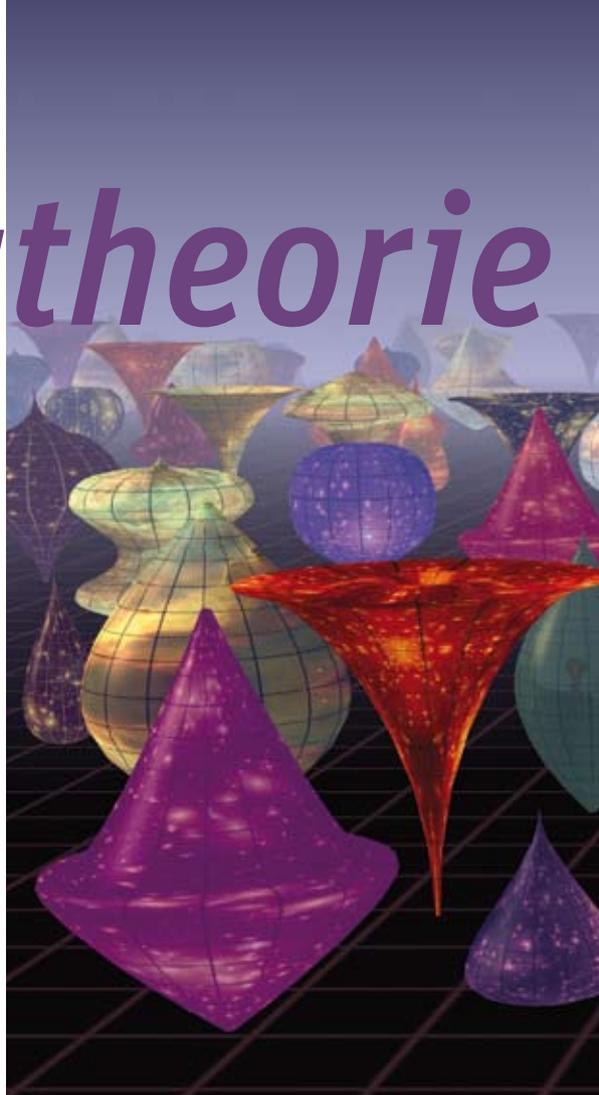


Ist die *Stringtheorie* noch eine Wissenschaft?

Kritiker werfen ihr vor, Dinge zu behaupten, die sich jeder Prüfung entziehen. Doch die Stringtheorie ist auf dem Weg zur Weltformel erfolgreich wie keine andere. Möglicherweise zwingt sie die Physik allmählich zu einem Paradigmenwechsel.



Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

Von Dieter Lüst

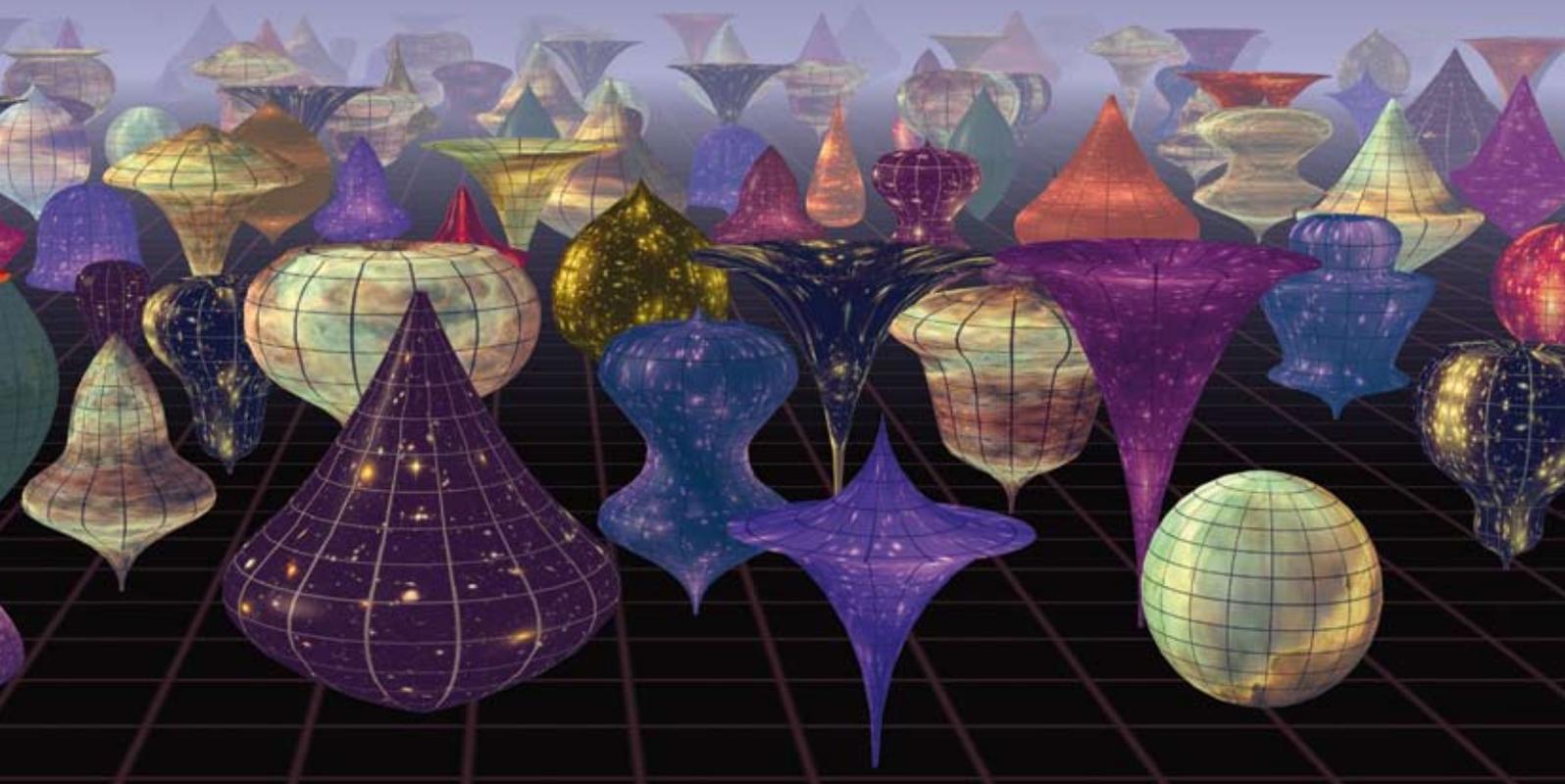
Galt der Mensch einst als Krone der Schöpfung, so musste er in den vergangenen Jahrhunderten doch eine Menge einstecken: Erst vertrieb ihn Nikolaus Kopernikus aus dem Zentrum der Welt, dann stieß Charles Darwin ihn ins Tierreich zurück. Selbst über unser Sonnensystem wissen wir mittlerweile, dass es sich durch eine reichlich randständige Region der Milchstraße bewegt. Und nun, als wäre das noch nicht genug, behaupten theoretische Physiker, dass selbst unser Universum nicht einzigartig sei, sondern nur eines von unzähligen Paralleluniversen.

Laut der Stringtheorie besitzen die zusätzlichen Welten jeweils andere Eigenschaften als die unsere. Sie beherbergen andere Elementarteilchen und werden von anderen Fundamentalkräften regiert. Und wohl nur in sehr wenigen dieser Universen blicken Beobachter wie wir ins All und stellen Fragen nach der Struktur ihrer Welt. Wenn wir die Stringtheoretiker aber fragen, wann wir diese Universen einmal zu Gesicht bekommen, sagen sie uns: Dazu wird es schwerlich kommen.

Überraschenderweise scheint der Theorie damit kein Zacken aus der Krone zu brechen. Im Gegenteil, sie ist bestens etabliert und für die meisten Physiker diejenige Kandidatin für eine »Theorie von allem«, auf welcher derzeit die größten Hoffnungen ruhen. In ihr gelten so genannte Strings als fundamentale Bausteine des Universums: winzige eindimensionale Objekte, die man sich näherungsweise als schwingende Saiten vorstellen kann und die je nach Art der Schwingung unterschiedliche Elementarteilchen repräsentieren. Besteht die Welt tatsächlich aus Strings, könnte diese Theorie eines Tages alle physikalischen Phänomene unserer ebenso wie anderer Welten mit Hilfe einer oder weniger Gleichungen beschreiben.

Kritikloser Verzicht?

