theorien zu unterrichten, argumentierte er. Man könne doch im Allgemeinen davon ausgehen, dass die Bibel dort, wo sie dem gesunden Menschenverstand widerspreche, allegorisch zu verstehen sei. Doch die Kirche hatte Angst vor einem Skandal, der sie in ihrem Kampf gegen den Protestantismus hätte schwächen können, und entschloss sich deshalb zu repressiven Maßnahmen. 1616 erklärte sie die Kopernikanische Lehre für »falsch und irrig« und verlangte von Galilei, er dürfe sie nie wieder »behaupten, verteidigen und lehren«. Galilei fügte sich.

1623 wurde ein langjähriger Freund Galileis zum Papst ernannt. Sofort bemühte sich Galilei um den Widerruf des Dekrets von 1616. Das gelang ihm nicht, aber er bekam die Erlaubnis, ein Buch über die Aristotelische und die Kopernikanische Theorie zu schreiben – unter zwei Bedingungen: Er durfte nicht Partei ergreifen, und er sollte zu dem Ergebnis kommen, dass der Mensch auf keinen Fall erkennen könne, wie die Welt beschaffen sei, weil Gott in seiner unbeschränkten Allmacht die

gleichen Wirkungen auch auf eine Weise hervorbringen könne, die dem Menschen nicht vorstellbar sei.

Das Buch, der »Dialog über die großen Weltsysteme«, wurde 1632 abgeschlossen und mit dem vollen Einverständnis der Zensur veröffentlicht. Sofort nach Erscheinen feierte man es in ganz Europa als literarisches und philosophisches Meisterwerk. Schon bald wurde dem Papst klar, dass die Menschen in dem Buch eine überzeugende Beweisführung für die Richtigkeit der Kopernikanischen Lehre sahen, und er bedauerte, seiner Veröffentlichung zugestimmt zu haben. Er erklärte, trotz der offiziellen Billigung der Zensur habe Galilei gegen das Dekret von 1616 verstößen, und brachte ihn vor das Inquisitionsgericht, das ihn zu lebenslangem Hausarrest verurteilte und von ihm verlangte, sich öffentlich vom Kopernikanismus loszusagen. Galilei fügte sich auch diesmal.

Galilei blieb ein gläubiger Katholik, doch er hat sich nie in seiner Überzeugung beirren lassen, dass die Wissenschaft unabhängig sein müsse. Vier Jahre vor seinem Tod im Jahre 1642 – er stand noch immer unter Hausarrest – wurde das Manuskript seines zweiten wichtigen Buches zu einem Verleger in Holland geschmuggelt. Mehr noch als seine Verteidigung des Kopernikus ist dieses Buch, das den Titel »Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige« trägt, als die Geburtsstunde der modernen Physik anzusehen.

Isaac NEWTON war kein angenehmer Mensch. Berüchtigt wegen seiner gestörten Beziehungen zu anderen Wissenschaftlern, brachte er den größten Teil seines späteren Lebens in erbittertem Streit zu. Nach der Veröffentlichung der »Principia mathematica« – sicherlich das einflussreichste Buch in der Geschichte der Physik – gelangte Newton rasch zu öffentlichem Ansehen. Er wurde zum Präsidenten der Royal Society ernannt und als erster Wissenschaftler geadelt.

Schon bald geriet er in Konflikt mit John Flamsteed, dem Direktor der Königlichen Sternwarte, der Newton zuvor sehr wichtige Unterlagen für die »Principia« zur Verfügung gestellt hatte, nun aber Informationen zurückhielt, die Newton von ihm forderte. Newton war nicht der Mann, sich mit einer solchen Weigerung abzufinden. Er ernannte sich selbst zum Vorstand der Königlichen Sternwarte und versuchte nun, die sofortige Veröffentlichung der Daten gewaltsam durchzusetzen. Schließlich gelangte er in den Besitz der Flamsteedschen Arbeiten und übergab sie Edmond Halley, Flamssteeds Todfeind, der sie zur Veröffentlichung vorbereiten sollte. Doch Flamsteed brachte den Fall vor Gericht und konnte gerade noch rechtzeitig ein Urteil erwirken, das die Verbreitung der gestohlenen Arbeiten untersagte. Newton war außer sich vor Zorn und rächte sich, indem er in allen späteren Ausgaben der »Principia« systematisch jeden Verweis auf Flamsteed strich.

Eine noch heftigere Fehde trug er mit Gottfried Wilhelm Leibniz aus. Newton und Leibniz hatten unabhängig voneinander die mathematische Methode

der Infinitesimalrechnung entwickelt, die den meisten Bereichen der modernen Physik zugrunde liegt. Heute wissen wir, dass Newton dieses Verfahren Jahre vor Leibniz entdeckt hat, doch er veröffentlichte seine Arbeit viel später. Es kam zu einem erbitterten Streit über die Frage, wer der Erste gewesen sei. Viele Wissenschaftler beteiligten sich an dieser Auseinandersetzung. Interessant ist, dass die meisten der Artikel, die zur Verteidigung Newtons erschienen, von ihm selbst stammten – und nur unter dem Namen von Freunden veröffentlicht wurden. Als der Streit immer heftiger wurde, machte Leibniz den Fehler, die Royal Society als Schlichtungsstelle anzurufen. Newton als ihr Präsident berief einen »unparteiischen« Ausschuss zur Klärung der Frage, der sich zufälligerweise nur aus seinen Freunden zusammensetzte. Doch das reichte ihm noch nicht aus: Er verfasste höchstpersönlich den Bericht des Ausschusses und bewog die Royal Society zu seiner Veröffentlichung. Nun wurde Leibniz offiziell als Plagiator gebrandmarkt. Noch immer nicht zufrieden, schrieb Newton noch eine anonyme Zusammenfassung des Berichts für die Annalen der Royal Society. Es heißt, nach Leibniz' Tod habe Newton erklärt, es sei für ihn eine große Befriedigung gewesen, »Leibniz das Herz gebrochen« zu haben.

Schon zurzeit dieser beiden Auseinandersetzungen hatte Newton Cambridge und der akademischen Welt den Rücken gekehrt. Er hatte sich in Cambridge und später im Parlament als Gegner des Katholizismus hervorgetan und wurde schließlich mit dem einträglichen

Posten eines Direktors des Königlichen Münzamtes belohnt. Dort konnte er seine Neigung zu Heimtücke und Bösartigkeit in den Dienst der Gesellschaft stellen, indem er einen erbarmungslosen Feldzug gegen die Falschmünzerei führte, der für einige Männer am Galgen endete.

AUSBLICK (2016)

Fragen zu unseren Ursprüngen galten einst als Domäne von Philosophen und Theologen. Doch zunehmend wurden die Antworten von den Naturwissenschaften geliefert. An die Stelle von Spekulationen traten belegbare Fakten. Besonders in den letzten beiden Jahrzehnten seit der Neuauflage der *Kurzen Geschichte der Zeit* im Jahr 1996 haben wir bemerkenswerte Fortschritte im Verständnis von Entstehung und Entwicklung des Universums erzielt. Viele der Ideen, die ich als Hypothesen vorbrachte, sind inzwischen bestätigt worden, während andere Entwicklungen vollkommen überraschend hinzukamen.

Dunkle Energie und die sich beschleunigende Expansion des Universums

Beispielsweise hat sich 1998 unser Bild von der Zukunft des Universums vollkommen verändert. Zwei konkurrierende Forschungsteams, die beide das Hubble-Weltraumteleskop benutzten, gelangten unabhängig voneinander zu dem Schluss, dass sich die Expansion

des Universums beschleunigt. Die Bedeutung für das Schicksal des Raums liegt auf der Hand: Das Ende des Universums in einem großen Kollaps (Friedmanns *Big Crunch*, siehe Kapitel 3) scheint keine Option mehr zu sein. Offenbar wird sich der Raum bis in alle Ewigkeit weiter ausdehnen.

Warum beschleunigt sich die Ausdehnung des Raums? Für die Ursache hat sich die Bezeichnung »Dunkle Energie« eingebürgert. Doch das ist nur ein Name, es sagt uns nichts über die Sache selbst. Tatsächlich erschien Friedmanns ursprüngliches Bild schlüssig: Entweder ist die Gravitation stark genug, um alles wieder zusammenzuziehen, und die Expansion verlangsamt sich mit der Zeit; oder sie ist nicht stark genug, und die Expansion setzt sich ungehindert fort. Keines dieser Szenarien ging von einer Expansion aus, deren Geschwindigkeit mit der Zeit immer weiter zunahm.

Einen Teil der Antwort hat eine Arbeit von Einstein geliefert. Nachträglich versuchte er, seine Theorie so zu modifizieren, dass sie ein ewiges und zeitlich unveränderliches Universum beschrieb – Einstein war überzeugt davon, das entspräche den Verhältnissen in unserem eigenen Universum. Dazu fügte er eine sogenannte kosmologische Konstante (Kap. 3) in seine Gleichungen ein. Diese Konstante spielt die Rolle einer »Antigravitationskraft«, die sozusagen direkt in die Raumzeit selbst eingewoben ist. Das war 1917, einige Jahre bevor sich 1927 die Expansion des Universums anhand von Beobachtungen nachweisen ließ. Später nahm Einstein diese Idee zurück, nachdem er erkannt hatte, dass Fried-

manns Modelle exakt erklärten, was Edwin Hubble beobachtet hatte (Kap. I).

Dieser Rückzieher war vielleicht voreilig. Gegenwärtig sieht es so aus, als ließe sich die 1998 erstmals entdeckte Beschleunigung tatsächlich durch Einsteins Antigravitation erklären. Aber das ist noch nicht das Ende der Geschichte, weil man der zugrundliegenden kosmologischen Konstanten jeden beliebigen Wert geben kann, sodass sie den Raum mit beliebiger Rate auseinandertreiben kann. Einfache Abschätzungen legen nahe, dass die Beschleunigung das Universum auseinanderreißen sollte, lange bevor sich Galaxien bilden können. Warum also hat die Antigravitation in Wirklichkeit einen so viel kleineren Wert?

Wenn die Keine-Grenzen-Bedingung zutrifft (Kap. 8), gibt es unendlich viele Paralleluniversen. Jedes dieser Universen könnte eine Antigravitation anderer Stärke besitzen, vor allem wenn die Stringtheorie auf dem richtigen Weg ist, um unser physikalisches Verständnis zu vervollständigen. Dann wäre es ganz natürlich, dass wir in einem der Universen mit einer angenehm geringen dunklen Energie leben; das anthropische Prinzip (Kap. 8) erinnert uns daran, dass wir, wenn sich keine Galaxien gebildet hätten, nicht hier wären, um diese Frage zu erörtern.

Kosmische Hintergrundstrahlung und Keine-Grenzen-Bedingung

Wenn die Keine-Grenzen-Bedingung wirklich entscheidend für das Verständnis dieser Entwicklungen sein sollte, dann ist es sinnvoll zu überprüfen, wie sie sich angesichts unserer rasch wachsenden Möglichkeiten zur Beobachtung des frühen Kosmos bewährt. Insbesondere können wir jetzt anhand der Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung die Ursprünge der Struktur in unserem Universum verstehen (Kap. 8).

