



Jörg Resag

Zeitpfad

Die Geschichte unseres
Universums und unseres
Planeten

 Springer

Zeitpfad

Jörg Resag

Zeitpfad

Die Geschichte unseres Universums
und unseres Planeten

 Springer

Jörg Resag
Leverkusen, Deutschland

ISBN 978-3-662-57979-4 ISBN 978-3-662-57980-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57980-0>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2012, Softcover 2019
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Verantwortlich im Verlag: Dr. Andreas Rüdinger
Einbandgestaltung: deblik unter Verwendung eines Bildes von © Adobe Stock

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Für Karen, Kevin, Tim und Jan

Inhalt

Vorwort	IX
1 Die Geburt des Universums	1
1.1 Der Urknall	3
1.2 Die inflationäre Expansion: Das Universum bläht sich auf	23
1.3 Die ersten drei Minuten: die Geburt der Atombausteine	47
1.4 Die erste Stunde: Heliumkerne entstehen	59
1.5 Expansion, Strahlungs- und Materiedichte	68
1.6 Die Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung	83
2 Sterne und Galaxien	97
2.1 Räumliche Strukturen im Universum	97
2.2 Virgo-Galaxienhaufen, lokale Gruppe und Milchstraße	105
2.3 Sterne entstehen und vergehen	111
3 Sonnensystem und Erde	147
3.1 Die Entstehung des Sonnensystems	148
3.2 Erde und Mond werden geboren	155
3.3 Die Frühzeit der Erde: Das erste Leben entsteht	163
4 Erdaltertum	191
4.1 Spätes Ediacarium und Kambrium: Vielzeller erobern das Meer	191
4.2 Ordovizium: erste Landpflanzen und am Ende eine Eiszeit	212
4.3 Silur: kaledonische Gebirgsbildung und die ersten Landtiere	217
4.4 Devon: das Zeitalter der Fische, erste Wälder und Amphibien	226
4.5 Karbon: Sumpfwälder, Kohle und Gletscher	235
4.6 Perm: Pangäa und das größte Massensterben der Erdgeschichte	242
5 Erdmittelalter	251
5.1 Trias: erste Saurier und Säugetiere	252
5.2 Jura: Dinosaurier erobern die Welt, Pangäa zerbricht	261
5.3 Kreidezeit: Blütezeit und Ende der Dinosaurier	272

6	Erdneuzeit	289
6.1	Tertiär: Blütezeit der Säugetiere und die Entstehung der Menschen	289
6.2	Quartär: Eiszeit und Menschen	313
7	Die Zukunft	333
7.1	Die Zukunft der Erde	335
7.2	Das Ende der Sonne	342
7.3	Das beschleunigte Universum	349
	Literatur	359
	Abbildungsverzeichnis	361
	Anhang: Zeittafel	367
	Index	377

Vorwort

Als Kind erscheint einem ein Jahr wie eine Ewigkeit. Wenn man dann älter wird und beispielsweise 40 Jahre oder mehr gesehen hat, dann beginnt man langsam ein Gefühl für etwas längere Zeiträume zu entwickeln. Die eigenen Kinder gehen womöglich mittlerweile in die Schule, und man denkt an die eigene Schulzeit zurück, die nun bereits viele Jahre zurückliegt. An manches kann und mag man sich erinnern, aber sehr vieles haben die letzten Jahrzehnte bereits ausgelöscht – wie sahen nochmal die Lehrer und Mitschüler in der Grundschule aus?

An den Zweiten Weltkrieg können sich nur noch wenige lebende Menschen erinnern; er liegt bereits über 60 Jahre zurück und ist den meisten von uns nur aus Berichten und Filmaufnahmen bekannt. Damals lebten unsere Eltern, Großeltern oder Urgroßeltern – bereits Letztere haben nur wenige von uns noch persönlich kennengelernt. Gehen wir noch weiter in der Zeit zurück, so verschwindet diese sehr schnell im Dunkel der Vergangenheit, und man kann nur noch anhand von geschichtlichen Quellen erschließen, wie es damals gewesen sein muss. So schrieb bereits der römische Kaiser Mark Aurel (121 bis 180 n. Chr.) in seinen Selbstbetrachtungen vor mehr als 1 800 Jahren:

„Einst gebräuchliche Worte sind jetzt unverständliche Ausdrücke. So geht es auch mit den Namen ehemals hochgepriesener Männer wie Camillus, Kaeso, Volesus, Leonnatus, und in kurzer Zeit wird das auch mit einem Scipio und Cato, nachher mit Augustus und dann mit Hadrian und Antoninus der Fall sein. Alles vergeht und wird bald zum Märchen und sinkt rasch in völlige Vergessenheit...“

Auch unseren Vorfahren war also durchaus bewusst, wie kurz die Zeiträume sind, die wir selbst überblicken können. So sind beispielsweise zur Zeit Mark Aurels die ägyptischen Pyramiden von Gizeh bereits altertümliche Gebäude, die rund 2 500 Jahre zuvor von Pharaonen erbaut wurden, deren Namen nur sehr wenigen Zeitgenossen Mark Aurels noch bekannt gewesen sein dürften. Wie wäre es wohl, wenn diese Pyramiden uns von den letzten 4 500 Jahren

berichten könnten, einem Zeitraum, in dem bereits an die 200 Menschengenerationen gelebt haben?

Und selbst dieser Zeitraum ist winzig im Vergleich zu der Zeitspanne, seit der Menschen wie wir existieren – gut 100 000 Jahre. Gehen wir noch weiter zurück, so verlieren wir schnell jegliche Vorstellung von den Zeiträumen, die wir betrachten, und sprechen einfach zusammenfassend von der *Urzeit*. Ich erinnere mich an manche alten Filmszenen, in denen sich Steinzeitmenschen vor blutrünstigen Dinosauriern in Acht nehmen mussten, obwohl diese beim Erscheinen der ersten Menschen bereits seit mehr als 60 Millionen Jahren ausgestorben waren. Nie hat jemals irgendein Mensch einen lebenden Dinosaurier zu Gesicht bekommen!

Ich möchte mit diesem Buch versuchen, zumindest eine gewisse Vorstellung von den Zeiträumen zu entwickeln, die seit der Entstehung unseres Universums vergangen sind. Wann und wie entstanden die ersten Menschen? Wann lebten die Dinosaurier, und welche heutigen Lebewesen sind mit ihnen am engsten verwandt? Wann entstanden Sonne, Erde und Mond? Wie alt ist unser Universum eigentlich insgesamt, und wie kann man sich seinen Ursprung und seine Zukunft nach heutigem Wissen vorstellen?

Um die entsprechenden Zeiträume besser überblicken zu können, wollen wir uns die Zeit als langen Pfad vorstellen – als *Zeitpfad*. Versuchen wir es mit einem Maßstab, bei dem ein Millimeter einem Jahr entspricht. Ein typisches Menschenleben auf diesem Pfad ist also etwa acht Zentimeter lang. In diesem Maßstab liegt die Lebenszeit Mark Aurels fast zwei Meter zurück, und der Bau der Pyramiden erfolgte vor gut vier Metern. Das sind überschaubare Größenordnungen, die man sich gut vorstellen kann! Doch wie lang ist dieser Pfad eigentlich insgesamt?

Nach allem, was wir heute über die Welt wissen, lautet die Antwort mit hoher Sicherheit: Unser Universum entstand vor etwa 13,7 Milliarden Jahren mit dem sogenannten Urknall, d. h. der Zeitpfad ist rund 13 700 Kilometer lang. Das ist zwar eine sehr lange Strecke, doch auch sie können wir uns immer noch als Reiseweg auf unserer Erde veranschaulichen. Dazu wollen wir zunächst den Endpunkt des Zeitpfades festlegen, der unserer Gegenwart entspricht. Da ich selbst im Großraum Köln wohne, war es für mich naheliegend, die Stadt Köln als Endpunkt zu wählen. Für die letzten Kilometer und Meter des Zeitpfades müssen wir es noch genauer wissen; was also wäre naheliegender, als den bekannten Kölner Dom als Endpunkt auszuwählen, und zwar ganz präzise den Schnittpunkt seines kreuzförmigen Grundrisses in seinem Inneren.

Die genaue Lage des Anfangspunktes ist dagegen nicht ganz so wichtig, da wir die Länge des Zeitpfades heute nur auf rund 100 Kilometer genau kennen – was eine bemerkenswert gute Genauigkeit ist, an die noch im letzten Jahr-

hundert kaum zu denken war. Die Stadt *Darwin* im Norden Australiens ist etwa 13 400 Kilometer von Köln entfernt, sodass wir in der Umgebung dieser Stadt den Anfangspunkt unseres Zeitpfades positionieren können. Darwin ist nach dem britischen Naturforscher *Charles Darwin* benannt, dessen Hauptwerk *On the Origin of Species (Über die Entstehung der Arten)* im Jahr 1859 die Basis für die Evolutionstheorie legte, die in diesem Buch noch eine wichtige Rolle spielen wird. Was könnte passender sein, als den Startpunkt unseres Zeitpfades in die Nähe der nach ihm benannten Stadt zu verlegen!

