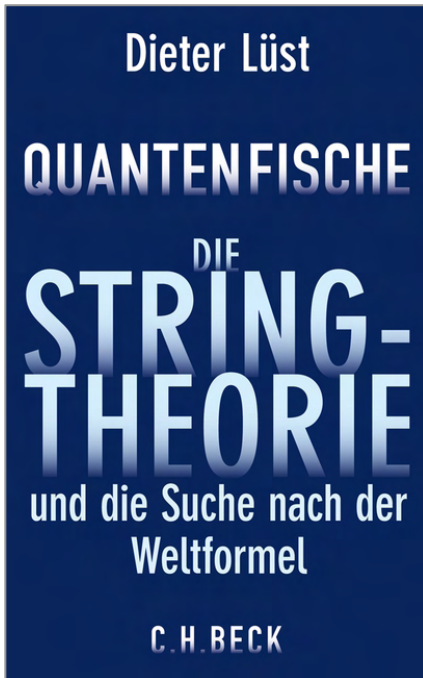


Unverkäufliche Leseprobe



Dieter Lüst

Quantenfische

Die Stringtheorie und die Suche nach der
Weltformel

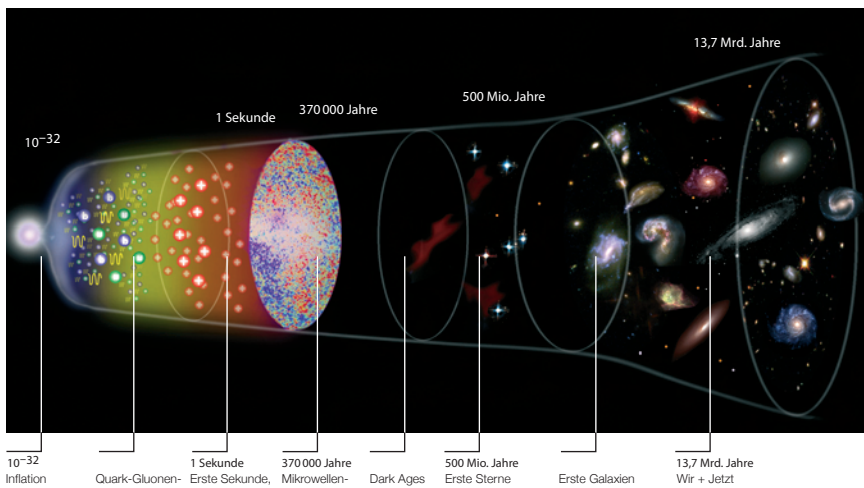
381 Seiten, Gebunden

ISBN: 978-3-406-62285-4

1. Einführung

Am Anfang sprach Gott: «Es werde Licht!», und es ward Licht, und die Erde ward erschaffen. Und am sechsten Tag wurde der Mensch als Krone der Schöpfung von Gott gemacht. Über viele Jahre haben Erde und Mensch ihre biblische Sonderrolle behaupten können. Doch in den letzten Jahrhunderten musste der Mensch eine Menge einstecken: Erst vertrieb ihn Nikolaus Kopernikus aus dem Zentrum der Welt, dann stieß Charles Darwin ihn ins Tierreich zurück, und mittlerweile wissen wir über unser Sonnensystem auch, dass es sich in einer ziemlich randständigen Region der Milchstraße aufhält. Und als wäre das nicht genug, behaupten nun Vertreter der Stringtheorie, dass selbst unser Universum nicht einzigartig, sondern nur eines unter Abermilliarden von Paralleluniversen sein soll.

Bekanntlich geht die Urknallhypothese von einem Universum aus, welches am Anfang aus einem immens heißen Feuerblitz entstanden ist, sich dann innerhalb von ungefähr 14 Milliarden Jahren wie ein Luftballon auf seine heutige Größe aufgeblasen und dabei fast auf den absoluten Temperaturnullpunkt abgekühlt hat. Dabei wird angenommen, dass unser Universum einzigartig ist, das heißt, es gibt nur ein einziges Universum, in dem die Naturgesetze der Physik an jedem Punkt und zu jeder Zeit gleichermaßen Gültigkeit besitzen. Und in der Tat hat all das, was die Astronomen und Astrophysiker in den vergangenen Jahrzehnten am Himmel mit ihren riesigen Teleskopen und Satelliten beobachtet haben, unsere Vorstellung über den heißen Urknall trefflich bestätigt. Deswegen sind fast alle Physiker davon überzeugt, dass die Urknalltheorie eines sich ausdehnenden Universums die Natur des Kosmos richtig beschreibt. Es ist sehr bemerkenswert, dass wir heutzutage in der Physik Gleichungen und For-