Die kosmische Hintergrundstrahlung besteht aus Mikrowellen, wie wir sie in unserem Mikrowellenherd benutzen, nur dass sie nicht ganz so stark sind. Sie würden unsere Pizza lediglich auf -270°C erwärmen, was zum Auftauen nicht ganz reicht, vom Backen ganz zu schweigen. Doch diese extrem schwachen Mikrowellen sind ungeheuer wertvoll, weil es nur eine vernünftige Erklärung für ihr Existenz gibt: Sie sind eine Strahlung, die aus der Frühzeit des Universums stammt, als es sehr heiß und dicht war. Mit der Expansion des Universums kühlte die Strahlung zu jenem schwachen Nachglühen ab, das wir heute entdecken können.

Nachgewiesen wurde die Hintergrundstrahlung im Jahr 1965. Seit ihrer Entdeckung galt sie als direkte Bestätigung von Vorhersagen, die sich aus Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie ergeben. Teil eins meiner damals erst wenige Monate zuvor beendeten Dissertation lieferte den Nachweis, dass die frühe heiße und dichte Phase in Einsteins Theorie unvermeidbar war.

Doch die Strahlungsmessung erwies sich als noch wertvoller. Zuerst schienen die Mikrowellen in alle Richtungen gleich intensiv zu sein. Das führte zu Theorien wie der Inflation (Kap. 8), die in ihrer ursprünglichen Formulierung erklären sollte, wie das frühe Universum so gleichförmig wurde. Bei genauerem Hinsehen sagte die Theorie jedoch vorher, dass es dort von Ort zu Ort kleine Unregelmäßigkeiten geben sollte. Die Abweichungen von der perfekten Gleichförmigkeit entstehen durch quantenmechanische Unschärfe, die eine bestimmte Mindestgröße der frühen Fluktuationen erzwingt.

Als aufeinander folgende Generationen von Weltraumteleskopen die Hintergrundstrahlung immer genauer vermaßen – zuerst COBE 1992 (Kap. 3), dann WMAP 2001 und jüngst Planck 2013 –, erwies sich diese Vorhersage als richtig. Es gibt tatsächlich Veränderungen der Strahlungsintensität um einige Hunderttausendstel. Noch wichtiger: Wir haben nachgewiesen, dass das genaue Variationsmuster mit den spezifischen Vorhersagen übereinstimmt, zu denen andere Forscher und ich gelangt sind, indem wir die Inflationstheorie mit der Keine-Grenzen-Bedingung kombiniert haben.

Um die physikalischen Bedingungen beim Urknall zu beschreiben, verbindet die Keine-Grenzen-Bedingung Einsteins Relativitätstheorie mit der Quantentheorie. Wenn wir zum Anfang unseres Universums zurückgehen, dann, so folgt daraus, werden Raum und Zeit unscharf und »runden den Beginn ab«, etwa so wie der Nordpol auf der Erdoberfläche. Zu fragen, was vor

dem Urknall war, ist nach der Keine-Grenzen-Bedingung sinnlos, weil es keinen Zeitbegriff gibt, auf den wir uns beziehen könnten. Es ist so, als fragten wir, was nördlich des Nordpols liegt.

Mit meinen Kollegen James Hartle (mit dem ich in den 1980er Jahren die Keine-Grenzen-Bedingung aufgestellt habe) und Thomas Hertog habe ich diese Überlegungen überprüft. Wir berechneten, welcher Art das Universum sein müsse, das gemäß der Keine-Grenzen-Bedingung aus dem Urknall hervorgeing, und verglichen diese Vorhersage mit unseren Beobachtungen. Dabei bestätigte sich, dass unser Universum mit einem starken Inflationsschub entstanden sein muss.

Die Detaileigenschaften der kosmischen Hintergrundstrahlung, die jetzt gemessen wurden, scheinen also die Inflationstheorie und die Keine-Grenzen-Bedingung zu bestätigen. Es gibt aber eine entscheidende Vorhersage der Theorie, die es noch zu verifizieren gilt. Nach der Inflationstheorie kann ein kleiner Anteil der Fluktuationen in der Hintergrundstrahlung auf Gravitationswellen zurückgeführt werden, die während der Phase der schnellen Expansion erzeugt wurden. Diese urtümlichen Gravitationswellen sind analog zur Quantenstrahlung Schwarzer Löchern, und man kann sie als die Quantenstrahlung vom Ereignishorizont der frühen Inflationsphasen des Universums auffassen. Ihre Entdeckung würde bestätigen, dass Schwarze Löcher Quantenstrahlung emittieren, etwas, was sich so gut wie unmöglich direkt überprüfen lässt. Unten werde ich noch einmal auf die Entdeckung von Gravita-

wellen zu sprechen kommen, aber diejenigen, die im frühen Universum erzeugt wurden, zeigen sich am deutlichsten in der Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung. Wir haben gerade erst begonnen, diese Polarisation zu messen, und es besteht guter Grund zu der Hoffnung, dass solche Messungen verlässliche und überzeugende Belege für unsere Urknalltheorie liefern werden.

Auch ohne klare Sicht auf die Polarisation sind die Daten der Hintergrundstrahlung so gut, dass wir jetzt einige der Leerstellen ausfüllen können. Inflation und Keine-Grenzen-Bedingungen lassen einige Einzelheiten offen: wieviel Energie genau beteiligt ist beispielsweise, und welche Verbindung zu der zugrundeliegenden Teilchenphysik besteht. Je nachdem, wie diese Einzelheiten ausfallen, sind die zu erwartenden Muster etwas anders. Indem wir sorgfältig untersuchen, was wir sehen, beginnen wir jetzt die Physik nahe den für die Große Vereinheitlichung typischen Energien zu verstehen. Zum Vergleich: Das sind rund eine Million Millionen Mal größere Energien, als sie der weltgrößte Teilchenbeschleuniger untersuchen kann, der Large Hadron Collider (LHC).

Ewige Inflation und Multiversum

Die oben beschriebenen Entwicklungen bedeuten, dass sich die Inflation in den letzten beiden Jahrzehnten von einer Spekulation zu einem Grundpfiler der modernen Kosmologie gewandelt hat. Doch nicht jedem gefallen

ihre Schlussfolgerungen, zumal wir heute die Ansicht vertreten, die Inflation führe wahrscheinlich zu einer riesigen Zahl von Universen, die kollektiv als Multiversum bezeichnet werden.

Wie oben erwähnt, sagt die Inflation ein beinahe, aber nicht vollkommen gleichförmiges Universum voraus. Die Abweichungen von der perfekten Gleichförmigkeit ergeben sich aus der Quantenmechanik und können anhand der Beobachtungen der Hintergrundstrahlung genau dokumentiert werden.

Derselbe quantenmechanische Effekt kann zur Entstehung des Multiversums führen. Die Inflation wird durch eine seltsame Energieart mit antigravitativen Eigenschaften angetrieben. Im Großen und Ganzen nimmt die Menge an solcher Energie mit dem Fortschreiten der Inflation ab, bis es nicht mehr genug davon gibt und die beschleunigte Expansion endet. Doch in einigen Regionen der Raumzeit kehren Quantenfluktuationen den Trend vorübergehend um. In solchen Regionen ist die Energiemenge größer, und entsprechend länger dauert die Inflationsphase.

1986 errechnete der russisch-amerikanische Physiker Andrej Linde, dass es immer irgendeinen Ort geben wird, an dem die Fluktuationen gewinnen, solange die Energie der Inflation am Anfang hoch genug ist: Die Energie bleibt an jenem Ort hoch, und entsprechend setzt sich die Inflation in der betreffenden Region ewig fort. Aber es wird auch stets andere Orte geben, an denen die Fluktuationen verlieren und sich der erwartete Trend der abnehmenden Energie durchsetzt. Jede

dieser Regionen wird ein Universum wie das unsere. Wenn wir eine geeignete Vogelperspektive einnehmen könnten, würden wir unzählige solcher Universen sehen, voneinander getrennt durch die von Linde beschriebenen Regionen des Multiversums, in denen sich die Inflation auf ewig fortsetzt.

Gemeinsam sagten Inflation und die Keine-Grenzen-Bedingung vorher, dass unser Universum nicht einzigartig ist. Vielmehr entstehen aus der Quantenunschärfe viele verschiedene Universen, möglicherweise mit verschiedenen lokalen Gesetzen der Physik und Chemie. Vielleicht leben wir dabei nicht im wahrscheinlichsten aller Universen, sondern in einem, in dem die Bedingungen günstig für Komplexität und die Entwicklung von Leben sind. Zwar können wir uns nicht von einem Universum in ein anderes begeben, aber die erfolgreichen Vorhersagen der Theorie für Beobachtungen in unserem eigenen Universum sprechen für das Weltbild, das von der Keine-Grenzen-Bedingung vorhergesagt wird.

Lange Zeit erkannten viele Physiker diese Argumente nicht an. Die Vorstellung eines Multiversums flößt manchen Menschen Unbehagen ein, und sie befreunden sich lieber mit dem Gedanken, dass die Inflation von vornherein bei geringeren Energien verläuft, weil sie dann Lindes Argument ausweichen können. Doch die jüngsten Beobachtungen des Planck-Satelliten lassen diesen eskapistischen Trick zunehmend zweifelhaft erscheinen.

Gravitationswellen

Eine sehr direkte Methode zur Bestätigung hoher Energiewerte für die Inflationsphase wäre, wie erwähnt, der Nachweis von Gravitationswellen aus dem frühen Universum auf dem Umweg über die Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung. Ich hoffe, dass wir nicht zu lange auf diese Entwicklung warten müssen; in der Zwischenzeit ist aber immerhin der Nachweis gelungen, dass Gravitationswellen (Kap. 6) im heutigen Universum erzeugt werden können. 2016, genau ein Jahrhundert, nachdem Einstein Gravitationswellen vorhergesagt hatte, gab die LIGO-Forschungsgruppe, an der Wissenschaftler aus der ganzen Welt beteiligt sind, bekannt, dass solche Wellen zum ersten Mal entdeckt worden seien.

Die ersten sechzig Jahre waren die schwersten. Während dieser Zeit herrschte Unklarheit in Bezug auf den Status der Wellen: Gab es sie wirklich, oder waren sie einfach ein mathematisches Artefakt, das nichts mit der Realität zu tun hatte? Sogar Einstein schien sich nicht sicher zu sein und hätte in den 1930er Jahren beinahe eine falsche Widerlegung ihrer physikalischen Realität veröffentlicht. Doch im Laufe der Zeit bildete sich innerhalb der physikalischen Gemeinschaft der Konsens heraus, dass diese Wellen sehr wohl real seien. Eine Konsequenz war, dass sich wechselseitig umkreisende Körper allmählich Energie verlieren müssten. Bis vor Kurzem war dieser Energieverlust der einzige Beleg für die Existenz von Gravitationswellen (Kap. 6). Das war zwar sehr überzeugend, aber immer noch indirekt.