Damit haben wir die riesigen Zeiträume der Vergangenheit in für uns Menschen vorstellbare Entfernungen übersetzt. Mit dieser Vorstellung im Gepäck wollen wir uns nun an den Zeitpfad heranwagen und diesen von seinem Startpunkt nahe der australischen Stadt Darwin bis zu seinem heutigen Endpunkt im Kölner Dom entlanggehen.

Wir werden zu Beginn dieser Reise in Kapitel 1 sehen, wie unser Universum im Urknall entsteht und was diesen Urknall hervorgerufen haben könnte – und dabei auf die Frage stoßen, ob es noch andere Universen als das für uns sichtbare geben könnte. Wir werden sehen, wie sich die Energie des Urknalls in Form von Elementarteilchen materialisiert und wie sich daraus schließlich nur knapp 400 Meter nach dem Startpunkt des Zeitpfades neutrale Wasserstoff- und Heliumatome bilden. Die Wärmestrahlung dieser frühen Epoche ist noch heute am Himmel als kosmische Hintergrundstrahlung messbar und liefert uns unschätzbar wertvolle Informationen über das sehr frühe Universum.

Unter dem Einfluss der Schwerkraft ballt sich das Wasserstoff- und Heliumgas innerhalb der ersten 200 bis 300 Zeitpfad-Kilometer lokal zu den ersten Sternen und den ersten noch kleinen Galaxien zusammen (siehe Kapitel 2). Im Laufe der Zeit verschmelzen viele dieser Galaxien zu größeren Galaxien, und ständig bilden sich aus ihrem Gas neue Sterne, während ältere Sterne wieder vergehen und an ihrem Lebensende einen großen Teil ihrer Materie wieder in den Weltraum hinausschleudern. In diesen Sternen entstehen alle schwereren Elemente jenseits von Helium – auch Elemente wie beispielsweise Kohlenstoff, Sauerstoff oder Silizium, aus denen unsere Erde und wir selbst zu großen Teilen bestehen.

Erst nach rund 9 100 Zeitpfad-Kilometern, also ungefähr 4 600 Kilometer vor Köln, bilden sich schließlich unsere Sonne, ihr Planetensystem und damit auch unsere Erde (siehe Kapitel 3). Rund 1 000 Kilometer später entsteht das erste einzellige Leben, aber erst auf den letzten rund 600 Zeitpfad-Kilometern gehen aus ihm komplexe mehrzellige Lebewesen hervor, die zunächst die Ozeane und später auch das Festland erobern (siehe Kapitel 4 und 5). Die Vielfalt des Lebens blüht auf: Schnecken, Quallen, Würmer, Fische, Amphibien, Reptilien, Dinosaurier, Säugetiere und viele andere Lebewesen

entstehen im Lauf der Jahrmillionen, während die Kontinente über den Erdball driften und neue Gebirge sich auffalten, die anschließend wieder von der Erosion abgetragen und in Form von ausgedehnten Sedimentschichten abgelagert werden.

Fünf große Massensterben werfen auf diesen letzten 600 Zeitpfad-Kilometern das Leben immer wieder zurück, eröffnen ihm aber dadurch zugleich auch die Chance für die Entwicklung neuer Lebensformen. Das letzte dieser Massensterben löscht nur 65 Kilometer vor Köln die Dinosaurier und viele andere Tiergruppen aus und gibt damit den Säugetieren die Möglichkeit, die frei werdenden Lebensräume neu zu besiedeln (siehe Kapitel 6). So gelingt es schließlich auch unserer eigenen Menschenart, nur gut 100 Meter vor dem Endpunkt des Zeitpfades das Licht der Welt zu erblicken. Wie es mit der Welt auf dem Zeitpfad der Zukunft jenseits von Köln weitergehen wird, davon handelt Kapitel 7.

Auf unserer Reise entlang des Zeitpfades werden uns viele Bereiche der modernen Naturwissenschaft begegnen. Physik, Kosmologie und Astronomie werden ebenso berührt wie Geowissenschaften und Biologie. Ich habe daher versucht, alle diese Bereiche in diesem Buch in angemessener Weise zu berücksichtigen, wobei es mir wichtig war, oberflächliche Vereinfachungen zu vermeiden und den aktuellen Stand des Wissens möglichst präzise und anschaulich darzustellen. Dabei werden zum Teil auch englischsprachige Originalgrafiken verwendet – für die meisten Leser dürfte das in einer Welt, in der Englisch mittlerweile zur globalen Sprache geworden ist, sicher kein Problem darstellen.

Gerade in den letzten Jahrzehnten ist unser Wissen über die Vergangenheit unserer Welt enorm angewachsen. Wir wissen heute recht genau, wann unsere Welt entstanden ist, wie unser Universum expandiert, wie viel Materie es enthält, wie Erde und Mond sich gebildet haben, wie der Stammbaum des Lebens aussieht und wie wir selbst entstanden sind. Diese modernen Erkenntnisse über unsere Welt im Zusammenhang darzustellen, ist das wesentliche Ziel dieses Buches.

Bei der Erstellung des Buches haben viele Menschen mitgewirkt, denen ich hier ganz herzlich dafür danken möchte. Die wunderbaren Grafiken von Nobu Tamura lassen für uns die Tiere der Vergangenheit lebendig werden, und die Darstellungen von Christopher R. Scotese führen uns vor Augen, wie sehr sich die Lage der Kontinente im Laufe der letzten 600 Millionen Jahre verändert hat. Andreas Rüdinger von Springer Spektrum hat das Buchmanuskript gelesen und mit seinen vielen konstruktiven Vorschlägen sehr zum Gelingen dieses Buches beigetragen. Bettina Saglio (ebenfalls von Springer Spektrum) hat bei den vielen Textseiten und Grafiken den Überblick behalten und auch manche schöne Grafik für das Buch entdeckt. Die Redaktion hat

Annette Heß übernommen und mit ihrem Sachverstand als Biologin dafür gesorgt, dass mir als Physiker keine allzu groben Versehen in diesem Bereich unterlaufen sind. Nicht zuletzt möchte ich meiner Frau Karen und meinen Söhnen Kevin, Tim und Jan für ihre Unterstützung und ihre Geduld danken, wenn die Arbeit an diesem Buch an manchen Abenden oder Wochenenden wieder einmal viel mehr Zeit in Anspruch nahm als gedacht.

Jörg Resag
Leverkusen, im Oktober 2011



1

Die Geburt des Universums

*Ewiges Firmament,
mit den feurigen Spielen
deiner Gestirne,
wie bist du entstanden?
(aus Christian Morgenstern: In Phanta's Schloss – Kosmogonie)*

Wenn wir wie Christian Morgenstern in einer klaren Nacht den Blick zum Himmel richten, so ist dieser erfüllt mit unzähligen Sternen, die scheinbar ewig gleich an denselben Positionen des Firmaments verharren. Die Menschen der Antike haben sie daher *Fixsterne* genannt, im Gegensatz zu den wandernden Planeten, deren Bahn wir am Himmel verfolgen können. Das Universum scheint statisch zu sein, zumindest was die Sterne betrifft, und da auch in sehr weiter Ferne noch Sterne zu finden sind und nirgends ein Rand zu entdecken ist, scheint es außerdem unendlich groß zu sein.

Nachdem Nikolaus Kopernikus im Jahr 1543 die Sonne anstelle der Erde in den Mittelpunkt der Welt gerückt hatte und damit unser Weltbild entscheidend veränderte, entstand in den nächsten Jahrzehnten genau dieses Bild eines unendlichen ewigen Universums, in dem die Fixsterne ferne Sonnen sind. Giordano Bruno wurde für diese Weltsicht im Jahr 1600 noch als Ketzer auf dem Scheiterhaufen verbrannt, denn wo ist in diesem Universum noch Platz für die Schöpfung, das Jüngste Gericht oder das Jenseits?

Doch kann ein statisches, ewiges, unendliches und gleichförmig mit Sternen angefülltes Universum tatsächlich existieren? Wenn man darüber genauer nachdenkt, so stellt man fest, dass man in einem solchen Universum an *jedem* Punkt des Himmels einen Stern sehen würde. Zwar werden die Sterne optisch kleiner, je weiter man in die Ferne schaut, aber auch zahlreicher, sodass das optische Schrumpfen der Sterne dadurch genau ausgeglichen wird. Der Himmel wäre hell wie die Sonne, und auf der Erde würden Temperaturen wie auf den Oberflächen der Sterne herrschen, also mehrere 1 000 Grad. Dieses Problem wurde noch vor dem Jahr 1595 von Thomas Digges und etwas

später (1610) von Johannes Kepler erkannt. Man bezeichnet es auch als das *Olbers'sche Paradoxon*.

Nun könnten natürlich Staubwolken zwischen den Sternen deren Licht absorbieren, und tatsächlich gibt es solche Staubwolken. Doch in einem ewigen Universum mit ewigen Sternen hätte deren Licht diese Wolken längst auf Sterntemperatur aufgeheizt, sodass die Wolken selbst hell wie Sterne strahlen würden. Wir säßen in einem stellaren Backofen.