1 Der Radius des heute sichtbaren Universums ist hier als Funktion seiner (logarithmischen) zeitlichen Ausdehnung dargestellt, wobei wichtige Ereignisse in der Geschichte des Universums mit angegeben sind.

meln zur Verfügung haben, mit denen wir die Prozesse im Universum kurz nach dem Urknall berechnen können. Ebenso liefern uns dieselben Gleichungen eindeutige Vorhersagen über das Schicksal des Universums in ferner Zukunft, wenn auch nicht über dessen endgültigen Bestand oder gar sein Ende.

Die kosmologischen Gleichungen, die das Universum mit so großer Genauigkeit beschreiben, folgen aus Albert Einsteins Gesetzen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Diese besagen, dass Raum und Zeit untrennbar mit der darin enthaltenen Materie verwoben sind und dass somit die Krümmung und die Ausdehnung des Raumes aus den Teilchen und deren Energien folgen, die während des heißen Urknalls urplötzlich entstanden sind. Die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie erlauben, die Ausdehnung des Universums von Beginn bis in die ferne Zukunft vorzuberechnen. Es handelt sich hierbei also um eine Theorie, die ein hohes Maß an Vorhersagekraft besitzt.

Ähnlich wie in der modernen Kosmologie gibt es auch in der Welt des Mikrokosmos – in der Welt der Elementarteilchen – eine

allgemein akzeptierte Theorie, die alle Naturvorgänge sehr präzise und in überwältigender Übereinstimmung mit den Experimenten beschreibt. Diese Theorie wird als das Standardmodell der Elementarteilchen bezeichnet und beruht auf den Gesetzen der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie. Dieses Modell besagt, dass auch die Gesetze, nach denen sich die Elementarteilchen bewegen und miteinander in Wechselwirkung treten, allumfassend sind und überall im Kosmos gelten. Das heißt, die mikroskopischen Naturvorgänge im gesamten Universum sind universell; ein Elektron und ein Quark folgen überall und zu allen Zeiten gleichen, unveränderlichen Naturgesetzen. Zwar beinhaltet das Standardmodell eine Reihe von nicht erklärten, sogenannten freien Parametern, wie zum Beispiel die Stärke der elektromagnetischen Anziehungskraft oder die verschiedenen und breit gestreuten Massen der Elementarteilchen. Die Mehrzahl der Physiker jedoch erwartet, dass diese Größen aus einer allumfassenden Theorie folgen und mit ihr auch eines Tages eindeutig berechenbar sein werden. Eine solche Theorie, die zwar bis heute noch nicht gefunden wurde, wird im Englischen gerne als «Theory of Everything» und im Deutschen als «Weltformel» bezeichnet. Würden wir wirklich diese Weltformel finden, dann könnten wir im Prinzip alles aus dieser Formel ausrechnen, obwohl das für komplexe Systeme wie Festkörper oder biologische Systeme praktisch unmöglich ist.

Sind also alle Naturgesetze wirklich universell und überall gültig, sind alle Vorgänge in der Natur eindeutig bestimmt? Jeder von uns hat sicher schon einmal in seiner Phantasie darüber spekuliert, dass es neben unserer Welt auch noch Nebenwelten geben könnte, die vollkommen anders aussehen und in denen viele Vorgänge gleichsam auf den Kopf gestellt sind. Ist dies nur Science-Fiction oder möglicherweise doch Realität? Was müssen wir tun, um Eingang in andere Welten zu finden? Wie können wir den genetischen Code des Universums begreifen?