Gravitationswellen direkt nachzuweisen, wenn sie die Erde durchqueren, ist technisch weit anspruchsvoller, weshalb dieser Nachweis bis 2016 auf sich warten ließ. Aber die Jahrzehnte technologischer Entwicklung haben Früchte getragen, denn jetzt steht uns eine vollkommen neue Methode zur Untersuchung des Universums zur Verfügung. Schon die ersten Ereignisse, die LIGO entdeckte – Wellen, die aus dem Zusammenstoß und der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher resultierten –, bestätigte unser Verständnis eines Prozesses, der weder in der Vergangenheit noch in der Zukunft von einem traditionellen Teleskop erfasst werden kann.

Für mich war es mehr als aufregend, Schwarze Löcher bei ihrem Zusammenstoß beobachten zu können. In naher Zukunft wird LIGO noch mehr solche Ereignisse erfassen. Ich denke, diese Beobachtungen werden eine Vorhersage bestätigen, die ich 1970 gemacht habe – dass die Oberfläche des resultierenden Schwarzen Lochs größer ist als die Summe der beiden ursprünglichen Oberflächen. Dieser »Flächensatz«, der mich später zu der Einsicht brachte, dass Schwarze Löcher mit der Zeit ihre Masse verlieren werden, hatte zwar ein verlässliches mathematisches Fundament, aber man kann sich einer Idee nie wirklich sicher sein, bevor man sie nicht anhand von Beobachtungen oder Experimenten überprüft hat.

LIGO und andere Observatorien für Gravitationswellen werden in Zukunft noch eine wichtige Rolle spielen. Wir können davon ausgehen, dass mit ihnen eine Vielzahl solcher Nachweise gelingen wird, so dass

wir immer bessere Daten zu der Population Schwarzer Löcher in unserem Universum gewinnen. Das wird uns ermöglichen, auch winzige Abweichungen von den Vorphersagen zu entdecken, die auf Einsteins Theorie fußen. Auf unserer weiteren Suche nach einer vollständigen Quantentheorie der Gravitation wird diese Fundgrube an Informationen über extreme Regionen der Raumzeit von unschätzbarem Wert sein.

Das Informationsparadoxon

Ein Grund für meine Begeisterung über die Entdeckung von Gravitationswellen durch LIGO ist der Umstand, dass der Flächensatz unmittelbar mit einem sehr kontroversen Thema verknüpft ist, das als Informationsparadoxon bezeichnet wird. Information ist von extremer Bedeutung in der Physik; wenn wir in der Lage sind, heute den Gesamtzustand des Universums mit einer bestimmten Informationsmenge (etwa den Angaben zu Positionen und Geschwindigkeiten aller Teilchen) zu beschreiben, erwarten wir, dass wir auch morgen die gleiche Informationsmenge brauchen, um den Gesamtzustand des Universums zu beschreiben. Auf dieser Annahme beruht unsere Fähigkeit, wissenschaftliche Vorphersagen zu treffen, und sie liegt stillschweigend den Werken von Newton und Einstein zugrunde. Auch für die Quantenmechanik gilt sie. Daher können wir hoffen, dass sie ebenfalls zutrifft, wenn wir eine vollständige Theorie der Quantengravitation formulieren.

Wenn sich ein Schwarzes Loch gebildet hat, ist die Information über diejenigen Objekte, die hereingefallen sind (beispielsweise ihre Form, Größe und chemische Zusammensetzung), vor uns verborgen. Die einzigen Informationen, die uns noch über die Objekte zur Verfügung stehen, aus denen das Schwarze Loch entstanden ist, sind ihre Gesamtmasse, ihr Drehimpuls und möglicherweise noch ihre elektrische Ladung. Das ist das sogenannte Keine-Haare-Theorem. Eigentlich ist das Problem nicht allzu groß, da wir diese Objekte einfach als versteckt anstatt als vollkommen verloren betrachten könnten. Aber wie ich in einem 1974 in *Nature* veröffentlichten kurzen Artikel dargelegt habe, ist es Schwarzen Löchern dank der Quantenmechanik möglich, ihre Masse zu verlieren und zu verschwinden (Kap. 7), und das ist eine Schwierigkeit. Wenn ein Schwarzes Loch verschwunden ist, was ist dann mit der darin enthaltenen Information passiert?

Als ich in den 1980er Jahren an *Eine kurze Geschichte der Zeit* schrieb, glaubte ich, die Information über die Objekte, die in das Schwarze Loch fielen, sei wirklich verloren, vielleicht in einem von dem unseren abgespaltenen separaten Universum untergebracht. 1997 wettete ich sogar mit dem Physiker John Preskill vom California Institute of Technology (Caltech) um eine Enzyklopädie seiner Wahl, dass ich recht hatte.

Erst 2004, nachdem ich überlegt hatte, was mit Schwarzen Löchern nach unendlich langen Zeiträumen geschieht, wurde mit klar, dass ich falsch lag. Die Informationsmenge zu Beginn und am Ende war gleich!

Als ich meine Niederlage eingestand, bat John mich um eine Baseball-Enzyklopädie, die ich ihm pflichtgemäß gab (nachdem meine Versuche, ihn davon zu überzeugen, dass Cricket das interessantere Spiel sei, erfolglos geblieben waren).

Mein Sinneswandel begann mit der Berücksichtigung einer der bemerkenswertesten Entdeckungen, die wir der Stringtheorie verdanken: Es scheint eine exakte Entsprechung zwischen dem Verhalten der Gravitation und einem obskuren Zweig der Physik, der sogenannten konformen Feldtheorie, zu geben. Die Einzelheiten dieser Entsprechung sind für unsere Zwecke nicht von Bedeutung. Das Einzige, was man wissen muss, ist, dass die Information bei allem, was von der konformen Feldtheorie beschrieben wird – also auch bei Schwarzen Löchern – nachweislich erhalten bleibt. Unlängst wurde erkannt, dass das Keine-Haare-Theorem zu restriktiv formuliert wurde. Es gibt nämlich Supertranslations- und Superrotations-Haar. Anscheinend bleibt die Information über das Material, aus dem das Schwarze Loch entstanden ist, auf dem Horizont als Supertranslations- und Superrotations-Haar erhalten. Wir wissen nicht, ob das genügend Information ist, um den Prinzipien der Quantenmechanik gerecht zu werden. Wir wissen auch noch nicht, wie die Information aus dem Schwarzen Loch hinausgelangen könnte. Noch schwieriger sind die Fragen nach den grundlegenden Eigenschaften der Raumzeit-Singularitäten, die nach der Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie im Inneren Schwarzer Löcher existieren sollten.

Natürlich sagt uns dieses abstrakte Argument nicht im Einzelnen, wie es der verlorenen Information praktisch gelingt, wieder aus einem Schwarzen Loch zu entweichen.

Wir müssen uns dabei im Klaren sein, dass die Information, wenn sie schließlich aus der Region des Schwarzen Lochs hinausfindet, in einem für uns kaum noch erkennbaren Zustand ist. Es ist, als ob man ein Buch verbrennt. Theoretisch ist die Information nicht verloren, solange man die Asche und den Rauch aufbewahrt – was mich wieder an die Baseball-Enzyklopädie erinnert, die John Preskill von mir bekommen hat.

Ich hätte sie ihm vielleicht lieber in verbranntem Zustand übergeben sollen.

Ausblick

In den zwanzig Jahren, die seit der letzten Überarbeitung dieses Buchs vergangen sind, hat die Kosmologie rasche Fortschritte gemacht. Einige Entwicklungen, wie etwa der Nachweis von Gravitationswellen und unsere stetig wachsenden Einblicke in die Geschehnisse im frühen Universum, haben wir erwartet; andere, wie die dunkle Energie und das beschleunigende Universum, weniger.

Der wohl auffälligste Trend dürfte vielen unbehaglich sein: Die Keine-Grenzen-Bedingung und die ewige Inflation lassen immer deutlicher darauf schließen, dass unser Universum nur eines von vielen ist. Im 16. Jahrhundert hat Kopernikus als Erster behauptet, dass wir

uns noch nicht einmal im Mittelpunkt unseres eigenen Universums befinden (Kap. 1). Aber wir haben immer noch Mühe, uns einzugestehen, welch winzigen Bruchteil der Wirklichkeit die uns vertraute Welt tatsächlich darstellt. Vielleicht müssen wir nicht mehr lange warten, bis die Beweise für ein Multiversum erdrückend sind.

Trotz der ungeheuren Weite des Multiversums können wir uns in einer Hinsicht unsere Bedeutung bewahren: Wir dürfen weiterhin darauf stolz sein, zu jener Spezies zu gehören, die all diese Dinge herausfindet. Wenn wir das nicht vergessen, sollten die kommenden Jahre genauso aufregend werden wie die letzten zwanzig.

ANMERKUNGEN

- 1 Sein Hauptwerk »De revolutionibus orbium coelestium, Libri VI«, das erst 1543, kurz vor seinem Tod, erschien, kam tatsächlich 1616 auf den Index librorum prohibitorum.
- 2 Beim Nachweis extrem weit entfernter Objekte hat die Astronomie seit der Erstveröffentlichung des Buches wesentliche Fortschritte gemacht. Die entferntesten derzeit bekannten Objekte sind so weit entfernt, dass ihr Licht mehr als 13 Milliarden Jahre zu uns unterwegs war.
- 3 Inzwischen ist das Maß für die Expansionsgeschwindigkeit, die sogenannte Hubblekonstante, deutlich genauer bekannt – mit einer Genauigkeit von besser als 2 %. Allerdings hat sich dabei ein neues kosmologisches Rätsel aufgetan, das Hawking sicher fasziniert hätte: eine bislang unerklärte Abweichung zwischen Messungen wie Hawking sie hier beschreibt und Messungen, die auf Eigenschaften des frühen Universums beruhen. Auf eine weitere neue Entwicklung, die Entdeckung der beschleunigten Expansion, geht Hawking selbst in seinem Ausblick aus dem Jahr 2016 am Ende dieses Buches ein.
- 4 Im Englischen »sum over histories«; auch »Aufsummierung von Möglichkeiten« genannt.
- 5 Hier gibt es inzwischen neue Erkenntnisse, auf die Stephen Hawking im Kapitel »Ausblick (2016)« eingeht.
- 6 Jene Anlage, der LHC am europäischen Forschungszentrum CERN, ist inzwischen längst gebaut und hat im Sommer 2022 13 600 GeV erreicht. Von sonnensystemgroßen Beschleunigern

sind wir allerdings technisch in etwa ebenso weit entfernt wie bei der Erstveröffentlichung des Buches.