Doch wie können Physiker scheinbar kritiklos auf die von Karl Popper (1902–1994) geforderte Falsifizierbarkeit wesentlicher Konsequenzen einer physikalischen Theorie verzichten? Und wie können sie Schlussfolgerungen ernst nehmen, zu denen allein mathematische Formalismen, nicht aber Beobachtungen der Natur führen? Hauptsächlich liegt dies wohl



KRISTIN RIEBE

am ungeheuren Potenzial der Stringtheorie. Als erste Theorie überhaupt hat sie sowohl die Gravitation als auch die schwache, die starke und die elektromagnetische Kraft unter einem Dach zusammengeführt. Die Gravitation wird bislang durch die Relativitätstheorie beschrieben, die in großer Übereinstimmung mit allen Beobachtungen die Prozesse kurz nach dem Urknall berechenbar macht und das Schicksal des Universums bis in ferne Zukunft voraussagt. Die anderen drei Kräfte sind im Standardmodell der Elementarteilchenphysik zusammengefasst. Es beschreibt die Welt des Mikrokosmos und beruht unter anderem auf den Gesetzen der Quantenmechanik, wie sie in den 1920er Jahren von Max Planck, Werner Heisenberg und Paul Dirac aufgestellt wurden.

Beide Theorien machen, wie Popper das forderte, falsifizierbare Vorhersagen und gelten jeweils in einem großen Anwendungsbereich. Weil sie einander aber ausschließen – was bei der Betrachtung extremer physikalischer Bedingungen etwa im Inneren von Schwarzen Löchern oder auf kleinsten Längenskalen deutlich wird –, stürzen sie die theoretische Physik in ein Dilemma. Diese nämlich sucht in reduktionistischer Weise nach einem einheitlichen

Fundament aller physikalischen Zusammenhänge. In der Stringtheorie, deren Entwicklung in den späten 1960er Jahren begann, glaubt sie, es im Prinzip gefunden zu haben. Diese nämlich hat seither den Weg gebahnt, um alle vier Fundamentalkräfte in einem gemeinsamen Rahmen zu beschreiben.

Vorhersagen statt messen

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik hält bislang zwar jedem Falsifizierungsversuch stand. Doch in ihm existieren zahlreiche freie Parameter, Größen also, die experimentell bestimmt werden müssen und erst dann in die mathematischen Gleichungen eingesetzt werden können. Dazu gehören etwa die Stärke der elektromagnetischen Anziehungskraft, aber auch die Massen der Elementarteilchen. Der Stringtheorie indessen traut man zu, diese Größen eines Tages vorherzusagen, was ihren Status als Fundamentalthorie nachdrücklich untermauern würde.

Doch trotz der Fortschritte auf diesem Weg zu einer vereinheitlichten Theorie werden zunehmend kritische Stimmen laut. Denn wer die poppersche Forderung nach Falsifizierbarkeit nicht aufgibt, wird sich mit

Laut Stringtheorie ist unser Universum nur eines von vielen. Sie existieren nebeneinander in einem Hyperraum und treten möglicherweise nie miteinander in Kontakt. Und vielleicht werden die Forscher ihre Existenz auch in Zukunft nicht nachweisen können.

Philosophische Argumente wie das anthropische Prinzip betreten das Parkett

Strings gelten in der Stringtheorie als die fundamentalen Bausteine der Materie. Man kann sie sich als schwingende Saiten vorstellen, die je nach Art der Schwingung unterschiedliche Elementarteilchen repräsentieren. Aus diesen wiederum sind die Atome und schließlich die Gegenstände der makroskopischen Welt aufgebaut. Die Ausdehnung eines Strings entspricht etwa 10^{-35} Metern.

dem, was die Stringtheorie postuliert, nicht anfreunden können. Dazu gehören zusätzliche, möglicherweise unbeobachtbare Raumdimensionen, die den dreidimensionalen Raum (beziehungsweise die vierdimensionale Raumzeit) um mindestens sechs Raumdimensionen erweitern. Dazu gehören aber auch parallele Universen. Und mehr noch: Die Stringtheorie lässt die Existenz vieler Universen nicht nur möglich erscheinen, sondern fordert sie geradezu.

Den Nachweis ihrer Existenz blieb sie aber schuldig. Ein gefundenes Fressen für Kritiker: Diese nämlich werfen den Vertretern der »Multiversums«-Theorie vor, nicht mehr Physik, sondern Metaphysik zu betreiben. Auf das Dilemma reagiert die Physik mit einem seit Jahren andeutenden Paradigmenwechsel bezüglich der Anforderungen, die an eine physikalische Theorie zu stellen sind: Plötzlich steht auch die poppersche Falsifizierbarkeit zur Debatte, und philosophische Argumente wie das anthropische Prinzip betreten das Parkett.