Wir wollen uns in diesem Buch mit der Frage beschäftigen, ob die Grundlagen der modernen Physik wirklich so eindeutig sind, wie es oben in aller Kürze beschrieben wurde. Gibt es wirklich

nur ein einziges, sich ausdehnendes Universum mit universell gültigen Gleichungen oder doch verschiedene Bereiche im Universum, in denen andere Naturgesetze gelten? Existieren eventuell sogar mehrere Universen, also Parallelwelten, die sich bis jetzt hartnäckig unserer Beobachtung entzogen haben? In diesen könnten dann andere Naturgesetze gelten, oder die Massen der Elementarteilchen hätten Werte, die sich in ihren von uns bisher gemessenen Größen unterscheiden. Wir müssten uns dann wahrscheinlich auch darauf einstellen, dass es auch schon eine Zeit vor dem Urknall gab. Der Urknall stellt lediglich den Moment dar, an dem unser Universum in seiner uns vertrauten Form entstand. Es stellt sich auch die Frage, ob es schon Naturgesetze vor dem Urknall gab. Diese Fragen rückten in den letzten Jahren mehr und mehr in den Vordergrund der Physik. Es gibt bereits einige Anzeichen dafür, dass sich die Physik auf einen dramatischen Paradigmenwechsel bezüglich unseres Verständnisses von Raum und Zeit vorbereitet, ja dass sich dieser sogar bei einigen Physikern bereits vollzogen hat. Die Existenz von Parallelwelten, auch oft als Multiversum bezeichnet, ist nicht mehr reine Phantasie, sondern ist in den Bereich der physikalischen Wirklichkeit gerückt.

Es lassen sich in diesem Zusammenhang weitere, sehr spannende Fragen stellen. Hat das Universum, in dem wir leben, wirklich nur drei räumliche Richtungen, Raumdimensionen genannt? Gibt es mehr als drei Raumdimensionen sogar schon in unserem Universum oder schließlich in einer der verschiedenen hypothetischen Parallelwelten? Und weiter: Existieren neben der uns bekannten Materie, die aus Quarks, Elektronen und anderen Elementarteilchen besteht, noch weitere Materieteilchen im Universum, die wir bislang nicht beobachtet haben? Solche Teilchen könnten beispielsweise jene sogenannte Dunkle Materie ausmachen, da sie sich bis jetzt noch nicht direkt experimentell manifestiert haben. Welche Kraft oder Energieform treibt die Expansion des Universums an – ist es nur die uns bekannte Materie, oder ist es eine als «dunkel» bezeichnete Energie, die bislang weder greifbar noch sichtbar ist?

Die mögliche Existenz eines Multiversums, von Extra-Dimensio-

nen, Dunkler Materie und Dunkler Energie mag sicherlich als sehr hypothetisch und die Vermutung ihrer Existenz einfach als unsinnig erscheinen. Doch wie die Entwicklung der Physik immer wieder gezeigt hat, sind es oft gerade die neuen Phänomene, die der sinnlichen Wahrnehmung und deswegen auch der menschlichen Intuition gänzlich widersprechen, sich aber dann doch als physikalisch richtig erwiesen haben. Ein berühmtes Beispiel hierfür sind die in der Relativitätstheorie verwirrende Aussage über die in verschiedenen Bezugssystemen unterschiedlich schnell ablaufende Zeit – sogenanntes Zwillingsparadoxon – und die bewiesene Vorhersage, dass sich Licht nicht «geradlinig» ausbreitet, sondern von massiven Körpern abgelenkt wird. Ein zweites Beispiel ist die Quantenmechanik, die besagt, dass Teilchen sich auch wie Wellen verhalten und sich gewissermaßen überlagern können. Die Entwicklung der Physik bricht oft mit der alltäglichen Erfahrungswelt und auch mit den Lehren der Religion. Das berühmteste Beispiel hierfür sind die kirchlichen Prozesse gegen Galileo Galilei, der schließlich seinen Hypothesen über die Bewegung der Erde um die Sonne abschwören musste. Kopernikus, Galilei, Kepler, Newton und andere haben uns gelehrt, dass die Erde nicht das Zentrum des Universums darstellt, und wir haben akzeptiert, dass unsere Erde nur ein normaler Planet unter vielen anderen Himmelskörpern ist. Müssen wir demnächst auch hinnehmen, dass unser ganzes Universum nichts als eine kleine Seifenblase in einem viel größeren Gebilde ist?

Natürlich muss jede physikalische Theorie immer durch Experimente und Beobachtungen verifiziert werden oder auch, wie Karl Popper alternativ fordert, muss jede gute Theorie durch Experimente falsifizierbar sein. Es ist wirklich sehr bemerkenswert, dass äußerst präzise astrophysikalische Beobachtungen an der kosmischen Hintergrundstrahlung im Weltall und genaue Messungen der Bewegungen der Galaxien und Sterne in den letzten Jahren ein kosmologisches Bild produziert haben, das sich mit der Annahme von Dunkler Materie und Dunkler Energie in Einklang bringen lässt und deren Existenz somit als gesichert gilt.