- 7 Mit den beiden in den USA konstruierten Detektoren gelang tatsächlich bei einer Messung vom 14. September 2015 der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen. Die nachgewiesenen Gravitationswellen waren bei der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher entstanden.
- 8 Auch der direkte Nachweis einer solchen Verschmelzung zweier Neutronensterne ist mittlerweile gelungen – anhand eines Gravitationswellensignals, das die LIGO-Detektoren am 17. August 2017 erreichte.
- 9 Einige Jahre nach der Erstausgabe dieses Buches begannen unabhängig voneinander Andrea Ghez von der University of California Los Angeles und Reinhard Genzel vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik mit systematischen Beobachtungen der Sternbewegungen rund um das zentrale Schwarze Loch der Milchstraße. Dieses besitzt eine Masse von etwas mehr als 4 Millionen Sonnenmassen. Ihre Untersuchungen über Jahrzehnte hinweg trugen Ghez und Genzel den Physik-Nobelpreis 2020 ein – zusammen mit Roger Penrose, der für seine theoretischen Arbeiten zu Schwarzen Löchern ausgezeichnet wurde.
- 10 Für die sogenannten kurzen Gammastrahlen-Ausbrüche hat der oben erwähnte direkte Nachweis der Gravitationswellen von verschmelzenden Neutronensternen zusammen mit zeitgleichen Beobachtungen mit diversen astronomischen Teleskopen in der Tat den Nachweis erbracht, dass diese auf kollidierende Neutronensterne zurückgehen. Für eine Reihe der länger andauernden langen Gammastrahlen-Ausbrüche haben herkömmliche elektromagnetische astronomische Beobachtungen gezeigt, dass es sich um Explosionen und Kollaps der Zentralregionen massereicher Sterne handeln dürfte.
- 11 Seit 2001 gibt es tatsächlich klare Hinweise darauf, dass Neutrinos eine von Null verschiedene Masse besitzen. 2015

erhielten Takaaki Kajita und Arthur McDonald für die entsprechenden Experimente den Physik-Nobelpreis. Realistische Kandidaten für die dunkle Materie sind die Neutrinos des Standardmodells unserem heutigen Wissen nach allerdings trotzdem nicht.

- 12 Dass die beschleunigte Expansion im Gegensatz zu den heutigen Verhältnissen steht, war Wissensstand zum Zeitpunkt der Erstveröffentlichung dieses Buches. Ende der 1990er Jahre stellte sich heraus, dass sich auch das heutige Universum aufgrund der darin enthaltenen sogenannten dunklen Energie beschleunigt ausdehnt, allerdings sehr viel langsamer als während der Inflationsphase.
- 13 Im Englischen sind reell (im mathematischen Sinne) und real (im Sinne von wirklich) dasselbe Wort. *Anm. d. Übers.*
- 14 In den letzten Jahrzehnten sind an Teilchenbeschleunigern immer aussagekräftigere Daten dazu gefunden worden, die zeigen, dass die CP-Symmetrie und auch für sich genommen die T-Symmetrie in bestimmten Teilchenreaktionen, vermittelt von der schwachen Wechselwirkungen, verletzt werden. Für Hawkings Alltagsbeispiele, in denen radioaktiver Zerfall ja keine Rolle spielt, macht das freilich keinen Unterschied.
- 15 Diese Aussage ist inzwischen überholt. Die aktuellen kosmologischen Modelle enthalten eine kosmologische Konstante, deren Energiedichte sogar größer ist als die der Materie. In einem rotierenden Universum leben wir allerdings auch den aktuellen Daten nach trotzdem nicht. *Anm. d. Red.*
- 16 Tatsächlich hat sowohl der Einsatz von Computern als auch die Entwicklung innovativer neuer Rechenmethoden – eine davon erlaubt es, zehn Millionen Millionen Millionen Terme einer Teilchenreaktion in nur einem guten Dutzend Rechenschritte zusammenzufassen – in den letzten Jahrzehnten immer neue Resultate hervorgebracht, denen zufolge Supergravitations-Theorien was die Unendlichkeiten angeht doch deutlich harmloser sind als zwischenzeitlich gedacht.

Der vollständige Nachweis, dass Unendlichkeiten für die Supergravitation (oder wenigstens für eine Variante dieser Theorien) kein Problem darstellt, steht allerdings nach wie vor aus.

DANK

1982, nach den Loeb-Vorlesungen an der Harvard University, entschloss ich mich zu dem Versuch, ein allgemeinverständliches Buch über Raum und Zeit zu schreiben. Es gab bereits Bücher über das frühe Universum und Schwarze Löcher, darunter sehr gute wie »Die ersten drei Minuten« von Steven Weinberg, aber auch sehr schlechte, die ich hier lieber nicht nenne. Doch stellte ich fest, dass keines sich wirklich mit den Fragen auseinandersetzt, die mich zu meinen Forschungsarbeiten in der Kosmologie und Quantentheorie veranlasst haben: Woher kommt das Universum? Wie und warum hat es begonnen? Wird es enden? Und wenn, wie wird dies Ende aussehen? Das sind Fragen, die uns alle angehen. Doch die moderne Naturwissenschaft ist so komplex geworden, dass nur noch wenige Spezialisten über die mathematischen Voraussetzungen verfügen, um nach den Antworten auf diese Fragen zu suchen. Dennoch lassen sich die Grundgedanken über den Ursprung und das Schicksal des Universums ohne Mathematik in einer Form schildern, die auch ein Leser ohne naturwissenschaftliche Vorbildung verstehen kann. Dies versuche ich in meinem Buch. Der Leser mag beurteilen, ob es mir gelungen ist.

Man hat mir gesagt, dass jede Gleichung im Buch die Verkaufszahlen halbiert. Ich beschloss also, auf mathematische Formeln ganz zu verzichten. Schließlich habe ich doch eine Ausnahme gemacht: Es handelt sich um die berühmte Einsteinsche Formel $E = mc^2$. Ich hoffe, dies wird nicht die Hälfte meiner potentiellen Leser verschrecken.

Von dem Pech abgesehen, dass ich an ALS leide, einer unheilbaren Erkrankung des motorischen Systems, habe ich in fast jeder anderen Hinsicht Glück gehabt. Die Unterstützung, die ich von meiner Frau Jane und meinen Kindern Robert, Lucy und Timmy erhalten habe, ermöglicht es mir, ein nahezu normales Leben zu führen und mich meinen beruflichen Aufgaben mit Erfolg zu widmen. Glück hatte ich auch mit meiner Entscheidung für die theoretische Physik. Auf diesem Gebiet spielt sich alles im Kopf ab. Deshalb hat mich meine Behinderung nicht allzusehr beeinträchtigt. Meine Kollegen waren ohne Ausnahme äußerst hilfsbereit.

In der ersten, »klassischen« Phase meiner beruflichen Laufbahn habe ich vor allem mit Roger Penrose, Robert Geroch, Brandon Carter und George Ellis zusammen-gearbeitet. Ich bin ihnen dankbar für ihre Hilfe und die Zusammenarbeit. Die Ergebnisse aus dieser Phase sind in dem Buch »The Large Scale Structure of Spacetime« zusammengefasst, das ich 1973 zusammen mit Ellis schrieb. Ich kann es Ihnen allerdings nicht empfehlen. Es ist sehr wissenschaftlich und kaum lesbar. Ich hoffe, dass ich inzwischen gelernt habe, mich verständlicher auszudrücken.

In der zweiten, der »Quanten«-Phase meiner Arbeit, die 1974 begann, habe ich in erster Linie mit Gary Gibbons, Don Page und Jim Hartle zusammengearbeitet. Auch sie und meine Doktoranden haben mich bei physischen wie theoretischen Problemen tatkräftig unterstützt. Die Notwendigkeit, mit meinen Studenten Schritt zu halten, war immer eine große Herausforderung und hat mich, wie ich hoffe, davor bewahrt, mich in bloßer Routine festzufahren.

Von besonderer Bedeutung für dieses Buch war die Hilfe Brian Whitts, einer meiner Studenten. 1985, nach Niederschrift der ersten Fassung, bekam ich eine Lungenentzündung und musste mich einer Tracheotomie unterziehen, die mir die Fähigkeit, zu sprechen und mich mitzuteilen, fast völlig nahm. Ich glaubte nicht, das Buch noch beenden zu können. Doch Brian half mir nicht nur bei den Korrekturen, sondern unterwies mich auch in der Verwendung des Kommunikationsprogramms Living Center, das mir Walt Woltosz von der Firma Word Plus in Sunnyvale, Kalifornien, kostenlos zur Verfügung stellte. Damit kann ich Bücher, Aufsätze und Vorträge verfassen. Mit Hilfe eines Sprachsynthesizers, den ich von der ebenfalls in Sunnyvale ansässigen Firma Speech Plus erhielt, bin ich nun auch wieder in der Lage, mich mit anderen Menschen zu unterhalten. David Mason hat den Synthesizer und einen kleinen Personal Computer auf meinem Rollstuhl montiert. Dieses System hat meine Situation grundlegend verändert: Ich kann mich heute besser verständigen als vor dem Verlust meiner Stimme.

Vielen, die die vorläufige Fassung des Manuskripts durchsahen, verdanke ich Verbesserungsvorschläge. Vor allem Peter Guzzardi, mein Lektor bei Bantam Books, hat mir Seiten voller Fragen und Anmerkungen zu Punkten geschickt, von denen er meinte, ich hätte sie nicht hinreichend erklärt. Ich muss gestehen, dass ich ziemlich ungehalten war, als ich seine lange Liste mit Änderungsvorschlägen erhielt, aber er hatte völlig recht. Ich bin sicher, es hat dem Buch gutgetan, dass er mir so zugesetzt hat.

Sehr dankbar bin ich meinen Assistenten Colin Williams, David Thomas und Raymond Laflamme, meinen Sekretärinnen Judy Fella, Ann Ralph, Cheryl Billington und Sue Masey sowie meinen Krankenschwestern. All dies wäre nicht möglich gewesen ohne die finanzielle Unterstützung für wissenschaftliche und medizinische Ausgaben, die ich vom Gonville and Caius College, vom Science and Engineering Research Council und von den Stiftungen Leverhulme, McArthur, Nuffield und Ralph Smith erhielt. Allen diesen Institutionen bin ich zu großem Dank verpflichtet.

(20. Oktober 1987)

Viele Menschen haben mir bei der Abfassung des Buches geholfen. Meinen wissenschaftlichen Kollegen verdanke ich ausnahmslos viele Anregungen. Im Laufe der Jahre waren meine wichtigsten Kollegen und Mitarbei-

ter Roger Penrose, Robert Geroch, Brandon Carter, George Ellis, Gary Gibbons, Don Page und Jim Hartle. Ihnen und meine Forschungsstudenten, die mir immer geholfen haben, wenn es nötig war, schulde ich großen Dank.

Brian Whitt, einer meiner Studenten, war mir bei der ersten Auflage dieses Buchs eine große Hilfe. Peter Guzzardi, meinem Lektor bei Bantam Books, verdanke ich unzählige Anmerkungen, die das Buch erheblich verbessert haben. Für diese Auflage gilt mein Dank Andrew Dunn, der mir half den Text zu überarbeiten, sowie Dr. Andrew Pontzen, Professor Thomas Hertog und Professor Malcolm Perry für die Hilfe beim Anhang.

Ohne mein Kommunikationssystem hätte ich dieses Buch nicht schreiben können. Die Software *Equalizer* stellte mir Walt Waltosz von der Firma Words Plus in Lancaster, Kalifornien, kostenlos zur Verfügung. Mein Sprachsystem ist eine Stiftung der Firma Speech Plus in dem ebenfalls kalifornischen Sunnyvale. Synthesizer and Laptop hat David Mason von der Firma Cambridge Adaptive Communication auf meinen Rollstuhl montiert. Mit diesem System kann ich mich heute besser verständigen als vor dem Verlust meiner Stimme.