Auch die Gesetze der Gravitation erlauben kein statisches Universum. Die Sterne ziehen sich gegenseitig an, sodass zunächst ruhende Sterne beginnen würden, aufeinander zuzustürzen. Als Albert Einstein im Jahr 1916 seine allgemeine Relativitätstheorie formulierte, welche die Gesetze der Gravitation bis heute mit hoher Präzision beschreibt, musste er feststellen, dass diese Gesetze kein statisches Universum zulassen. Da er jedoch wie seine Zeitgenossen zunächst an ein statisches Universum glaubte, fügte er einen abstoßend wirkenden Gravitationsterm zu seinen Gleichungen hinzu, um die anziehende Gravitation zwischen den Sternen zu kompensieren. Diese sogenannte *kosmologische Konstante* wird uns in diesem Buch noch öfter begegnen. Dabei übersah Einstein, dass das Gleichgewicht zwischen Anziehung und Abstoßung instabil ist: Das Universum bleibt auch bei Einbeziehung abstoßender Gravitationskräfte dynamisch.

Das Bild eines ewigen, unendlichen, statischen Universums bekommt also langsam Risse. Den Todesstoß versetzte ihm in den Jahren 1927 und 1929 die Beobachtung von Georges Lemaître und Edwin Hubble, dass sich weit von uns entfernte Galaxien von uns wegbewegen, und zwar umso schneller, je weiter sie von uns entfernt sind. Das Universum ist also gar nicht statisch; der erste Blick zum Nachthimmel täuscht! Schaut man weit genug ins Weltall hinaus, so sieht man, dass unser Universum expandiert. Albert Einstein soll daraufhin seine kosmologische Konstante als *größte Eselei seines Lebens* bezeichnet haben – zu Unrecht, wie wir noch sehen werden.

Da das Universum expandiert, kann es auch nicht seit ewiger Zeit existieren, zumindest so wie wir es kennen. Verfolgen wir die Bewegungen der Galaxien rückwärts in der Zeit, so kommen sie einander immer näher, je weiter wir in die Vergangenheit zurückgehen. Die mittlere Materiedichte wird immer größer, und schließlich kommt der Zeitpunkt, bei dem sie unendlich groß werden müsste und alle Sternabstände auf null zu schrumpfen scheinen. Diesen Zeitpunkt bezeichnen wir mit dem Wort *Urknall*. Er stellt die Geburt der Welt dar, wie wir sie kennen, und legt damit den Anfang unseres Zeitpfades fest. Aufgrund der heute möglichen präzisen Beobachtungen des Kosmos wissen wir, dass der Urknall vor 13,7 Milliarden Jahren stattfand. Unser Zeitpfad vom Urknall bis heute, bei dem ein Jahr einem Millimeter entspricht, ist also 13 700 Kilometer lang.

1.1 Der Urknall

Mit dem Urknall beginnen wir ausgerechnet mit dem schwierigsten Thema dieses Buches, denn je weiter wir uns ihm nähern, umso mehr entfernen wir uns von der Welt, die uns anschaulich zugänglich ist und deren physikalische Gesetze wir zuverlässig kennen. Je näher wir ihm kommen, umso dichter ist die Materie im Raum zusammengedrängt und umso höher sind Temperatur und Energie der vorhandenen Materieteilchen.

Wie sah unsere Welt zum Zeitpunkt des Urknalls selbst aus? Um ehrlich zu sein: Wir wissen es nicht, denn die heute etablierten physikalischen Theorien erlauben es uns nicht, den Lauf der Welt bis zum Urknall zurückzuverfolgen. Allerdings kommen wir mit diesen Theorien immerhin schon recht nahe an den Urknall heran, nämlich bis auf mindestens eine millionstel Sekunde (10^{-6} Sekunden). Zu dieser Zeit ist das Universum von einem sehr dichten und heißen Gas (genauer: Plasma) durchdrungen, dessen Temperatur bei etwa zehn Billionen Grad (10^{13} Kelvin) liegt (die Temperatur in Kelvin erhält man, indem man von der Temperatur in Grad Celsius rund 273 Grad abzieht, sodass die Temperatur am absoluten Nullpunkt null Kelvin beträgt; für die hohen Temperaturen in der Nähe des Urknalls macht das allerdings kaum einen Unterschied). Möglicherweise kann man mit den etablierten Theorien sogar noch etwas weiter in der Zeit zurückrechnen, vielleicht bis zu einer Temperatur von 10^{15} Kelvin etwa 10^{-10} Sekunden nach dem Urknall. Die Rechnungen werden dabei allerdings immer aufwendiger und die Ergebnisse unsicherer. Will man noch weiter in der Zeit zurückrechnen, so steigen Dichte und Temperatur dieses Plasmas weiter an und unsere Theorien werden immer spekulativer, bis sie schließlich beginnen, zu versagen. Doch worin genau liegt das Problem?

Um das verstehen zu können, müssen wir einen Ausflug bis zu den Grenzen der heute bekannten Physik unternehmen. Im Detail darauf einzugehen, würde den Rahmen dieses Kapitels sprengen – eine ausführliche Einführung dazu findet der Leser beispielsweise in meinem Buch *Die Entdeckung des Unteillbaren*. Wir benötigen aber hier auch nur einige zentrale Aspekte der modernen physikalischen Theorien, und je weiter wir uns im Verlauf dieses Buches vom Urknall entfernen, umso mehr treten die ungewohnten Aspekte der modernen Physik in den Hintergrund und wir können die Welt anschaulich immer besser begreifen.

Die heutigen physikalischen Theorien ruhen auf zwei Grundpfeilern, die beide im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts entdeckt wurden: der *speziellen Relativitätstheorie* und der *Quantenmechanik*. Schauen wir uns die Grundprinzipien dieser beiden Theorien zumindest so weit an, wie sie für uns hier wichtig sind:

Die spezielle Relativitätstheorie wurde von Albert Einstein im Jahr 1905 formuliert. Sie löste ein Grundproblem, das die Physiker damals intensiv beschäftigte: Licht bewegt sich in jedem Inertialsystem, also in jedem sich gleichförmig bewegenden Bezugssystem, mit derselben Geschwindigkeit, unabhängig von der Eigengeschwindigkeit des Bezugssystems. Ein Raumschiff, das antriebslos im leeren Weltall dahingleitet, ist genau ein solches Bezugssystem. Wenn die Insassen in diesem Raumschiff die Lichtgeschwindigkeit relativ zu den Wänden des Raumschiffs messen, so erhalten sie immer denselben Wert, nämlich knapp 300 000 Kilometer pro Sekunde, egal wie schnell sich das Raumschiff selbst bewegt. Das ist sehr ungewöhnlich! Wenn man beispielsweise die Geschwindigkeit von Wasserwellen in einem See misst, so kann man auf einem Schiff sehr wohl feststellen, dass sich die Wasserwellen relativ zum Schiff mit anderer Geschwindigkeit bewegen, wenn das Schiff fährt. Das Schiff kann sich sogar mit derselben Geschwindigkeit wie die Wasserwellen bewegen und einen Wellenzug auch überholen. Bei Licht geht das nicht – einen Lichtstrahl kann man nicht überholen, und nichts kann sich schneller als Licht fortbewegen.

Nun ist Licht ein elektromagnetisches Phänomen, nämlich eine Welle aus schwingenden elektrischen und magnetischen Feldern (eine sogenannte *elektromagnetische Welle*). Nicht nur für Licht, sondern für alle elektrischen und magnetischen Phänomene spielt die Geschwindigkeit des Raumschiffs keine Rolle. Jedes elektromagnetische Experiment, das wir im Raumschiff ausführen, hat dasselbe Ergebnis, egal ob sich das Raumschiff gleichförmig bewegt oder stillsteht. Das erschien den Physikern Anfang des 20. Jahrhunderts recht mysteriös, zumal es sich nicht gut mit den bekannten Gesetzen der Mechanik vertrug, wie Isaac Newton sie begründet hatte. Man erfand allerlei Mechanismen, um der Schwierigkeiten Herr zu werden, ohne jedoch zum Kern des Problems vorzudringen. Erst Albert Einstein hatte die Idee, dieses merkwürdige Verhalten elektromagnetischer Phänomene zu einem allgemeinen physikalischen Prinzip für *alle* physikalischen Gesetze zu machen, indem er die folgenden beiden Postulate formulierte:

- Die physikalischen Gesetze gelten in allen Inertialsystemen (beispielsweise unser antriebslos dahingleitendes Raumschiff) in der gleichen Form (Relativitätsprinzip).
- Es gibt eine endliche maximale Ausbreitungsgeschwindigkeit für physikalische Wirkungen: die Lichtgeschwindigkeit.