Für weitere Dimensionen und für das Multiversum besteht ex-

perimentell weit weniger Evidenz als für Dunkle Materie und für Dunkle Energie. Jedoch trauen die theoretischen Physiker seit ein paar Jahren auch Multiversen mit Extra-Dimensionen eine konkrete physikalische Realität zu. Im Wesentlichen wurde dieser Umschwung durch neue Erkenntnisse in der Kosmologie und der Stringtheorie eingeleitet. Als physikalische Lösung ihres theoretischen Konzeptes bietet die Stringtheorie eine Vielzahl möglicher Welten an. Diese Gesamtheit aller möglichen Stringwelten wird auch als Landschaft der Stringtheorie bezeichnet, ganz ähnlich einer realen Landschaft mit Bergen und Anhöhen sowie Tälern, Mulden und Rinnen. Die Landschaft der Stringtheorie ist ein abstrakter Raum, den wir im weiteren Verlauf des Buches beschreiben werden. Die Täler und Mulden entsprechen Stringwelten, die eine relativ niedrige potentielle Energie besitzen, während die Berggipfel Universen mit sehr hoher potentieller Energie darstellen. Täler und Mulden bezeichnet man deswegen auch als die verschiedenen Grundzustände in der Stringlandschaft. Das bedeutet, dass Universen mit niedriger Energie wahrscheinlicher sind als Universen mit hoher Energie, vergleichbar einer Kugel, die sich aus energetischen Gründen viel lieber und wahrscheinlicher in den Tälern und Mulden einer ganz realen Landschaft aufhält und nicht auf deren Anhöhen. Unser Universum, in dem wir leben, entspricht in dieser Landschaft möglicher Welten einem ganz bestimmten Zustand – einer bestimmten Kugel.

Die Idee einer Landschaft mit energetisch unterschiedlich hohen Gipfeln und Tälern ist nicht vollkommen neu. Insbesondere die Festkörperphysik behandelt hochkomplexe Systeme mit einer größeren Anzahl von Lösungen, die auch alle im Rahmen einer Landschaft beschrieben werden können. Die verschiedenen Aggregatzustände von Materialien wie Wasser sind hierfür ein gutes Beispiel. Das Neue in der Stringtheorie ist, dass die verschiedenen Aggregatzustände der Strings ganz verschiedenen Welten und Universen zugeordnet werden müssen. Besonders frappierend ist die Entdeckung, dass es eine riesige Anzahl von Mulden, also Zuständen mit niedriger Energie, in der Stringtheorie gibt. Theoretische Abschätzungen liefern hier Zahlen einer Größenordnung von

10^{100} oder sogar 10^{1000} , also weit mehr als zum Beispiel die typische Anzahl von H_2O -Molekülen in einem Liter Wasser. Verbindet man die Idee einer Landschaft von Multiversen mit der Quantenmechanik und der Allgemeinen Relativitätstheorie, dann erhält man ein Szenario, in dem auch spontane Übergänge zwischen verschiedenen Universen möglich sind. Das bedeutet auch, dass Universen spontan aus anderen oder neben ihnen entstehen können und der Urknall unseres Universums höchstwahrscheinlich nur die Geburt eines neuen Universums in der riesigen Landschaft des Multiversums ist.

Die offensichtliche Existenz einer Stringlandschaft ist sicherlich ein zweischneidiges Schwert. Einerseits besitzen eine beachtliche Zahl dieser Stringwelten Eigenschaften, die denen unseres Universums nahekommen. Andererseits wurde durch die Stringtheorie zum ersten Mal wirklich klar, dass die Suche nach einer eindeutigen Weltformel, welche eindeutige Vorhersagen auch für zukünftige Experimente liefert, wahrscheinlich zu naiv gewesen ist. Welchen Sinn aber ergibt ein physikalisches Weltbild, in dem es eine Vielzahl von erlaubten Universen gibt und in denen darüber hinaus noch ganz verschiedene Naturgesetze gelten könnten? Anscheinend geht mit dem Bild des Multiversums – wenn es also wirklich eine riesige Anzahl von Möglichkeiten für die Naturkonstanten, für die Kraftgesetze, für die Anzahl und die Eigenschaft der Elementarteilchen und für die Struktur des Universums gibt – die Vorhersagekraft der Physik verloren. Warum ist unser Universum so beschaffen, wie es ist? Darüber ist unter den Fachgelehrten nun ein regelrechter Disput ausgebrochen.