Während der Jahre, in denen ich dieses Buch schrieb, hatte ich zahlreiche Sekretärinnen und Assistenten. Beginnen wir mit den Sekretärinnen: Großen Dank schulde ich Judy Fella, Ann Ralph, Laura Gentry, Cheryl Billington and Sue Masey. Meine Assistenten waren Colin Williams, David Thomas, Raymond Laflamme, Nick Phillips, Andrew Dunn, Stuart Jamieson, Jonathan

Brenchley, Tim Hunt, Simon Gill, Jon Rogers und Tom Kendall. Sie, meine Krankenpflegerinnen, Kollegen, Freunde und Angehörigen, haben mir ermöglicht, ein sehr erfülltes Leben zu führen und meinen Forschungsarbeiten trotz meiner Behinderung nachzugehen.

Stephen Hawking

GLOSSAR

ABSOLUTER NULLPUNKT: Die niedrigstmögliche Temperatur. Bei dieser Temperatur besitzt ein Stoff keine Wärmeenergie.

ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE: Einsteins Theorie, in der er von der Überlegung ausging, dass die Naturgesetze für alle Beobachter, unabhängig von ihrer Bewegung, gelten müssten. Die Gravitationskraft wird als Krümmung einer vierdimensionalen Raumzeit erklärt.

ANTHROPISCHES PRINZIP: Wir sehen das Universum so, wie es ist, weil wir nicht da wären, um es zu beobachten, wenn es anders wäre.

ANTITEILCHEN: Jedem Materieteilchen entspricht ein Antiteilchen. Wenn ein Teilchen mit seinem Antiteilchen zusammenstößt, vernichten sie sich gegenseitig und lassen nur Energie zurück.

ATOM: Die Basiseinheit normaler Materie, bestehend aus einem winzigen Kern (seinerseits aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt), der von Elektronen umkreist wird.

AUSSCHLIESUNGSPRINZIP: Zwei identische Teilchen mit dem Spin $\frac{1}{2}$ können (innerhalb der Grenzen der Unschärferelation) nicht zugleich dieselbe Position und dieselbe Geschwindigkeit haben.

BESCHLEUNIGUNG: Das Maß dafür, wie schnell sich die Geschwindigkeit eines Gegenstands mit der Zeit verändert.

CHANDRASEKHAR-GRENZE: Die größte mögliche Masse eines stabilen kalten Sterns. Wird sie überschritten, stürzt der Stern zu einem Schwarzen Loch zusammen.

- ELEKTRISCHE LADUNG:** Die Eigenschaft eines Teilchens, durch die es andere Teilchen abstoßen (oder anziehen) kann, die eine Ladung mit gleichem (oder entgegengesetztem) Vorzeichen haben.
- ELEKTROMAGNETISCHE KRAFT:** Die Kraft, die zwischen Teilchen mit elektrischer Ladung wirksam ist – die zweitstärkste der vier Grundkräfte.
- ELEKTRON:** Ein Teilchen mit negativer elektrischer Ladung, das den Kern eines Atoms umkreist.
- ELEKTROSCHWACHE VEREINHEITLICHUNGSENERGIE:** Die Energie (etwa 100 GeV) ab der der Unterschied zwischen der elektromagnetischen und der schwachen Kraft verschwindet.
- ELEMENTARTEILCHEN:** Ein Teilchen, das sich nach gängiger Auffassung nicht mehr teilen lässt.
- ENERGIEERHALTUNGSSATZ:** Das physikalische Gesetz, nach dem Energie (oder ihr Massenäquivalent) weder aus dem Nichts entstehen noch vernichtet werden kann.
- EREIGNIS:** Ein Punkt in der Raumzeit, der durch Zeit und Ort festgelegt ist.
- EREIGNISHORIZONT:** Die Grenze eines Schwarzen Loches.
- FELD:** Etwas, das sich in Raum und Zeit ausdehnt, im Gegensatz zu einem Teilchen, das zu einem bestimmten Zeitpunkt nur an einem Punkt vorhanden ist.
- FREQUENZ:** Bei einer Welle die Zahl der vollständigen Zyklen pro Sekunde.
- GAMMASTRAHLEN:** Elektromagnetische Wellen von sehr kurzer Wellenlänge, die durch radioaktiven Zerfall oder durch Zusammenstöße von Elementarteilchen entstehen.
- GEODÄTE:** Der kürzeste (oder längste) Weg zwischen zwei Punkten.
- GEWICHT:** Die Kraft, die von einem Gravitationsfeld auf einen Körper ausgeübt wird. Sie ist seiner Masse proportional, aber nicht mit ihr identisch.
- GROSSE VEREINHEITLICHE THEORIE (GUT):** Eine Theorie, welche die elektromagnetische, die starke und die schwache Kraft vereinheitlicht.

GROSSE VEREINHEITLICHUNGSENERGIE: Die Energie, oberhalb derer, wie man meint, die elektromagnetische, die schwache und die starke Kraft nicht mehr voneinander zu unterscheiden sind.

GROSSER ENDKOLLAPS: Die Singularität am Ende des Universums.

IMAGINÄRE ZEIT: Eine Zeit, die mithilfe von imaginären Zahlen gemessen wird.

KEINE-GRENZEN-BEDINGUNG: Die Vorstellung, dass das Universum endlich ist, aber keinen Rand bzw. keine Grenzen (in der imaginären Zeit) besitzt.

KERN: Innerstes Teil eines Atoms, bestehend aus Protonen und Neutronen und zusammengehalten durch die starke Kraft.

KERNFUSION: Der Prozess, bei dem zwei Kerne zusammenstoßen und zu einem einzigen, schwereren Kern verschmelzen.

KOORDINATEN: Zahlen, die die Position eines Punktes in Raum und Zeit angeben.

KOSMOLOGIE: Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Universum als Ganzem.

KOSMOLOGISCHE KONSTANTE: Ein mathematisches Mittel, das Einstein benutzt hat, um die Raumzeit mit einer Expansions-tendenz auszustatten.

LICHTKEGEL: Eine Fläche in der Raumzeit, welche die Gesamtheit aller möglichen Richtungen anzeigt, in die Lichtstrahlen, die bei einem gegebenen Ereignis dabei sind, verlaufen.

LICHTSEKUNDE (LICHTJAHR): Die Entfernung, die vom Licht in einer Sekunde (einem Jahr) zurückgelegt wird.

MAGNETISCHES FELD: Das Feld, das für die magnetischen Kräfte verantwortlich ist und heute zusammen mit dem elektrischen Feld als elektromagnetisches Feld zusammengefasst wird.

MASSE: Die Materiemenge eines Körpers; seine Trägheit also sein Widerstand gegen Beschleunigung.

MIKROWELLEN-HINTERGRUNDSTRÄHLUNG, KOSMISCHE:
Die Strahlung des heißglühenden frühen Universums, jetzt so

stark rotverschoben, dass sie nicht in Form von Licht, sondern als Mikrowellen in Erscheinung tritt (Radiowellen mit einer Wellenlänge von ein paar Zentimetern).

NACKTE SINGULARITÄT: Eine Raumzeit-Singularität, die nicht von einem Schwarzen Loch umgeben ist.

NEUTRINO: Ein extrem leichtes elementares Materieteilchen, das nur der Wirkung der schwachen Kraft und der Gravitation unterliegt.

NEUTRON: Ein ungeladenes Teilchen, sehr ähnlich dem Proton, das ungefähr die Hälfte der Teilchen in den Kernen der meisten Atome stellt.

NEUTRONENSTERN: Ein kalter Stern, der seine Stabilität aus der zwischen den Neutronen wirksamen Abstoßungskraft des Ausschließungsprinzips gewinnt.

PHASE: Bei einer Welle die Position in ihrem Zyklus zu einem bestimmten Zeitpunkt – ein Maß, das angibt, ob es sich um einen Wellenkamm, ein Wellental oder irgendeinen Punkt dazwischen handelt.

PHOTON: Ein Lichtquant.

PLANCKSCHES QUANTENPRINZIP: Die Vorstellung, dass Licht (oder irgendeine andere klassische Welle) nur in bestimmten Quanten, deren Energie ihrer Frequenz proportional ist, abgegeben oder absorbiert werden kann.

POSITRON: Das (positiv geladene) Antiteilchen des Elektron.

PROPORTIONAL: »X ist Y proportional«: Wenn Y mit einer Zahl multipliziert wird, wird auch X mit ihr multipliziert. »X ist Y umgekehrt proportional«: Wenn Y mit einer Zahl multipliziert wird, wird X durch sie dividiert.

PROTONEN: Die positiv geladenen Teilchen, die ungefähr die Hälfte der Teilchen im Kern der meisten Atome stellen.

QUANT: Die unteilbare Einheit, in der Wellen ausgesandt oder absorbiert werden können.

QUANTENMECHANIK: Die Theorie, die aus Plancks Quantenprinzip und Heisenbergs Unschärferelation entwickelt wurde.

QUARK: Ein (geladenes) Elementarteilchen, das der Wirkung der starken Kraft unterliegt. Protonen und Neutronen setzen sich jeweils aus drei Quarks zusammen.

RADAR: Ein System, das elektromagnetische Wellen in Form von Impulsen verwendet, um die Position von Objekten zu orten, indem es die Zeit misst, die ein einzelner Impuls braucht, um das Objekt zu erreichen und um reflektiert zu werden.

RADIOAKTIVITÄT: Der spontane Zerfall von Atomkernen einer Art in Atomkerne anderer Art.

RAUMDIMENSION: Jede der drei Dimensionen der Raumzeit, die raumartig ist – das heißtt, jede mit Ausnahme der Zeitdimension.

RAUMZEIT: Der vierdimensionale Raum, dessen Punkte Ereignisse sind.

ROTVERSCHIEBUNG: Die Rotfärbung des Lichtes eines Sterns, der sich von uns fortbewegt, infolge des Doppler-Effektes.

SCHWACHE KRAFT: Die zweitschwächste der Grundkräfte mit einer sehr kurzen Reichweite. Sie wirkt auf alle Materieteilchen, nicht aber auf kräftetragende Teilchen.

SCHWARZES LOCH: Eine Region der Raumzeit, aus der nichts, noch nicht einmal Licht, entkommen kann, weil die Gravitation zu stark ist.

SINGULARITÄT: Ein Punkt in der Raumzeit, an dem die Raumzeitkrümmung unendlich wird.

SINGULARITÄTSTHEOREM: Ein Theorem, aus dem hervorgeht, dass eine Singularität unter bestimmten Umständen auftreten muss.

SPEKTRUM: Die Aufteilung beispielsweise einer elektromagnetischen Welle in ihre Teilstufen.

SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE: Einsteins Theorie, die auf der Vorstellung beruht, dass die Naturgesetze für alle Beobachter, unabhängig von ihrer Geschwindigkeit, gelten sollten.

SPIN: Eine Elementarteilchen innewohnende Eigenschaft, die mit der üblichen Vorstellung von Rotation verwandt, aber nicht identisch ist.