Diese beiden harmlos aussehenden Postulate haben sehr weitreichende Konsequenzen. So kann man sich überlegen, dass eine bewegte Uhr langsamer läuft als eine ruhende Uhr, wobei ein mit der Uhr mitfliegender Beobachter keine

Verlangsamung der Uhr feststellt. Man spricht hier von der *Zeitdilatation*. Ähnlich verhält es sich mit Raumabständen oder mit der Gleichzeitigkeit von Ereignissen, die von relativ zueinander gleichförmig bewegten Beobachtern unterschiedlich beurteilt werden. Es würde hier zu weit führen, genauer darauf einzugehen, da wir diese Aspekte der speziellen Relativitätstheorie kaum benötigen werden. Es genügt für uns, zu wissen, dass sich keine Information oder sonstige physikalische Wirkung schneller als mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen kann.

Eine wichtige Folgerung aus Einsteins Postulaten brauchen wir allerdings noch: die *Äquivalenz von Masse und Energie*. Jede in einem Raumbereich befindliche Energiemenge besitzt eine Trägheit wie eine Masse, und umgekehrt bedeutet jede Energieabgabe eines Körpers einen Massenverlust für diesen Körper. Masse ist demnach nichts anderes als gespeicherte Energie. So weiß man heute beispielsweise, dass der größte Teil der Masse eines Protons oder eines Neutrons durch die Energie des starken Kraftfeldes entsteht, das die drei Quarks zusammenschweißt, aus denen Proton und Neutron bestehen (mehr dazu später).

Man bezeichnet die in der Masse gespeicherte Energie eines Objekts oder Teilchens auch als *Ruheenergie*, denn diese Energie ist auch vorhanden, wenn das Teilchen ruht. Misst man die Energie in Joule und die Masse in Kilogramm, so kann man die Masse eines Objekts über die berühmte Formel $E = mc^2$ in seine Ruheenergie umrechnen; dabei ist c die Lichtgeschwindigkeit. Oft gibt man die Masse eines Teilchens gleich in Energieeinheiten an, um sich die Umrechnung zu ersparen.

Bewegt sich das Teilchen, so kommt zu seiner Ruheenergie die Bewegungsenergie hinzu, und beide zusammen ergeben die relativistische Gesamtenergie des Teilchens. Wer es genau wissen will: Die Formel für die Gesamtenergie E eines Teilchens, das sich mit Impuls p bewegt, lautet $E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$. Dabei ist der Impuls so etwas wie ein gespeicherter Kraftstoß, denn wenn eine konstante Kraft F über einen Zeitraum t auf ein anfangs ruhendes Teilchen einwirkt, so hat es anschließend den Impuls $p = Ft$. Ein ruhendes Teilchen hat den Impuls null, also gar keinen Impuls. Wir brauchen diese Formeln aber hier nicht weiter.

Was geschieht nun, wenn man zwei Teilchen auf sehr hohe Bewegungsenergie beschleunigt und sie dann miteinander kollidieren lässt? Genau das macht man mit Protonen am derzeit größten Beschleuniger der Welt, dem *Large Hadron Collider (LHC)* am CERN bei Genf. Die bei der Kollision verfügbare relativistische Gesamtenergie der Protonen kann dabei neue Teilchen entstehen lassen, denn sie muss sich dafür ja nur in die Ruhe- und Bewegungsenergien der Teilchen nach der Kollision neu aufteilen. Auf diese Weise entstehen bei solchen Proton-Proton-Kollisionen Dutzende neuer Teilchen, die fast alle

sehr instabil sind und in Sekundenbruchteilen in leichtere Teilchen zerfallen. Aus Energie können also neue Teilchen entstehen, und Teilchen können ihre Energie bei ihrem Zerfall auch wieder abgeben.

Man bezeichnet Teilchen, deren Bewegungsenergie deutlich kleiner als ihre Ruheenergie (Masse) ist, oft als *nicht-relativistische Teilchen*. Diese Teilchen bewegen sich sehr viel langsamer als das Licht. Ist dagegen die Bewegungsenergie sehr viel größer als die Ruheenergie, so spricht man von hochenergetischen oder *relativistischen Teilchen*; sie bewegen sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit (aber nie schneller).

Die spezielle Relativitätstheorie erlaubt nun sogar Teilchen, die gar keine Masse und somit auch keine Ruheenergie besitzen, sondern nur Bewegungsenergie aufweisen. Diese *masselosen Teilchen* bewegen sich immer mit Lichtgeschwindigkeit. Ein Beispiel für ein masseloses Teilchen ist das *Photon*, also das Teilchen des Lichts. Ja, richtig: *Licht besteht aus Teilchen!*

Nun hatten wir weiter oben gesagt, Licht sei eine elektromagnetische Welle, in der sich schwingende elektrische und magnetische Felder durch den Raum fortbewegen und gegenseitig am Leben erhalten. Wie passt das mit der Aussage zusammen, Licht bestehe aus Teilchen?

An dieser Stelle kommt die zweite Säule der modernen Physik ins Spiel: die *Quantenmechanik*. Man fand nämlich heraus, dass die Beschreibung von Licht als elektromagnetische Welle nicht alle physikalischen Phänomene erklären kann. So kann Licht einzelne Teilchen (Elektronen) aus einer Alkali-metalloberfläche im Vakuum herausschlagen, wobei diese Teilchen mit umso mehr Wucht herausschlagen werden, je kürzer die Wellenlänge des Lichts ist. Man nennt dies den *Photoeffekt*. Bei einer elektromagnetischen Welle müsste das Herausschlagen eigentlich umso heftiger ausfallen, je stärker deren elektromagnetische Felder sind, also je heller das Licht ist. In Wirklichkeit schlägt helleres Licht aber einfach nur mehr Elektronen aus der Metalloberfläche heraus.

Wenn Licht nun aus Photonen, also masselosen Teilchen, besteht, so kann man dieses Phänomen problemlos erklären. Es sind die Photonen, die die Elektronen aus der Metalloberfläche herausschlagen. Dabei enthält helleres Licht einfach mehr Photonen, und die Energie der Photonen wächst mit kürzerer Wellenlänge. Albert Einstein erhielt für diese Erkenntnis aus dem Jahr 1905 später den Nobelpreis. Übrigens ist dieses Jahr 1905 dasselbe Jahr, in dem Einstein auch seine spezielle Relativitätstheorie veröffentlichte – er war damals gerade einmal 26 Jahre alt. Es kommt selten vor, dass es einem Menschen gelingt, im selben Jahr gleich mehrere solche bahnbrechenden Erkenntnisse zu gewinnen (darüber hinaus veröffentlichte Einstein in diesem Jahr noch eine wichtige Arbeit zur Brown'schen Bewegung und zur spezifischen

Wärme von Festkörpern). Man spricht daher auch vom *annus mirabilis*, also dem Wunderjahr Einsteins.

Bei der Erklärung des Photoeffekts durch Photonen sind wir einen entscheidenden Schritt gegangen: Wir haben eine Teilcheneigenschaft mit einer Welleneigenschaft verknüpft, indem wir die Energie der Photonen abhängig von der Wellenlänge des Lichts gemacht haben. Licht kann also nicht einfach aus klassischen Teilchen bestehen, die sich auf bestimmten Flugbahnen bewegen, sondern es muss auch Wellencharakter besitzen. Aber wie kann man sich das genauer vorstellen?

Die Grundidee besteht darin, den Begriff der Flugbahn aufzugeben und durch die Ausbreitung einer Welle zu ersetzen. Diese Welle ist dabei eine *Wahrscheinlichkeitswelle*: Je größer ihre Intensität ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dort ein Teilchen anzutreffen, also bei einer Lichtwelle ein Photon vorzufinden. Hier kommt ein wesentlicher Grundaspekt der Quantenmechanik zum Vorschein: Sie arbeitet mit Wahrscheinlichkeiten, sagt also beispielsweise mithilfe einer Wahrscheinlichkeitswelle, wie hoch die Chance ist, an einem bestimmten Ort ein Photon zu messen. Sie macht dagegen keine Aussage darüber, wo sich ein Photon generell aufhält (das wäre vergleichbar mit einer Flugbahn). Sie sagt nur: Möglicherweise ist es am Ort x , vielleicht aber auch am Ort y . Bei mehreren Photonen in einer Welle kann man noch nicht einmal sagen, *welches* Photon man an einem Ort vorgefunden hat – die Photonen in der Welle sind *ununterscheidbar*.

Es sieht heute so aus, als ob sich die Natur nicht genauer beschreiben lässt und als ob der Wahrscheinlichkeitscharakter der Quantenmechanik fundamentaler Natur ist. Jeder Versuch, beispielsweise einen ständig wohldefinierten Photonenort in der Theorie unterzubringen, führt zu Widersprüchen mit experimentellen Ergebnissen oder weist andere Unzulänglichkeiten auf. Das Photon weiß gewissermaßen selbst nicht, wo es sich ständig befindet. Für uns Menschen ist diese Erkenntnis sehr unbefriedigend, und Albert Einstein konnte sich auch nie damit abfinden. „*Gott würfelt nicht!*“, soll er gesagt haben. Anscheinend ist es aber so, ob es uns gefällt oder nicht. Irgendwie habe ich den Verdacht, dass hier noch ein sehr tiefes Geheimnis unserer Welt verborgen liegt und dass wir das Wesen der Realität erst dann begreifen werden, wenn wir den Wahrscheinlichkeitscharakter der Quantenmechanik in aller Tiefe verstanden haben (mehr dazu etwas später). Noch sind wir anscheinend nicht so weit.