Ein Teil der Physiker akzeptiert die Vorstellung, dass eine Unmenge von Parallelwelten mit unterschiedlichen Naturkonstanten, Kraftgesetzen und Elementarteilchen physikalisch realisiert ist, Parallelwelten also tatsächlich existieren. Sie begründen ihre Position – aus dem Griechischen *anthropos* (der Mensch) abgeleitet – mit dem anthropischen Prinzip. Dieses war ursprünglich von dem Kosmologen Robert Dicke eingeführt, dann insbesondere von Brandon Carter im Jahre 1973 anlässlich der Feierlichkeiten zu Kopernikus' 500. Geburtstag in seiner Schrift «Eine große Zahl von

Koinzidenzen und das anthropische Prinzip in der Kosmologie» aufgenommen worden, um zu erklären, warum intelligentes Leben im Universum entstand, obwohl das extrem unwahrscheinlich erscheint.¹ Es besagt in etwa, dass das von uns beobachtete Universum für die Entwicklung menschlichen Lebens geeignet sein muss, da wir sonst nicht existierten, um es zu beobachten. Es können also durchaus viele Welten koexistieren, und unser Universum ist in keiner Weise speziell! Wir dürfen uns aber nicht wundern, in genau unserem Universum zu leben. Denn ebendieses liefert die Voraussetzung für intelligentes Leben oder, abstrakter ausgedrückt, für das Vorhandensein von Beobachtern.

Ein anderer Teil der Wissenschaftler erkennt die Tatsache an, dass es im Prinzip viele Möglichkeiten gibt, ein Universum zu formen, so wie es in der Stringtheorie der Fall ist. Diese Forscher suchen daher nach einem Selektionsprinzip, das unser Universum gegenüber anderen hervorhebt. Deswegen mutmaßen oder hoffen sie, dass man eines Tages verstehen wird, warum unser Universum gerade so aussieht, wie wir es beobachten.

Schließlich ist ein Teil der Physiker der Auffassung, dies sei alles barer Unsinn, denn die Natur sei eindeutig.

Dieses Buch soll den derzeitigen Stand des Wissens über den Kosmos beschreiben und dabei insbesondere auf die Frage eingehen, ob die Naturgesetze eindeutig sind und welche Argumente für die Existenz des Multiversums sprechen, in denen die Naturgesetze nur anthropisch erklärt werden können. Dabei wollen wir uns klarmachen, was die Voraussetzungen für menschliches Leben, also für Beobachter im Universum, sind. Wir werden also den Gegensatz zwischen der Eindeutigkeithypothese und dem anthropischen Prinzip beschreiben und dabei auf die neuesten Ergebnisse der Astro- und Elementarteilchenphysik sowie deren Bedeutung für die oben genannte Fragestellung eingehen. Wir werden versuchen, die Grundzüge der Stringtheorie zu erläutern und uns schlussendlich den aufregenden neuen Experimenten am CERN in Genf und auch im Weltraum widmen, die wahrscheinlich zur Lösung dieser Probleme einen wichtigen experimentellen Beitrag leisten werden. Eventuell wissen wir nach diesen Experimenten

mehr über die Eigenschaft von Dunkler Materie und Dunkler Energie und sogar über die Existenz von Extra-Dimensionen.