STARKE KRAFT: Die stärkste der vier Grundkräfte mit der kürzesten Reichweite. Sie hält die Quarks in den Protonen und Neutronen zusammen sowie die Protonen und Neutronen selbst, sodass diese Atome bilden.

STATIONÄRER ZUSTAND: Ein Zustand, der sich mit der Zeit nicht verändert: Eine Kugel, die sich mit konstanter Geschwindigkeit dreht, ist stationär, weil sie stets gleich aussieht, sie ist aber nicht statisch.

TEILCHENBESCHLEUNIGER: Eine Anlage, die mithilfe von Elektromagneten in Bewegung befindliche geladene Teilchen beschleunigen und ihnen damit mehr Energie verleihen kann.

UNSCHÄRFERELATION: Position und Geschwindigkeit eines Teilchens lassen sich nicht beide mit absoluter Genauigkeit angeben: Je genauer man die eine Größe kennt, desto größer wird die Ungewissheit hinsichtlich der anderen.

URKNALL: Die Singularität am Anfang des Universums.

URZEITLICHES SCHWARZES LOCH: Ein Schwarzes Loch, das im sehr frühen Universum entstanden ist.

VIRTUELLES TEILCHEN: Ein Teilchen, das sich nach der Quantenmechanik nicht direkt entdecken lässt, dessen Vorhandensein aber messbare Auswirkungen hat.

WEISSE ZWERG: Ein kalter Stern, der seine Stabilität aus der auf dem Ausschließungsprinzip beruhenden Abstoßung zwischen Elektronen gewinnt.

WELLENLÄNGE: Bei einer Welle der Abstand zwischen zwei benachbarten Tälern oder zwei benachbarten Kämmen.

WELLE-TEILCHEN-DUALITÄT: Ein Konzept aus der Quantenmechanik, nach der es keinen Unterschied zwischen Wellen und Teilchen gibt; Teilchen können sich manchmal wie Wellen verhalten und Wellen manchmal wie Teilchen.

REGISTER

A

- Absoluter Nullpunkt 329
Äther 41f.
Allgemeine Relativitätstheorie
 14, 27, 29, 48, 56, 58–60,
 71f., 84, 86f., 90, 102,
 133f., 143, 145, 148, 181f.,
 192f., 203, 227, 245–250,
 252, 265f., 285, 287, 305f.,
 315, 329
– → Raumzeit 245
– → Zeitreisen 246
– als klassische Theorie 103,
 265
– Einwände gegen 31
– entscheidendes Postulat
 42f.
– grundlegende Teiltheorie der
 Physik 29
– kombiniert mit
 → Unschärferelation 265
– sagt eigenes Versagen voraus
 82, 89, 102, 234f.
– und individuelles Zeitmaß
 61, 227
– und Lichtgeschwindigkeit
 44
– und Merkur-Umlaufbahn
 57
– und Quantenmechanik 130
– und Raumzeit-Krümmung
 56, 216
– und Stringtheorie 273, 278
– und Urknall 87, 90, 160,
 182, 211, 234
– Verzicht auf absolute
 Zeit 42–44, 61, 227
 (→ Zwillingsparadoxon)
– Voraussagen zur Licht-
 ablenkung 57
– Voraussagen zur Zeit-
 verlangsamung 60f.
– Zwillingsparadoxon 248
Allgemeine Relativitätstheorie
 und Quantenmechanik ver-
 einigt 90, 219, 265,
 291
– keine Singularitäten 265
– Raumzeit endlich, ohne
 Grenzen 26, 291

- Schwarze Löcher strahlen 179, 265
 - Universum in sich abgeschlossen 265
 - Alpha Centauri 248f., 251
 - ALPHER, RALPH 187
 - Anderswo → Ereignis im Anderswo
 - anthropisches Prinzip 196f., 199f., 211, 219, 276, 278, 329
 - schwache Version 196, 201, 211
 - starke Version 196, 198
 - und die Existenz intelligenter Wesen 197
 - und die Keine-Grenzen-Bedingung 230
 - Antielektronen (Positronen) 112, 185
 - Antigravitation 303f., 309
 - Anti-Gravitationskraft 72
 - Antimaterie 125
 - Anti-Neutronen 125
 - Antiteilchen (→ Teilchen-Antiteilchen-Paare) 125–127, 129, 170f., 253, 258–260, 329
 - ARISTOTELES 12f., 33, 36, 38, 67, 104, 293
 - aristotelische Tradition 33
 - Astronaut → Schwarzes Loch
 - Atom 100f., 103–106, 108f., 129, 329
 - Bohrsches Modell 100
 - Atombombe 261
 - Aufsummierung von Möglichkeiten 181, 213f., 216, 219, 319 (→ Pfadintegralmethode; Feynman)
 - Ansatz zur → Quantengravitation 181
 - Anwendung auf → Gravitationstheorie, Einsteinsche 216
 - Aufsummierung von Möglichkeiten (*sum over histories*) 258, 260
 - AUGUSTINUS 21, 23
 - Ausschließungsprinzip, Paulisches 111, 113, 135f., 138
- B**
- Beobachter 248–251, 260
 - bewegter B. 42–44, 249
 - BERKELEY, GEORGE 38
 - Beschleunigung 35, 329
 - BETHE, HANS 187
 - Bewegung → Newton, Bewegungsgesetze
 - Big Crunch 303
 - »Blasen« 207f.
 - größer als das Universum 208
 - BOHR, NIELS 100–102
 - BONDI, HERMANN 83f.
 - BORN, MAX 264
 - Brownsche Molekularkbewegung 105

C

CARTER, BRANDON 149f.,
167, 324

Casimir-Effekt 253f.

CERN 250

CHADWICK, JAMES 106

CHALATNIKOW, ISAAK 85f.

CHANDRASEKHAR,

SUBRAHMANYAN 134f.,
137f.

Chandrasekharscher Grenzwert
136–138, 154, 158, 329

chaotische Grenzbildung 194f.

(→ Universum, räumlich
unbegrenzt; Universen,
unendlich viele)

Chronologieschutz (→ Zeit-
reisen) 261

COBE (Cosmic Background
Explorer) 306

Cygnus X-1 153f., 156
(→ Schwarze Löcher)

D

DEMOKRIT 104

Determinismus, wissenschaft-
licher 91

– Ende durch → Unschärfe-
relation 94

Dimensionen 49, 274, 279

– der Zeit 49

– räumliche 48, 275f.

– vier 275

– zehn/sechsundzwanzig 274f.

– zusätzliche 276
– zusammengerollt 278

DIRAC, PAUL 96, 112, 264

Doppler-Effekt 68f., 80

– zur Bestimmung des
Expansionstempos des Uni-
versums 80

dunkle Materie 81, 185f.

(→ Neutrinos)

E

EDDINGTON, ARTHUR 134f.,
137, 284

EINSTEIN, ALBERT 27, 42,
51, 53, 58, 71, 89f., 95,
105, 133, 137, 202, 215f.,
239, 245f., 252, 263f., 266,
294–296, 303–306, 311,
313, 324

Einstein-Rosen-Brücke 252

elektrische Ladung 105, 116,
330

elektrisches Feld 105

Elektrizität 40

elektromagnetische Kraft 40,
115, 122f., 182, 188, 202,
264f., 330

– stärker bei höherer Energie
122

– vereinigt mit der schwachen
Kraft 117, 121f. (→ Wein-
berg-Salam-Theorie)

elektromagnetisches Feld
105

- Elektronen 105–109, 111f., 114–116, 122, 127, 129, 136, 185, 198, 278, 282, 329
- Elektronen-Antielektronen-Paare 185
- Elektronengleichung 264
- elektroschwache Vereinigungsgesetze 282, 330
- Elementarteilchen 107f., 129, 250, 282, 330
- ELLIS, GEORGE 324
- Energie
 - Äquivalenz von Masse und Energie 171
 - dunkle 302–304, 316
 - Erhaltungssatz 330
 - negative 170f.
 - negative/positive 252
 - positive 170f., 205
- Energiedichte 252–254, 261
- Entwicklung (Existenz)
 - intelligenter Wesen 196, 198f., 230, 240, 242
 - und ausgeprägter thermodynamischer Zeitpfeil 230, 240f.
 - und das schwache anthropische Prinzip 197
- Entropie 164, 166, 168, 232, 234, 237–239, 241
 (→ Thermodynamik, Zweiter Hauptsatz; Zeitpfeile; Zeitrichtung)
- Abnahme mit der Zeit 232, 236
- im Schwarzen Loch 166
- Zunahme mit der Zeit 164, 230f., 234, 239–241
- Erdatmosphäre als Gammastrahlendetektor 177
- Erde
 - als Mittelpunkt des Universums 12f., 16, 67, 74
 - Entfernung zum nächsten Stern 64
 - folgt → Geodäte 56
 - Gravitationsfeld 60
 - im Ruhezustand 37
 - Kreisbahn um die Sonne 11, 37, 57, 146
- Ereignis 21, 38, 44, 48, 50f., 227, 249f., 259, 330
- die Sonne erlischt 53f.
- Entfernung des E. 44
- Gesamtheit der E. 51
- im Anderswo 51, 53
- kein Entkommen aus 139
 (→ Schwarze Löcher)
- Kongress auf Alpha Centauri 249–251
- Lichtkegel eines E. 51, 54
- Vergangenheitslichtkegel 51, 54
- Zeitpunkt des E. 44
- Zukunftslichtkegel des E. 51

- Ereignishorizont 139, 142, 145, 160f., 169, 171, 238, 330
 (→ Schwarze Löcher)
- Ereignishorizontflächen 161f., 166f., 171
- F**
- Feld 330
- Fermilab 250
- FEYNMAN, RICHARD 181, 213f., 216, 258, 260
 (→ Aufsummierung von Möglichkeiten)
- Fixsterne 13, 17, 64
- Frequenz 68, 92, 175, 330
- des Lichts 68
 - und Geschwindigkeit 68f.
 (→ Doppler-Effekt)
 - von Gammastrahlen 175
- FRIEDMANN, ALEXANDER 72, 303f.
- Friedmannsche Annahmen (zur Beschaffenheit des Universums) 72–74, 76f.
- Luftballon-Beispiel 76
- Friedmannsches Modell, erstes 76f., 79f., 82, 85f., 184
- frühes Universum
- chaotisch und unregelmäßig 158f., 179, 194f., 202
 - gleichförmige Dichte 223f.
 - inflationäres 202, 240
 - Kontraktionsphase 86
 - Phasenübergang 210
- sehr dicht und heiß 75, 126, 186, 202
 - und urzeitliche Schwarze Löcher 158, 179
- G**
- Galaxien 65f., 73f., 76f., 81, 156
- auseinanderdriften 76f., 83
 - Bewegung aufeinander zu 77
 - Fortbewegung von der Erde 23, 76
 - Geburt von G. 188, 224f.
 - Rotationsgeschwindigkeit 156, 188
 - Rotverschiebung als Maß der Entfernung von der Erde 70, 76
- GALILEI, GALILEO 15f., 33f., 36, 183, 296–298
- Fallexperimente 33
 - widerlegt geozentrisches Modell des Universums 16
- Gamma-Hintergrundstrahlung 175, 179
- Gammastrahlen 40, 174f., 330
- Gammastrahlendetektor, Erdatmosphäre als 177
- GAMOW, GEORGE 75, 187
- GELL-MANN, MURRAY 107
- Geodäte 56, 58, 330
- Gewicht 330
- GLASHOW, SHELDON 119