Die Lichtwellen in unserer Umwelt sind normalerweise so intensiv, dass sie extrem viele Photonen enthalten. Ein einzelnes Photon fällt dabei nicht ins Gewicht, und die Vielzahl der Photonen wirkt sich in der Summe gerade so aus, dass man sie zusammen auch gut durch ein elektromagnetisches Feld be-

schreiben kann. Auf diese Weise geht die Wahrscheinlichkeitswelle bei vielen Photonen in eine elektromagnetische Welle über.

Die Objekte in unserer Umwelt sind meist so groß, dass man die Ausbreitung von Licht gar nicht durch Wellen beschreiben muss, sondern sie vereinfacht durch Lichtstrahlen beschreiben kann. In diesem Fall kann man sich einen Lichtstrahl auch gut als Flugbahn von Photonen vorstellen. Sobald aber die Objekte sehr klein werden, kommt man um eine Beschreibung durch Lichtwellen nicht herum, und sobald die Lichtintensität zu gering wird oder subatomare Teilchen ins Spiel kommen, muss man schließlich zur präzisen quantenmechanischen Beschreibung von Licht durch Photonen übergehen, deren Ausbreitung durch eine Wahrscheinlichkeitswelle beschrieben wird.

Wenn Licht eine Welle ist, die die Ausbreitung von Teilchen beschreibt, was ist dann mit der Ausbreitung anderer Teilchen, beispielsweise Elektronen? Haben Elektronen noch eine Flugbahn? Es zeigt sich, dass die Natur hier sehr konsequent ist, denn für Elektronen und allgemein für jedes beliebige Teilchen gilt dasselbe wie für Licht: Die Ausbreitung und Fortbewegung *jedes* Teilchens wird durch eine Wahrscheinlichkeitswelle beschrieben, deren Intensität die Wahrscheinlichkeit dafür angibt, dort ein solches Teilchen anzutreffen. Flugbahnen entstehen dann als Grenzfall, wenn die betrachteten Abmessungen viel größer als die Wellenlänge sind, analog zu Lichtstrahlen.

Was geschieht nun, wenn wir Quantenmechanik und spezielle Relativitätstheorie beide zugleich berücksichtigen? Man spricht in diesem Fall von sogenannten *Quantenfeldtheorien*, doch wir brauchen hier nur zwei Aspekte dieser Theorien: das *Pauli-Prinzip* und die Existenz von *Antiteilchen*. Beide Aspekte ergeben sich zwangsläufig aus der Synthese von Quantenmechanik und spezieller Relativitätstheorie, lassen sich aber nur schwer anschaulich begründen, sodass wir sie hier einfach als Naturgesetze akzeptieren wollen.

Das Pauli-Prinzip betrifft Teilchen mit sogenanntem halbzahligen Spin, also alle Teilchen, aus denen sich Materie zusammensetzt, insbesondere Elektronen, Protonen und Neutronen (auf den Spin wollen wir hier nicht näher eingehen). Es sagt, dass sich beispielsweise zwei Elektronen nicht im selben quantenmechanischen Zustand aufhalten können, was dazu führt, dass sich Elektronen nicht gerne nahe beieinander aufhalten. Elektronen meiden sich! Letztlich führt das Pauli-Prinzip dazu, dass Atome und die aus ihnen bestehende Materie stabil sind und nicht einfach zusammengedrückt werden können. Das Pauli-Prinzip wird später noch wichtig werden, wenn Sternzentren am Ende eines Sternenlebens in sich zusammenfallen. Wir gehen in Abschnitt 2.3 noch genauer darauf ein.

Nun zu den Antiteilchen: Jedes Teilchen besitzt ein Antiteilchen, das die entgegengesetzte elektrische Ladung trägt, aber ansonsten dieselben Eigenschaften wie das Teilchen hat. So ist das Antiteilchen des negativ geladenen

Elektrons das gleich schwere, aber positiv geladene *Positron*. Teilchen und Antiteilchen können paarweise aus Energie entstehen, und umgekehrt zerstrahlen sie wieder zu Energie, wenn sie aufeinandertreffen. Photonen sind dabei ihre eigenen Antiteilchen, da sie elektrisch neutral sind und auch sonst keine Eigenschaften besitzen, die eine Unterscheidung zwischen Teilchen und Antiteilchen ermöglichen würde.

Damit haben wir die beiden Grundpfeiler der modernen Physik – also die spezielle Relativitätstheorie und die Quantenmechanik – zumindest kurz angerissen. Wir merken uns:

- Nichts kann sich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegen.
- Masse ist gleichsam eingesperrte Energie, sodass aus Energie Teilchen entstehen können und Teilchen wieder zu Energie zerfallen können.
- Licht besteht aus Photonen, deren Energie umgekehrt proportional zur Lichtwellenlänge anwächst. Allgemein wird die Fortbewegung jedes Teilchens durch eine Wahrscheinlichkeitswelle beschrieben.
- Das quantenmechanische Pauli-Prinzip sorgt für die Stabilität der Materie, da beispielsweise Elektronen sich gegenseitig meiden.
- Jedes Teilchen besitzt ein entgegengesetzt geladenes Antiteilchen. Teilchen und Antiteilchen können paarweise aus Energie entstehen und wieder zu Energie zerstrahlen.

Wir kennen heute zwölf Teilchen, aus denen Materie bestehen kann: sechs Quarks und sechs Leptonen. Aus den leichtesten beiden Quarks bestehen die Protonen und Neutronen, aus denen sich die Kerne der Atome zusammensetzen, während das leichteste geladene Lepton – das Elektron – die Hülle der Atome bildet. Wir gehen später noch genauer darauf ein.

Zwischen diesen Teilchen können vier verschiedene Kräfte wirken, die allgemein als *Wechselwirkungen* bezeichnet werden. Zwei dieser Kräfte kennen wir gut: die *Gravitation* (Schwerkraft) und die *elektromagnetische Wechselwirkung*, die alle elektrischen und magnetischen Phänomene umfasst. Hinzu kommen die *starke Wechselwirkung*, die die Quarks zu Protonen und Neutronen oder anderen Teilchen zusammenschweißt, sowie die sehr kurzreichweitige *schwache Wechselwirkung*, die bestimmte radioaktive Zerfälle hervorruft. Auch auf diese Kräfte gehen wir später noch genauer ein.

Wichtig ist nun Folgendes: Mit Ausnahme der Gravitation lassen sich die anderen drei dieser Kräfte gut mit den beiden Grundpfeilern der modernen Physik in Einklang bringen, vertragen sich also mit der speziellen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik. Die so entstehende Theorie ist das sogenannte *Standardmodell der Teilchenphysik*. Im Prinzip ist diese Theorie in der Lage, fast alle heute experimentell zugänglichen Phänomene im Bereich

der Atome und Elementarteilchen sehr genau zu beschreiben. So kann man mit dem Standardmodell beispielsweise ausrechnen, aus welchen Teilchen das zehn Billionen Grad heiße Plasma zusammengesetzt war, das eine millionstel Sekunde nach dem Urknall das Universum ausfüllte.

Die einzige Kraft, die im Standardmodell nicht enthalten ist, ist die *Gravitation*, also die Schwerkraft. Albert Einstein ist es im Jahr 1916 unter großen Mühen gelungen, die Gravitation immerhin mit einer der beiden Säulen – der speziellen Relativitätstheorie – in Einklang zu bringen. Seine relativistische Gravitationstheorie wird als *allgemeine Relativitätstheorie* bezeichnet. Die allgemeine Relativitätstheorie ist dabei mathematisch und auch begrifflich deutlich komplexer als die spezielle Relativitätstheorie, und Albert Einstein hatte damit so seine Mühe. So schrieb er am 29. Oktober 1912 in einem Brief an den Physiker Sommerfeld:

„Ich beschäftige mich jetzt ausschließlich mit dem Gravitationsproblem und glaube nun, mit Hilfe eines hiesigen befreundeten Mathematikers aller Schwierigkeiten Herr zu werden. Aber das eine ist sicher, dass ich mich im Leben noch nicht annähernd so geplagt habe und dass ich große Hochachtung für die Mathematik eingeflößt bekommen habe, die ich bis jetzt in ihren subtileren Teilen in meiner Einfalt für puren Luxus ansah! Gegen dies Problem ist die ursprüngliche Relativitätstheorie eine Kinderei.“

Der befreundete Mathematiker war übrigens Einsteins Studienfreund Marcel Grossmann.