Im Mittelpunkt dieses Buches werden der Mikrokosmos, nämlich die Welt der Elementarteilchen, und der Makrokosmos, also die Struktur des Universums, stehen. Die Elementarteilchen gehorchen den Regeln der Quantenmechanik, während die Körper im Weltall, die Sterne, Galaxien und Galaxienhaufen durch den Einfluss der Gravitationskraft miteinander wechselwirken. Albert Einstein hat in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie gezeigt, dass die gravitationelle Anziehungskraft zwischen den Körpern einer Verbiegung des Raumes gleichzusetzen ist. Quantenmechanik und Allgemeine Relativitätstheorie haben sich als fundamentale Theorien glänzend bewährt und sind durch vielfältige Beobachtungen und Experimente genau überprüft und bestätigt worden. Jedoch ist die Physik immer noch unvollkommen: Die Quantenmechanik und die Allgemeine Relativitätstheorie stehen sich unversöhnlich gegenüber. Beide Theorien funktionieren bestens in ihrem jeweiligen Anwendungsbereich. Versucht man die Quantenmechanik und die Allgemeine Relativitätstheorie zu einer umfassenden, fundamentalen Theorie zu vereinen, dann stößt man auf immense Widerstände und Schwierigkeiten. Diese Theorie, welche Quantenmechanik und Allgemeine Relativitätstheorie unter ein gemeinsames Dach stellt, heißt Quantengravitation. Die Suche nach ihr kann als die Suche nach der Weltformel bezeichnet werden. Man hofft, mittels der Weltformel alle Teilchen und alle Kräfte mit einer einzigen Theorie oder vielleicht sogar einer einzigen Gleichung beschreiben zu können. Alle physikalischen Naturphänomene würden dann zwangsläufig und hoffentlich eindeutig aus der Weltformel folgen. Der Anspruch, den die Physik an sie stellt, ist also gigantisch hoch.

Die Stringtheorie ist momentan die einzige Theorie, in der Quantenmechanik und Allgemeine Relativitätstheorie zusammengeführt und zudem auch noch alle Teilchen und Kräfte miteinander vereinigt werden können. Ist also mit der Stringtheorie die Suche nach der Weltformel erfolgreich abgeschlossen worden? Für etliche Jahre erschien dies als Möglichkeit. Aber seit einiger Zeit ist



2 Der Körper der Urschlange Uroboros kennzeichnet vom Mikrokosmos bis hin zum Makrokosmos die verschiedenen Längenskalen, die für die verschiedenen Vorgänge in der Physik und im Universum charakteristisch sind. In den letzten Jahren ist die Physik des Allerkleinsten mit der Kosmologie bei extrem großen Abständen in eine für beide Seiten fruchtbare Symbiose eingetreten, weswegen sich die Schlange in ihren eigenen Schwanz beißt.

ein dramatischer Wandel eingetreten, ja fast eine Kehrtwendung um 180 Grad. Die Stringtheorie stellt zwar immer noch die Vereinigung von Quantenmechanik und Gravitationstheorie dar, aber die Anzahl ihrer Lösungen ist anscheinend riesig groß. Und jede Lösung der Stringtheorie beschreibt eine eigene Welt mit ganz bestimmten Elementarteilchen, mikroskopischen Kräften und Naturkonstanten. Der Preis, den man für die Vereinigung von Quantenmechanik und Gravitation zu zahlen hat, ist offenbar hoch: Die Eindeutigkeit der Naturgesetze steht auf dem Spiel. Es gibt eine große Anzahl von möglichen Universen, deren Gesamtheit man zum Multiversum zusammengefasst hat.²

Die Entwicklungsgeschichte der Physik kann gut mit einem Fabelwesen verglichen werden, dem Uroboros, der Urschlange, die sich in ihren eigenen Schwanz beißt.

Die Ur Schlange symbolisiert die ewige Wiederkehr und die Unendlichkeit. An jedem Ende steht immer ein neuer Anfang. In der Physik symbolisiert der Schlangenkörper einerseits die Entdeckung immer kleinerer Teilchen im Mikrokosmos. Die Reise ins Innerste der Materie wird oft auch mit einem Zwiebelschalenmodell verglichen, in dem man eine Zwiebelschale nach der anderen öffnet und somit immer weiter ins Innere der Zwiebel vordringt. Die andere Richtung des Schlangenkörpers steht für die astrophysikalische Erforschung weit entfernter Objekte im Makrokosmos. In der modernen Physik sind jedoch die Elementarteilchenphysik und die Astrophysik vor einigen Jahren aufeinandergetroffen und gehen nun einen gemeinsamen Weg, den man auch häufig als Astroteilchenphysik bezeichnet. Denn viele Phänomene in der Astrophysik und der Kosmologie stellen eine Herausforderung für die Elementarteilchenphysik dar, so wie auch die Beschäftigung mit den Wechselwirkungen der Elementarteilchen wichtig für die Befunde über die verschiedenen Entwicklungsphasen des frühen Universums waren. Diese Symbiose hat sich als sehr fruchtbar für beide Wissenschaftszweige erwiesen.