- Gluon 119f., 273
- in Wechselwirkung mit Quarks 113
- Glueball 120
- als fast freies Teilchen 120
- GÖDEL, KURT 245
- GOLD, THOMAS 83f.
- Gott 21, 23, 38, 183, 194, 217f., 225, 247, 288f., 293
- Schöpfer des Universums 25, 198, 218, 291
- göttliche Intervention 22, 83, 91, 201, 281
- Grand Unified Theories (GUTs)
- → Große Vereinheitlichte Theorien
- Gravitation → Gravitationskraft 115, 117, 271
- → Quantentheorie der Gravitation (Quanten-gravitation)
- Gravitationsfeld 58, 103, 115, 215f., 222, 260
- Lichtablenkung 57
(→ Schwarzes Loch; Urknall)
- Gravitationsgesetz → Newton
- Gravitationskollaps 88, 137f., 142, 147, 150, 246
- Gravitationskraft
(Schwerkraft) 17, 19, 28, 35, 56, 71, 77, 114f., 130–136, 158, 170, 185, 204, 210, 216, 225, 264, 268, 277f., 282, 290, 303, 313, 315
- als Abstoßungskraft 19f., 115, 210
- als Anziehungskraft 20, 35, 115, 129, 290
- als Raumzeit-Krümmung 56, 215
- bestimmt Entwicklung des Universums 129
- ihre Wirkung auf das Licht 133f.
- und Große Vereinheitlichte Theorien 129, 265
- universell 115
- vereinigt mit Quanten-mechanik 227
- Gravitationsrotverschiebung 151
- Gravitationstheorie,
Einstinsche 217
- Gravitationswellen 114f., 145–148, 307f., 311–313, 316
- Großer Endkollaps 331
- Große Vereinheitlichte Theorien (GUTs) 122, 124, 126, 129, 265, 330
- beziehen Gravitation nicht ein 129, 265
- menschliche Existenz als Bestätigung 129 (→ voll-ständige einheitliche Theorie)

Große Vereinheitlichungs-
energie 123
GUTH, ALAN 202f., 206f.
Gyroskop 245

H

HARTLE, JAMES 307
HEISENBERG, WERNER 93,
95 (→ Unschärferelation)
Helium 133, 186–189
HERTOG, THOMAS 307
HOYLE, FRED 83f.
HUBBLE, EDWIN 23f., 65,
70, 72, 89, 246, 302,
304
Hubble-Teleskop 302

I

Inflation, ewige 308,
316
Inflationsphase 206
Inflationstheorie 204, 206,
209, 212, 224, 306,
308–310
– chaotische 210, 221
– neue (→ Symmetriebruch,
langsam) 209f.
Interferenz → Teilchen-Welle-
Dualität

J

Jupiter 13, 16, 39, 64
Jupitermonde 39

K

KANT, IMMANUEL 22, 293
Keine-Grenzen-Bedingung
218, 220, 223–225,
236, 239–241, 247, 292,
304–308, 310, 316, 331
– und Entropie 241
– und Entwicklung
intelligenter Wesen 240
– verbunden mit schwachem
anthropischen Prinzip
230
– verbunden mit Unschärfe-
relation 223–225
Keine-Haare-Theorem
→ Schwarze Löcher 314f.
KEPLER, JOHANNES 15f.
Kern 331
Kernfusion 331
KERR, ROY 149
Körper 33–37, 56, 60, 62
– Massenanziehung 26, 28
– Ruhezustand 36
– Schwerkraft zwischen zwei
28
Koordinaten 331
Kopernikanische Theorie
15–17
KOPERNIKUS, NIKOLAUS 15,
200
kosmische Zensur 143f.
(→ Schwarze Löcher)
– nackte Singularität 143f.
Kosmologie 21, 323, 331

- kosmologische Konstante 203, 206, 210, 240, 246, 267, 303f., 331
- L**
- LANDAU, LEW
- DAWIDOWITSCH 136
- LAPLACE, PIERRE SIMON, MARQUIS DE 91, 132, 288f.
- LEE, TSUNG-DAO 127
- LHC (Large Hadron Collider) 308
- Licht 40, 44, 49, 58f., 131–133, 138f.
- Lichtgeschwindigkeit 39, 41–45, 48, 131, 135, 145, 207, 249–251, 261
- für alle Beobachter gleich 43–45, 48, 227
 - Michelson-Morley-Experiment 41, 46, 55
- Lichtjahr 64f., 331
- Lichtkegel 51, 139, 141, 331
- Lichtkrümmung 139
- Lichtkugel 49
- Lichtsekunde 45, 331
- Lichtwellen 40f., 93, 114, 145
- LIFSCHITZ, JEWSCHENKO 85f.
- LIGO-Forschungsgruppe 311f.
- LINDE, ANDREJ 208, 221, 309
- M**
- magnetisches Feld 331
- Masse 331
- Äquivalenz zur Energie 42
- Materie
- dunkle 186 (→ Neutrinos)
 - innerer Aufbau 106
 - körnige Struktur 104
 - kontinuierliche 104
- MAXWELL, JAMES CLERK 40, 42, 49
- Merkur-Umlaufbahn
- als Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie 27, 57
- MICHELL, JOHN 132, 153
- MICHELSON, ALBERT 41
- Michelson-Morley-Experiment 41, 46, 55
- Mikrowellen 40, 73
- Mikrowellenhintergrund 201, 210, 224, 331
- Mikrowellen-Strahlenhintergrund 247, 305–309
- Mikrowellenstrahlung 75, 85, 173, 210
- Mond 12–17, 47
- MORLEY, EDWARD 41
- Multiversum 308–310, 317
- N**
- Naturgesetze 94, 198f., 212, 228f., 241, 256, 258, 261
- Neutrinos 185f., 332
- Neutronen 106–108, 112, 119f., 123–125, 136, 185f., 332

- Neutronensterne 136f.,
146f., 152–154, 190, 332
(→ Pulsar)
- Neutronenzerfall 124
- NEWTON, ISAAC 17–20, 38,
58, 71, 284, 313
- Bewegungsgesetze 17, 34f.,
37, 42, 61
 - Gravitationsgesetz 17, 25,
27f., 34–36, 91, 133, 165,
285
- O**
- OLBERS, HEINRICH 20
- OPPENHEIMER, ROBERT 138
- P**
- Partikel → Teilchen
- PAULI, WOLFGANG 111
(→ Ausschließungsprinzip)
- PENROSE, ROGER 87–90,
143, 148, 163, 324
- PENZIAS, ARNO 73–75, 85,
187
- Pfadintegralmethode → Auf-
summierung von Möglich-
keiten
- Phase → Wellen 99, 202f.,
210f., 332
- Photonen 114, 116f., 133, 185,
332
- PLANCK, MAX 92f.
- Plancksche Energie 283
- Plancksche Konstante 94
- Plancksches Quantenprinzip
93, 177, 332
- Planck-Weltraumteleskop 306
- Planeten
- Bewegung um die Erde 13
 - Bewegung um die Sonne 15
 - elliptische Umlaufbahnen
16f., 26, 29, 36, 151
 - Umlaufbahn durch
magnetische Kräfte 16
 - Voraussagen über ihre
Bewegung 19
- POINCARÉ, HENRI 42, 53
- Position 332f.
- PRESKILL, JOHN 314–316
- Protonen 106–108, 111, 119–
121, 123–125, 136, 185–187,
264, 332f.
- Protonenzerfall, spontaner
123f.
- PSR 1913+16 (Pulsar) 146
- PTOLEMÄUS 14f., 17, 67
- Pulsar 146, 152
- Q**
- Quantenfluktuation 169, 210
- Quantengravitationseffekte
215, 222
- Quantenhypothese 93
- Quantenmechanik 29, 31,
95–98, 100–103, 108f.,
111–113, 115, 131, 168, 181f.,
213, 227, 253, 264f., 281,
289, 306, 309, 313–315, 332

- als grundlegende Teiltheorie der Physik 29
 - beseitigt Singularitäten 181, 213
 - und Allgemeine Relativitätstheorie 90, 219, 263, 291
 - und Gravitation 213, 222, 227
 - und imaginäre Zeit 215
 - und Singularitätstheoreme 90, 222
 - und Teilchen-Welle-Dualität 108, 131
 - und Vorhersageunsicherheit 95, 281
 - Quantentheorie 169, 205, 253, 258, 260, 289, 306, 313, 323
 - Quantentheorie der Gravitation (Quantengravitation) 29, 90, 103, 130, 181, 207, 215–217, 219f., 235 (→ Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik vereinigt)
 - und Aufsummierung von Möglichkeiten 181
 - und euklidische Raumzeiten 216f.
 - und verschiedene Quantenzustände des Universums 216
 - Quantum 92f., 96, 177, 332
 - Quantenzustand 216
 - Quarks 107f., 111, 116, 119–123, 125f., 129, 273, 282, 333
 - Confinement 119f.
 - Farben 107, 120
 - Flavours 107f.
 - Quasare (quasistellare Objekte) 151, 157
- R**
- Radar 333
 - Radioaktivität 117, 333
 - Radioquellen 84
 - 3C273 151
 - Radiowellen 40, 92, 152, 157
 - Raum 18, 37f., 41, 48f., 80
 - endlicher 18
 - in sich selbst zurückgekrümmt 80
 - leerer 253f., 259
 - unendlicher 18
 - Raumdimension 333
 - Raumzeit 54, 56–58, 62, 82, 215–220, 245, 247, 251f., 254, 256, 258–261, 274f., 323, 333
 - euklidische 215–218, 220
 - gekrümmte Anfangszustände 247
 - Gödels Raumzeit 247
 - keine Grenzen, endlich 79, 183, 217f., 225
 - Raumzeitdiagramme 49

- Raumzeit-Krümmung 56–58, 62, 145, 215f., 235, 251f., 254, 256, 258, 260f.
 - → Zeitreisen zulassende 251f., 254, 256, 258, 260f.
 - negative 252
 - positive 252
 - und Quantentheorie der Gravitation 217
 - unendliche 82, 87, 143, 212
 - Raumzeitregion 252
 - Relativitätstheorie → Allgemeine R.; Spezielle R.
 - Renormierung 266
 - RØMER, OLE CHRISTENSEN 39, 131
 - Röntgenquellen 153
 - Röntgenstrahlen 40, 92, 154, 174
 - ROSEN, NATHAN 252
 - Rotverschiebung 68–70, 76, 151, 224, 333
 - (→ Doppler-Effekt)
 - RUBBIA, CARLO 119
 - Ruhepunkt 38, 40
 - RUTHERFORD, ERNEST 106, 109
- S**
- SALAM, ABDUS 117
 - SCHRÖDINGER, ERWIN 95
 - schwache Kernkraft (Wechselwirkung) 117, 122f., 185, 202, 265, 333
 - Symmetrie C und P nicht gehorchend 127
 - Vektorbosonen als Träger 117
 - vereinigt mit elektromagnetischer Kraft 117, 121–123
- SCHWARTZ, JOHN 272f.
- Schwarze Löcher 130, 132, 139, 142, 147–151, 153, 157–162, 167f., 173–175, 179
 - Cygnus X-1 153f., 156
 - Gravitationsfeld 130, 139, 141, 171
 - Grenze → Ereignishorizont
 - Größe, abhängig von Masse 148–150
 - Keine-Haare-Theorem 150
 - Licht entkommt nicht 139
 - Masse- und Temperatur-Relation 169, 172
 - nicht wirklich schwarz 159
 - und Astronaut 141–145, 180f., 222, 237
 - und Entropie 166, 168, 171
 - und Ereignishorizont 139, 141f., 145, 160f., 169, 171, 238, 330
 - und kosmische Zensur 143f.
 - und Singularität 143, 182
 - und Strahlung 167f., 171, 173, 179f.
 - und Teilchenemission 168f., 171