Warum war die Aufstellung der allgemeinen Relativitätstheorie für Einstein so schwierig? Weil es bei Einbeziehung der speziellen Relativitätstheorie nicht mehr gelingt, die Gravitation über ein Kraftfeld zu beschreiben. Isaac Newton konnte im Jahr 1687 noch sagen, dass sich zwei Massen mit einer Kraft anziehen, die sich proportional dem Produkt ihrer Massen und umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstands verhält, wobei die Kraft entlang der Verbindungslinie zwischen den beiden Massen wirkt (*Newtons Gravitationsgesetz*). Doch dieses Gesetz widerspricht der speziellen Relativitätstheorie, denn die Gravitationskraft auf eine der beiden Massen reagiert bei Newton ohne jede Zeitverzögerung auf den momentanen Aufenthaltsort der jeweils anderen Masse. Wenn sich aber nichts schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegen kann, so gilt dies auch für die Information über den Aufenthaltsort der gravitationserzeugenden Masse.

Bei der elektrischen Kraft gelingt es noch, sie relativ einfach in Einklang mit der speziellen Relativitätstheorie zu bringen und Informationsübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit auszuschließen. Dafür muss man sie in Zusammenhang mit der magnetischen Kraft setzen. Das Ergebnis sind die so-

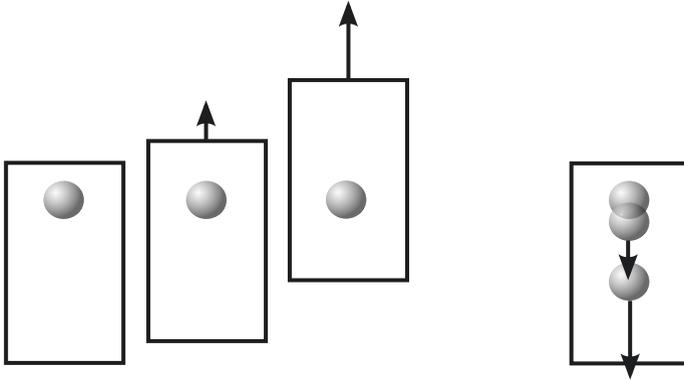


Abb. 1.1 In einer fensterlosen Raumkapsel kann man nicht herausfinden, ob die Kapsel im schwerelosen Weltraum beschleunigt wird (links) oder ob sich die Kapsel bewegungslos in einem Gravitationsfeld befindet (rechts).

genannten *Maxwell-Gleichungen*, die James Clerk Maxwell im Jahr 1864 aufstellte. Diese Gleichungen sagen beispielsweise, dass eine elektrische Ladung ein elektrisches Feld erzeugt, dass eine bewegte elektrische Ladung zusätzlich ein Magnetfeld erzeugt und dass ein veränderliches Magnetfeld ein elektrisches Feld erzeugt und umgekehrt. Gerade dieser letzte Zusammenhang ist es, der die Existenz elektromagnetischer Wellen erlaubt, denn veränderliche elektrische und magnetische Felder können sich im leeren Raum gegenseitig am Leben erhalten und als Welle mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum bewegen.

Bei der Gravitation ist es deutlich schwieriger, die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit physikalischer Wirkungen zu berücksichtigen. Kraftfelder wie bei der elektromagnetischen Kraft funktionieren hier nicht. Einstein gelang es aber dennoch, durch folgende geniale Idee Gravitation und spezielle Relativitätstheorie zu verknüpfen: *Wenn man sich fallen lässt, spürt man die Gravitation nicht!* Genau das geschieht beispielsweise im Inneren einer Raumkapsel, die antriebslos die Erde umkreist. Im Inneren dieser Raumkapsel ist es so, als ob es keine Gravitation gäbe; daher gelten in ihrem Inneren die Gesetze der speziellen Relativitätstheorie, die wir oben angesprochen hatten. Lässt man die Raumkapsel nicht frei fallen, sondern stellt sie beispielsweise auf die Erdoberfläche, so ist die darin wirkende Gravitation nicht von der Scheinkraft zu unterscheiden, die man in der Kapsel spürt, wenn man sie im leeren Weltraum durch Raketen beschleunigt (Abb. 1.1). Man nennt dies das *Äquivalenzprinzip*.

Das Problem besteht nun darin, diese Idee mathematisch zu formulieren. Welche Begriffe kann man verwenden, um die Gravitation mathematisch zu

erfassen? Einstein drückte es in seiner „Kyoto-Vorlesung“ (Dezember 1922) so aus:

„Wir müssen nach Worten suchen, ehe wir Gedanken darstellen können. Wonach müssen wir nun an dieser Stelle suchen? Dieses Problem blieb für mich bis 1912 unlösbar, als ich plötzlich erkannte, dass der Schlüssel zur Lösung des Mysteriums in der Gauß'schen Flächentheorie zu finden war.“

Damit meint Einstein die Theorie gekrümmter Flächen und Räume, die beispielsweise die Geometrie einer Kugeloberfläche beschreiben kann. Aber wie so kann die Mathematik gekrümmter Räume hier weiterhelfen?

Hintergrund ist, dass man die Gravitation immer nur lokal neutralisieren kann, indem man sich fallen lässt. In einer Raumkapsel, die antriebslos die Erde umkreist, herrscht Schwerelosigkeit, d. h. alle sich kräftefrei bewegenden Körper schweben in ihr mit konstanter Geschwindigkeit durch den Raum. Auch in der Nähe der Raumkapsel gilt das, beispielsweise wenn ein Astronaut die Raumkapsel verlässt und sich nicht zu weit von ihr entfernt. Doch in größerer Entfernung von der Raumkapsel gilt dieses Gesetz nicht mehr. Ein weit entfernter antriebsloser Satellit bewegt sich nicht ständig geradlinig-gleichförmig relativ zu unserer Raumkapsel, wenn er die Erde auf einer ganz anderen Umlaufbahn umrundet. Genau dieses Verhalten kann man mithilfe der Krümmung von Raum und Zeit mathematisch erfassen. Die Raumzeitkrümmung sagt: Man kann nicht eine einzige riesige Raumkapsel einfach frei fallen lassen und dadurch in ihr überall zugleich Schwerelosigkeit herstellen. Spätestens wenn die Raumkapsel erdgroß wird, geht das schief; es funktioniert nur im Inneren kleiner antriebsloser Raumkapseln.

Als Analogon zur Flugbahn einer antriebslosen Raumkapsel kann man sich eine Linie auf einer möglicherweise gekrümmten Oberfläche vorstellen. Diese Linie soll möglichst gerade sein, sodass sie die kürzeste Verbindung für die auf ihr liegenden Punkte bildet (man nennt solche Linien auch *Geodäten*). Dabei darf die Linie die Fläche aber nicht verlassen. Bei einer ebenen Fläche sind diese Linien einfach Geraden, wobei sich der Winkel zwischen zwei Geraden auf der Fläche niemals ändert. Diese Situation entspricht einem Raum ohne Gravitation, in der sich antriebslose Körper mit konstanter Geschwindigkeit relativ zueinander bewegen. Wenn die Fläche aber gekrümmt ist, so kann sich das ändern. Die Linien können auseinanderlaufen, sich wieder einander annähern und sich sogar mehrfach schneiden. Ein Beispiel für solche Linien sind Großkreise auf einer Kugeloberfläche, die die Kugelmitte als Kreismittelpunkt haben. Lokal ist dabei auch eine Kugeloberfläche fast flach – auch die Erde könnte man ja für eine flache Scheibe halten, wenn man die eigene Stadt nie verlässt. Dem entspricht die Tatsache, dass die Gravitation in einer

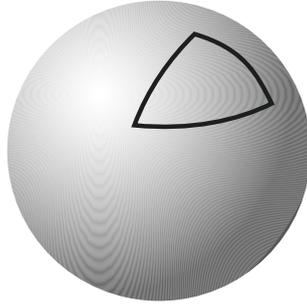


Abb. 1.2 Die Winkelsumme in einem Dreieck beträgt auf einer gekrümmten Oberfläche im Allgemeinen nicht 180 Grad.

kleinen frei fallenden Raumkapsel nicht sichtbar ist, d. h. im Kleinen ist auch die Raumzeit flach.

Man muss die Gravitation also durch die Krümmung von Raum und Zeit beschreiben, um sie mit der speziellen Relativitätstheorie in Einklang zu bringen. Das hört sich ehrfurchtgebietend an und ist für uns auch nicht ganz einfach vorstellbar. Die Krümmung des Raumes bedeutet beispielsweise, dass die Winkelsumme in einem großen Dreieck von 180 Grad abweichen kann (Abb. 1.2), während die Krümmung der Zeit bedeutet, dass relativ zueinander ruhende Uhren nicht gleich schnell laufen müssen. So läuft eine Uhr im Gravitationsfeld der Erde in 300 Kilometer Höhe um etwa eine Millisekunde pro Jahr schneller als eine Uhr auf Meereshöhe. Mit den heutigen Präzisionsuhren ist es kein Problem, diesen winzigen Effekt nachzuweisen. Man muss ihn sogar unbedingt berücksichtigen, wenn man beispielsweise die Atomuhren von GPS-Satelliten mit Uhren auf der Erde synchronisiert.