Wir möchten die Leser dieses Buches zu einer Reise ins Innerste und Äußerste unseres Kosmos einladen, zu einer Reise in fremde Welten, deren ferne Kontinente noch unbekannt sind. Wissenschaft ist immer eine Reise ins Unerforschte und setzt Unwissenheit voraus. Oft weiß man nicht, ob man jemals am Ziel ankommen wird. Das macht Wissenschaft sogar manchmal angreifbar. Aber unternehmen wir gemeinsam den Versuch!

Auf unserer Reise werden wir zunächst das wohlbekannt Land der klassischen Physik durchqueren, um dann im Land der Quantenmechanik haltzumachen. Die Quantenmechanik bildet die Grundlage für den weiteren Fortgang der Reise hinein in die Quantenwelt der Elementarteilchen. Quantenteilchen unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht von klassischen Körpern, denn dank ihrer Welleneigenschaft und dank der Heisenberg'schen Unschärferelation können sie stabile Bindungszustände eingehen, welche klassischen Teilchen nicht möglich sind. Quantenteilchen sind ständig in Bewegung und setzen sich über Barrieren hinweg, die



3 Die Stringtheorie, dargestellt als hoher Berg mit unendlich vielen Stufen inmitten des Landes der Quantengravitation.

für klassische Teilchen unüberwindbar sind. Auf diese Weise dringen sie in Bereiche ein, die für klassische Teilchen verboten sind. Der nächste Stopp auf unserer Reise gehört wieder zum Bereich der klassischen Physik:

Es ist das klassische Land von Raum und Zeit, welches die Bühne für das Spiel der Materie bereitstellt. Wir werden sehen, dass Raum und Zeit viele interessante Eigenschaften aufweisen, insbesondere die Möglichkeit von zusätzlichen Dimensionen, die wir in unserer Welt bislang noch nicht erwogen haben. Raum und Zeit sind eng verbunden mit der Gravitationsanziehung zwischen den Körpern, weswegen die Kosmologie und Schwarze Löcher die nächste Station auf unserer Reise darstellen werden. Ab diesem Punkt wird die Reise aufregender und gefährlicher, denn wir verlassen nun die Länder, über die wir aus vielen Beobachtungen und Experimenten schon genaue Landkarten besitzen: Jetzt betreten wir das Land der Quantengravitation, welches eine Brücke zwischen den Kontinenten der Quantenmechanik und der Gravitation

schafft. Im Land der Quantengravitation gibt es auch unsichere und schlammige Regionen, in die wir uns besser nicht vorwagen wollen. Aber es gibt dort auch einen massiven und hohen Berg, die Stringtheorie, und es führen unendlich viele Stufen auf diesen Berg hinauf. Auf jeder Stufe werden wir mehr und mehr und immer schwerer werdende Elementarteilchen entdecken. Es wird uns einige Anstrengungen kosten, diesen steilen Berg zu erklimmen und alle seine Einzelheiten genau zu verstehen. Ob wir durch die vielen Wolken, die uns heute immer noch die Sicht verdunkeln, jemals seinen Gipfel erreichen werden, wird auch am Ende unserer Reise nicht klar sein.

Ob uns eventuell der Large Hadron Collider in Genf oder der Planck-Satellit bei der Ausmessung des Berges «Stringtheorie» Hilfestellung leistet, das werden wir auf der letzten Station unserer Reise erfahren.

Um die Reise in das Land der Quantengravitation und der Stringtheorie besser verstehen zu können, möchten wir uns eines Märchens bedienen, das von den sogenannten Quantenfischen im Fischteich handeln soll. Diese Quantenfische weisen sehr viele gemeinsame Eigenschaften mit Elementarteilchen auf.

Wie wir wissen, können Fische nur im Wasser leben – das ist das anthropische Prinzip der Fische –, und deswegen kamen die Fische lange Zeit nicht auf den Gedanken, dass es neben ihren eigenen noch mehr Fischteiche im Fischkosmos geben könnte. Die Quantenfische aber fassten eines Tages den Entschluss, ihren Fischteich genauer auszuforschen. Dabei entdeckten sie viele Phänomene, die auch in der Elementarteilchenphysik, der Kosmologie sowie der Stringtheorie eine große Rolle spielen. Und sie stellten sogar fest, dass sie selbst die Form von Strings besitzen – eine Erkenntnis, die ihnen helfen sollte, in neue Fischteiche vorzustoßen und so den Weg für ein langes Weiterleben zu ebneten.