- urzeitliche 159, 173, 175–177, 179 f., 195, 334
 - Verschmelzung zweier 161
 - Wurmloch 144
 - Schwarzes Loch 246, 259 f., 307, 312–316
 - Anziehungskraft 259
 - Entstehung 314
 - Rotation (→ Zeitreisen) 246
 - Strahlung 259 f., 307
 - SCHWARZSCHILD, KARL** 148
 - Schwerkraft → Gravitation
 - Singularität 86–88, 141, 143 f., 161, 181, 211 f., 217 f., 220–222, 252, 291, 333
(→ Urknall-Singularität; Schwarze Löcher)
 - nackte 143, 148, 332
 - Singularitätstheoreme 89 f., 103, 212, 333
 - und die Quantenmechanik 90, 222
 - Sonne 11–13, 15, 47, 57 f., 100, 115, 271
 - krümmt Raumzeit 57 f.
 - Sonnenfinsternis 254
 - Spektrum 67 f., 333
 - Spezielle Relativitätstheorie 54, 56, 105, 333
 - Spin 109–114, 116 f., 119, 258, 267, 333
 - starke Kernkraft 119 f., 186, 202, 265, 272 f., 334
 - asymptotische Freiheit 120
 - Confinement (Begrenzung) 119
 - schwächer bei hoher Energie 122
- STAROBINSKI, ALEXANDER** 167 f.
- stationärer Zustand 83, 85, 146 f., 334
- Sterne 18–21, 35, 65–68, 132 f., 136, 138, 148, 197, 200, 236 f.
- Beziehung zwischen Lichtfrequenz und Geschwindigkeit 68 f. (→ Doppler-Effekt; Rotverschiebung)
 - Gravitationsfeld 132, 138 f., 141
 - ineinanderstürzende 18, 20, 87, 139, 147 f., 156, 236 f. (→ Schwarze Löcher; Singularität)
 - Leuchtkraft als Maß der Entfernung zur Erde 66
 - Licht entkommt nicht 132, 139 (→ Schwarzes Loch)
 - Weißer Zwerg 136 f., 154, 334
- Strings 268–270, 272
- heterotische 274, 292
 - kosmische S. 246 f.
- Stringtheorie 272 f., 278 f.
- beschreibt Gravitationskraft 272

- gleiche Vorhersagen wie Allgemeine Relativitätstheorie 279
 - Teilchen mit »Linksdrall« 273
 - Supergravitationstheorie 268
 - Supernova 190, 197
 - Superstringtheorie 287
 - Symmetriebruch 247
 - langsamer S. 208, 210, 238
 - Symmetrien 127f., 206–208, 228
 - gebrochene 202f., 206f.
- T**
- Teilchen 93, 96f., 101, 122f., 170f., 250, 273, 283
 - Bündelung zu Jets 157
 - Interferenz 98–100
 - kräftetragende T. → virtuelle T.
 - Position und Geschwindigkeit 93f., 111, 169, 224, 289f. (→ Unschärferelation)
 - Rückwärtsbewegung 259f.
 - Superteilchen 267f.
 - virtuelle T. 253f., 259–261
 - visuelle T. 112–115, 170f., 334
 - wirkliche T. 113f., 171
- Teilchen-Antiteilchen-Paare 113, 125, 170f., 184f., 205, 267
- Annihilation 253, 259
- Teilchenbeschleuniger 122, 250, 283, 334
 - Teilchenenergie 108, 126, 202
 - Teilchenfluktuationen 236
 - Teilchen-Welle-Dualität 97f., 100f., 108f., 131
 - Doppelspalt-Experiment 98
 - Interferenz 97, 100
- Theorie → Große Vereinheitlichte Theorie; vollständige einheitliche Theorie
- Thermodynamik, Zweiter Hauptsatz 165–167, 230, 234
- (→ Entropie)
- THOMSON, J.J. 105, 108
- U**
- Überlichtgeschwindigkeit 252, 255
 - Uhr 248, 259
 - Unendlichkeit 18, 266f., 274f.
 - Universum 17f., 24f., 29f., 53, 62f., 71–73, 79–81, 126f., 173, 194–196, 202–212, 219–225, 234–236
 - Abkühlung 129, 184f., 188, 202
 - Analogie Erdoberfläche 238
 - Anfang 12, 21, 23–25, 62f., 90, 183, 187, 191, 193, 211f., 221, 226, 231, 234, 238, 241, 289, 302, 305–307

- Anfangszustand 27f., 194f., 201, 211f., 216, 289f.
 - beobachtbares 14, 29, 211
 - Dichtefluktuationen 193, 195
 - endlich in der imaginären Zeit 222
 - Entropiezunahme 239
 - Entwicklung 28, 183, 194, 239
 - Expansion 19, 23, 62, 71–73, 75, 77, 81, 85, 89, 129, 159, 185, 188, 202, 222, 224, 230f., 234, 236, 246, 302f., 305
 - Expansionstempo, kritisches 80, 192, 201, 203f., 240
 - frühes 247, 305f., 308, 311, 316
 - frühes u. gleichförmiges 309
 - gleichförmig im großen Maßstab 71–77, 192f., 291
 - Grenzbedingung 194f., 218
 - Größe Null 185
 - heliozentrisches Modell 15, 200
 - inflationäre Expansion am Anfang des U. 307
 - in sich selbst abgeschlossen 226
 - Keine-Grenzen-Bedingung 218
 - keine Grenzen 79, 223, 242
 - keine Singularitäten 220, 222
 - Kontraktion (Kollaps) 17, 24, 62, 80, 82, 128, 182, 188, 225, 232, 237–239, 291, 331
 - Quantenzustand 216, 222
 - räumlich unbegrenztes 195
 - Regionen im frühen U. 310
 - Rotation 245
 - Schicksal 182f., 323
 - statisches Modell 19f., 23f., 70–72, 203, 240
 - und Urknall 24, 89, 182
 - unendliches 18, 88
 - unendlich klein 24
 - unendlich viele 195
 - Ursprung 125, 182f., 323
 - Zunahme von Unordnung 233f.
- Unordnung (→ Entropie)
- Zunahme 244
- Umschärferelation 91, 93f., 96, 102f., 111, 123, 168f., 181, 193, 224, 236, 245f., 253, 264, 282, 285, 289f.
- verbunden mit Allgemeiner Relativitätstheorie 265f.
 - verbunden mit Keine-Grenzen-Bedingung 224
- Urknall 306–308
- als Beginn der Zeit 83, 143, 182

- eine Sekunde danach 185f., 188
 - hundert Sekunden danach 186, 188
 - Naturgesetze versagen 24, 82, 143, 193, 234
 - Singularität 24f., 82, 84f., 89, 123, 143, 182–185, 193, 197, 234, 290f., 334
 - Urknalltheorie
 - heißes Modell 184, 201, 206, 210
 - urzeitliche Schwarze Löcher
 - Schwarze Löcher
- V**
- Vektorbosonen → schwache Kernkraft
 - ($\rightarrow W+; W-; Z^\circ$)
 - Vereinheitlichung der Physik 263, 266
 - Vereinheitlichungsenergie, große 282
 - Vergangenheitslichtkegel 51, 54
 - vollständige einheitliche Theorie 27–31, 103, 198, 243, 245, 257, 279–281, 283, 285f., 292
 - (\rightarrow Große Vereinheitlichte Theorie)
- W**
- WEINBERG, STEVEN 117, 323
 - Weinberg-Salam-Theorie 118f.
 - W– (W minus) 117–119
 - W+ (W plus) 117–119
 - Z° (Z Null) 117–119
 - Weißen Zwerge → Sterne
 - Wellen 40, 50, 69, 92, 96–99, 101f., 213f., 270, 272
 - Wellenlänge 40, 253f., 334
 - resonante 254
 - Welle-Teilchen-Dualität 334
 - WHEELER, JOHN 148, 158
 - Willensfreiheit 257
 - WILSON, ROBERT 73–75, 85, 187
 - WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) 306
 - Wurmlöcher 144, 244, 251f.
- Y**
- YANG, CHEN NING 127
- Z**
- Zeit 23, 38f., 45, 128, 214–218, 220, 227–229, 241, 281f.
 - absolute Z. 38, 42–44, 227
 - Anfang 24, 143, 194, 201, 212, 236, 290 (\rightarrow Urknall)
 - Ende der Z. 291
 - euklidische Z. 217
 - imaginäre Z. 214f., 217, 220–223, 227f., 238, 331
 - reale Z. 213–215, 221–223, 228, 237

- Zeitmaß, individuelles 61, 227
- Zeitpfeil 230, 232, 234–236, 238–242
 - kosmologischer Z. 230, 240–242
 - psychologischer Z. 230, 234, 241f.
 - thermodynamischer Z. 230, 234, 236f., 239–242
- Zeitreisen 244–247, 251–254, 256f., 260, 262
 - rückwärts 259f.
- Vergangenheit 244, 247, 251f., 256–258, 260f.
- vorwärts 259–261
- Zukunft 244, 255f.
- Zeitrichtung 88, 215, 230–232, 234–236, 238–241
- Zukunftslichtkegel 51, 53
- Zustand, geordneter 231, 233, 235f.
- Zustand, ungeordneter 163, 231, 234f.(→ Entropie)
- Zwillingsparadoxon 61, 248

BILDNACHWEIS

- S. 67: European Space Agency & NASA; K. D. Kuntz (GSFC), F. Bresolin (University of Hawaii), J. Trauger (JPL), J. Mould (NOAO), and Y.-H. Chu (University of Illinois, Urbana);
Image processing: Davide De Martin (ESA/Hubble); CFHT image: Canada-France-Hawaii Telescope/J.-C. Cuillandre/Coelum; NOAO image: George Jacoby, Bruce Bohannan, Mark Hanna/NOAO/AURA/NSF
- S. 121: mauritius images/Science Source
- S. 155 (o.): akg-images/Stocktrek Images
- S. 155 (u.), 277: Malcolm Godwin/Jerome Grasdijk/Moonrunner Design, Großbritannien

Alle weiteren Abbildungen stammen von Christine Lackner, Ittlingen; erstellt nach Illustrationen der Originalausgabe.