Wie schafft es eine gekrümmte Raumzeit nun, den Flug beispielsweise eines in die Luft geworfenen Steins zu beeinflussen? Schauen wir uns dazu folgende Situation an: Wir wollen, dass der Stein an einem Punkt A auf der Erdoberfläche startet und zehn Sekunden später an einem einige Meter entfernten Punkt B wieder auf der Erdoberfläche ankommt, wobei sich die zehn Sekunden auf eine am Erdboden ruhende Uhr beziehen. Der Stein soll eine hochpräzise Uhr mit sich führen, auf der wir ablesen können, wie lang der Stein aus seiner Sicht für den Flug von A nach B benötigt. Wir wollen den Stein nun so von A nach B bewegen, dass die mitgeführte Uhr eine möglichst lange Zeit für den Flug anzeigt, also mehr als zehn Sekunden. Da die Zeit in einem Gravitationsfeld weiter oben etwas schneller verstreicht, wird es nützlich sein, den Stein nicht auf geradem Weg von A nach B zu bewegen, sondern die Flugbahn weiter oben verlaufen zu lassen. Dadurch wird die Flugbahn allerdings auch länger, sodass wir den Stein schneller bewegen müssen, denn aus unserer Sicht soll er ja nach zehn Sekunden bei B ankommen. Eine höhere

Geschwindigkeit verlangsamt allerdings den Lauf der mitgeführten Uhr, wie wir aus der speziellen Relativitätstheorie wissen (Stichwort Zeitdilatation, siehe weiter oben).

Die maximale Zeit auf der mitgeführten Uhr erreichen wir, indem wir den Stein auf einer nach unten geöffneten Parabel von A nach B bewegen. Er steigt dabei zunächst schnell in die Höhe und wird weiter oben langsamer, sodass er sich möglichst lange mit möglichst geringer Geschwindigkeit im Bereich der schneller laufenden Zeit weiter oben befindet. Schließlich muss er wieder nach unten, denn er soll ja aus unserer Sicht nach zehn Sekunden bei B eintreffen.

Was müssen wir tun, damit der Stein sich genau so auf einer Parabelbahn von A nach B bewegt? Nun, wir müssen ihn einfach mit der passenden Startgeschwindigkeit schräg nach oben werfen, sodass er nach zehn Sekunden bei B aufschlägt. Den Rest übernimmt die Gravitation. Damit haben wir das Bewegungsgesetz für frei fallende Körper in der durch die Gravitation gekrümmten Raumzeit gefunden: Diese Körper bewegen sich so, dass eine mitgeführte Uhr eine möglichst große Zeit anzeigt, wenn wir Start- und Zielpunkt sowie die erlaubte Zeitdauer auf unserer ruhenden Uhr vorgeben. Man nennt dies auch das *Prinzip der maximalen Eigenzeit*. Eleganter kann man ein Naturgesetz kaum formulieren! Dabei sehen wir auch, dass der Haupteffekt durch die Krümmung der Zeit zustande kommt, also durch die oben schneller laufende Zeit. Die Raumkrümmung spielt bei einem Steinwurf auf der Erdoberfläche kaum eine Rolle.

Die Gravitation wird also durch die Krümmung von Raum und Zeit beschrieben. Dabei gelingt es dieser Theorie, alle heute beobachtbaren Phänomene der Gravitation mit hoher Präzision zu beschreiben. Es ist jedoch bis heute nicht gelungen, bei der Beschreibung der Gravitation auch den zweiten Grundpfeiler einzubeziehen, also die Quantenmechanik. Genau hier steckt das Problem, wenn wir den Urknall selbst physikalisch beschreiben wollen.

Kehren wir nun zurück zu unserer Reise in Richtung Urknall: Ab etwa einer millionstel Sekunde nach dem Urknall können wir die Physik des Universums mit den heute etablierten Theorien gut verstehen. Für die Gravitation sind Quanteneffekte zu dieser Zeit bereits unwichtig, sodass sie sehr gut durch die allgemeine Relativitätstheorie beschrieben werden kann. Die Physik des heißen Plasmas, das das Universum zu dieser Zeit erfüllt, wird gut durch das Standardmodell beschrieben, das wir bereits oben kurz angesprochen haben. Allgemeine Relativitätstheorie und Standardmodell lassen sich problemlos nebeneinander verwenden, um die Physik des Universums ab diesem Zeitpunkt mit guter Genauigkeit zu beschreiben, was wir später auch tun wollen.

Gehen wir jedoch zu deutlich früheren Zeiten und damit höheren Temperaturen über, so verliert zunächst das Standardmodell seine Gültigkeit. Es

muss neue physikalische Phänomene geben, die das Standardmodell nicht mehr korrekt beschreibt. So vermutet man beispielsweise, dass es neben den sechs Quarks und sechs Leptonen weitere Teilchen geben muss, die die sogenannte *dunkle Materie* im Universum bilden – wir gehen später noch genauer darauf ein. Am größten Teilchenbeschleuniger der Welt, dem Large Hadron Collider (LHC) am CERN bei Genf, versucht man seit dem Jahr 2010, genau diese Physik jenseits des Standardmodells aufzuspüren.

Wenn wir uns nun in der Zeit weiter rückwärts in Richtung Urknall bewegen, ab wann werden Quanteneffekte für die Gravitation wichtig, sodass die allgemeine Relativitätstheorie nicht mehr ausreicht?

Wie wir bereits wissen, wird die Fortbewegung von Teilchen in der Quantenmechanik durch Wellen beschrieben, deren Wellenlänge bei höheren Teilchenenergien und damit höheren Temperaturen abnimmt. Die Temperatur wird nun immer größer, wenn wir uns in Richtung Urknall bewegen, sodass parallel dazu die Wellenlänge der Materie im Universum schrumpft.

Eine millionstel Sekunde nach dem Urknall beträgt die Temperatur etwa 10^{13} Kelvin, also 100 000 Milliarden Kelvin, wie wir bereits wissen. Die Wellenlänge der Materie und der Strahlung liegt dann bei gut einem *Fermi* – das entspricht ungefähr der Größe eines Protons und ist rund 100 000-mal kleiner als ein Atom (ein *Fermi* oder kurz *fm* sind 10^{-15} Meter).

Um den Einfluss der Gravitation bei dieser Temperatur auf die Physik der Teilchenkollisionen im heißen Plasma abzuschätzen, kann man sich modellhaft vorstellen, dass bei den Teilchenkollisionen für sehr kurze Zeiten aus den kollidierenden Teilchenenergien mikroskopisch kleine *schwarze Löcher* entstehen können. Schwarze Löcher bilden sich nach der allgemeinen Relativitätstheorie immer dann, wenn die Materiedichte in einem Raumgebiet einen kritischen Wert überschreitet. Die Gravitation lässt dann die Materie immer weiter kollabieren, ohne dass dieser Kollaps noch aufzuhalten ist. Es bildet sich um die kollabierte Materie ein kugelförmiger Raumbereich, aus dem nichts mehr dem Sog der Gravitation entkommen an, auch Licht nicht. Diesen Raumbereich bezeichnet man auch oft als die *Größe* des schwarzen Lochs. Den entsprechenden Radius nennt man *Schwarzschildradius*.

Der Schwarzschildradius einer Erdmasse liegt bei rund einem Zentimeter, d. h. würde man die Erde auf einen Radius von rund einem Zentimeter zusammendrücken, so würde sie durch ihre Eigengravitation endgültig kollabieren und es entstünde ein schwarzes Loch von der Größe einer Murmel. Dennoch wäre die Gravitationswirkung dieser schwarzen Murmel dieselbe wie die der ganzen Erde, d. h. in einem Abstand von knapp 6 400 Kilometern von ihr ist ihre Gravitation genauso groß wie auf der Erdoberfläche (der Erdradius beträgt nämlich knapp 6 400 Kilometer). Halbiert man den Abstand, so vervierfacht sich die Gravitationskraft. Man kann sich vorstellen, dass die

Gravitation am Rand der kleinen Murmel gigantisch sein muss, sogar so groß, dass auch Licht nicht mehr entkommen kann.

Die schwarzen Mikrolöcher, die bei der Kollision von Teilchen bei 100 000 Milliarden Kelvin denkbar wären, hätten einen Schwarzschildradius von nur rund 10^{-39} Fermi, sind also 39 Zehnerpotenzen kleiner als die Wellenlänge der Materie bei dieser Temperatur. Nun sind schwarze Löcher nicht absolut stabil, denn sie strahlen Wärmestrahlung ab, die umso heißer wird, je kleiner das schwarze Loch ist. Ein schwarzes Loch zerstrahlt also mit der Zeit, und zwar umso schneller, je kleiner es ist. Stephen Hawking hat dieses Phänomen im Jahr 1974 als Erster berechnet. Es handelt sich bei diesem Zerstrahlen schwarzer Löcher um einen Quanteneffekt, den die allgemeine Relativitätstheorie nicht erklären kann. Hawking hat damit die erste und bis heute einzige etablierte Verbindung zwischen Quantentheorie und Gravitation entdeckt.

Ein schwarzes Loch mit einer Sonnenmasse lebt fast ewig (etwa 10^{66} Jahre), aber ein schwarzes Mikroloch lebt nur für winzige Sekundenbruchteile. Die extrem winzigen Mikrolöcher, die bei 100 000 Milliarden Kelvin nach der allgemeinen Relativitätstheorie denkbar sind, kann man damit aus Quantensicht kaum ernst nehmen. Sie wären viel kleiner als die Wellenlänge der Materie und lebten nur einen Augenblick. Daher wollen wir sie lediglich als Zeichen werten, dass bei dieser Temperatur die Gravitation für die Physik von Teilchenkollisionen keine Rolle spielt. Die Gravitation ist für solche Teilchenkollisionen unwichtig.

Je weiter wir aber in Richtung Urknall vorangehen, umso höher wird die Energie der kollidierenden Teilchen und umso größer müssten nach der allgemeinen Relativitätstheorie die bei ihrer Kollision erzeugten schwarzen Mikrolöcher werden. Zugleich wird die Quantenwellenlänge der Teilchen kleiner, und die mittleren Teilchenabstände schrumpfen ebenfalls, da sie ungefähr der Wellenlänge entsprechen (wir werden das später beim sogenannten Stefan-Boltzmann-Gesetz noch genauer kennenlernen). Zwischen 10^{32} und 10^{33} Kelvin erreichen wir schließlich den Punkt, bei dem die schwarzen Mikrolöcher dieselbe Größe erreichen wie die Wellenlänge der Teilchen und damit wie der mittlere Teilchenabstand, nämlich rund 10^{-20} Fermi. Das bedeutet, dass die Gravitation nun für Teilchenkollisionen genauso wichtig geworden ist wie die Quantenmechanik, die sich in der Wellenlänge ausdrückt. Wir müssen die schwarzen Mikrolöcher nun ernst nehmen. Zugleich liegen auch die Teilchenabstände in dieser Größenordnung, d. h. die Teilchen liegen nun so dicht beieinander und haben so hohe Energien, dass bei ihren Kollisionen häufig schwarze Löcher entstehen müssen, die den Raum nun relativ dicht ausfüllen können. Es entsteht das Bild eines wabernden Schaums, in dem die Blasen schwarze Mikrolöcher darstellen, die ständig neu erzeugt werden und wieder zerstrahlen. Auch ihre Dynamik muss nun durch Quantenwellen beschrieben

werden, deren Wellenlänge ungefähr ihrer eigenen Größe entspricht. Alles ist nun sehr eng miteinander verwoben: Teilchen, Quantenwellen und schwarze Mikrolöcher. Letztlich ist weder die relativistische Quantenmechanik noch die allgemeine Relativitätstheorie alleine in der Lage, die Physik dieses mit schwarzen Mikrolöchern durchsetzten Quantenschaums noch angemessen zu beschreiben. Das ist die Stelle, an der wir eine Quantentheorie der Gravitation brauchen.

Die typische Größe der Raumbüschchen bzw. der schwarzen Mikrolöcher liegt bei rund 10^{-20} Fermi, wie wir gesehen haben. Kennzeichnend für diese Längenskala ist die sogenannte *Planck-Länge*, die sich aus den fundamentalen Naturkonstanten der Gravitation, der speziellen Relativitätstheorie und der Quantentheorie bilden lässt. Die Planck-Länge beträgt ungefähr $1,6 \cdot 10^{-20}$ Fermi, wobei die etwas krumme Zahl dadurch zustande kommt, dass man die Naturkonstanten auf möglichst einfache Weise zu einer Länge kombiniert. Das ist eine extrem kleine Zahl; sie liegt um 20 Zehnerpotenzen unterhalb der Größe eines Protons oder Neutrons, aus denen sich die Atomkerne zusammensetzen! Wenn man die Strecke von 100 Kilometern um 20 Zehnerpotenzen verkleinert, so erhält man die Größe eines Protons. Dieses muss man nochmals um *denselben Faktor* verkleinern, um bei einer Planck-Länge anzukommen, und ein Proton ist bereits 100 000-mal kleiner als ein Atom.

Die Teilchenenergien bei 10^{32} Kelvin liegen bei rund 10^{19} GeV, wobei ein GeV (Giga-Elektronenvolt) gleich eine Milliarde Elektronenvolt ist. Das Elektronenvolt ist in der Teilchenphysik die gängige Energieeinheit. Die Umrechnungsformel von Joule (J) in Elektronenvolt lautet $1 \text{ eV} = 1,602176 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Ein Elektron, das bei einer Fünf-Volt-Batterie über ein Stromkabel von einem Batteriepol zum anderen wandert, gewinnt genau fünf Elektronenvolt Energie und kann diese beispielsweise in einer Glühlampe wieder abgeben. Bei Zimmertemperatur (300 Kelvin) haben Luftmoleküle eine mittlere Bewegungsenergie von rund 0,03 eV. Die Photonen des sichtbaren Lichts haben Energien zwischen 1,5 und 3 eV. Das ist zugleich auch der Energiebereich, der für chemische Reaktionen charakteristisch ist, sodass die Photonen des Lichts in der Lage sind, solche chemischen Reaktionen auch anzustoßen – man denke an die Photosynthese. Kernenergien sind dagegen millionenfach größer als chemische Energien und liegen bei einigen MeV (Mega-Elektronenvolt, Millionen Elektronenvolt) pro Atomkern. Die Atombombe macht diesen Unterschied auf drastische Weise deutlich, wenn man ihre enorme Sprengkraft mit derjenigen chemischer Sprengstoffe vergleicht.

Analog zur Planck-Länge verwendet man zur Kennzeichnung der Energieskala für die Teilchenenergien bei 10^{32} Kelvin die sogenannte *Planck-Energie*. Sie beträgt $1,2 \cdot 10^{19}$ GeV und ist damit um etwa 16 Zehnerpotenzen höher als die angestrebte Teilchenenergie von 7 000 GeV im Large Hadron Collider

(LHC). Solche Teilchenenergien treten in der Natur wohl nur im Urknall auf. Man kann die Planck-Energie auch in Masseneinheiten umrechnen, indem man durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit dividiert. Auf diese Weise erhält man die sogenannte *Planck-Masse*, die etwa der Masse eines winzigen Staubteilchens entspricht. Die Masse der schwarzen Mikrolöcher bei 10^{32} Kelvin liegt dann im Bereich von ungefähr einer Planck-Masse. Schwarze Mikrolöcher sind also im Vergleich zu den aus der Astrophysik bekannten schwarzen Löchern, die ganze Sternmassen enthalten, absolut winzig.

Was man also braucht, um den Anfang der Welt zu verstehen, ist eine physikalische Theorie, die sowohl die Gravitation als auch die Quantentheorie umfasst. Letztlich braucht man sogar eine Theorie, die sämtliche Naturgesetze konsistent beschreibt und die man oft auch als *Weltformel* bezeichnet. Leider kennt man bis heute diese Theorie nicht, auch wenn es mit der sogenannten *Stringtheorie* und der darauf basierenden *M-Theorie* durchaus einen ernst zu nehmenden Kandidaten dafür gibt.

Nun ist die M-Theorie noch keine präzise ausgearbeitete Theorie wie das Standardmodell oder die allgemeine Relativitätstheorie, sodass wir mit ihr den Urknall selbst noch nicht beschreiben können. Sie besitzt aber immerhin das mathematische Potenzial, das Standardmodell der Teilchenphysik als Grenzfall zu umfassen, und sie ist die einzige bekannte Theorie, die nachweislich eine Quantenbeschreibung der Gravitation enthält. Daher halten viele Physiker die M-Theorie zurzeit für das beste Pferd im Stall, auch wenn es dazu sicher auch andere Meinungen gibt und vieles noch ungeklärt ist.

Soweit wir wissen, muss es in einer Quantentheorie aller Naturgesetze einschließlich der Gravitation für räumliche und zeitliche Abstände eine Minimalgröße geben. Unsere obige Überlegung mit der schaumigen Blasenstruktur aus schwarzen Mikrolöchern weist bereits in diese Richtung. Man vermutet, dass es in diesem Schaum keinen Sinn macht, von Abständen zu sprechen, die kleiner als die Größe der Bläschen sind. Die Wellenlänge der Quantenwellen beschränkt zusammen mit der Größe der schwarzen Mikrolöcher die maximal mögliche Ortsauflösung in diesem Schaum. Nur bei noch höherer Temperatur ließe sich die Wellenlänge verkleinern, doch dann würden noch mehr und noch größere schwarze Mikrolöcher entstehen und diesen Vorteil wieder zunichtemachen. Unsere Reise zurück in der Zeit zu immer höheren Temperaturen, Materie- und Energiedichten ist damit möglicherweise an eine natürliche Grenze gestoßen: Es ist gut möglich, dass der Quantenschaum schwarzer Mikrolöcher den dichtesten Zustand darstellt, den Raum und Materie bilden können. Seine Energiedichte liegt bei rund einer Planck-Energie pro Planck-Länge hoch drei.

Zu diesem Bild passt, dass man in der M-Theorie ebenfalls starke Hinweise darauf findet, dass es eine Minimalausdehnung gibt, unterhalb der räumliche