Von Haus aus ist die Stringtheorie zunächst eine physikalische Theorie wie das Standardmodell der Elementarteilchenphysik und die Gravitationstheorie auch. Sie besteht aus einem Satz mathematischer Gleichungen und trifft Aussagen über physikalische Größen wie beispielsweise die Energie des Vakuums. Doch dann weicht sie von bekannten Theorien ab und fordert aus mathematischen Konsistenzgründen, dass die Welt zehn Raumzeitdimensionen – neun Raumdimensionen und eine Zeitdimension – besitzen muss.

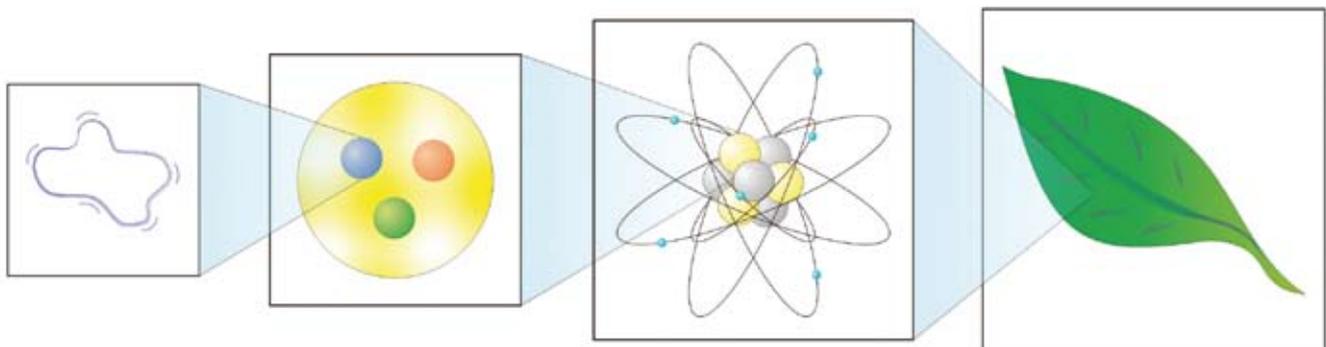
Spätestens Mitte der 1980er Jahre hatte sich zwar herausgestellt, dass in einem solchen zehndimensionalen Raum gleich fünf verschiedene Stringtheorien existieren, von denen jede einzelne unsere Welt gleich gut beschreibt. Dieser Nebeneffekt der Forschung war zunächst alles andere als erwünscht, hoffte man doch auf eine einzige Fundamentaltheorie. Im folgenden Jahrzehnt jedoch konnten Physiker das Problem beheben: Als sie ihren Modellen eine weitere Dimension hinzufügten, ließen sich die fünf Theorien zu einer einzigen, der so

genannten M-Theorie, vereinigen. Dieser bemerkenswerte Umstand ließ die Theoretiker wieder Mut schöpfen: Kann die Stringtheorie aus einem Satz fundamentaler Gleichungen vielleicht doch eindeutige Vorhersagen über unser Universum machen? Lässt sich mit ihrer Hilfe beispielsweise die Vakuumenergie berechnen und das Spektrum an Elementarteilchen beschreiben, wie wir es kennen?

Doch es kam anders – und das ist unser Wissensstand bis heute. Unsere vierdimensionale Welt lässt sich mit Hilfe einer zehndimensionalen Theorie nämlich nur dann beschreiben (und für elfdimensionale Theorien gilt Entsprechendes), wenn man sich die sechs räumlichen Extradimensionen als kompaktes, sehr kleines räumliches Gebilde vorstellt, wenn man sie also, wie Physiker sagen, kompaktifiziert. An jedem Raumzeitpunkt der vierdimensionalen Welt – entsprechend einem beliebigen Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt – »hängen« dann sechs kompakte Raumdimensionen. Sie sind zwar unbeobachtbar klein, weshalb wir sie auch nicht einfach betreten können, besitzen aber laut Stringtheorie erheblichen Einfluss. Denn je nach Art ihrer Kompaktifizierung besitzt das daraus hervorgehende vierdimensionale Universum verschieden viele unterschiedliche Elementarteilchen und wird von unterschiedlichen Fundamentalkräften regiert.

Warum existiert ausgerechnet unser Universum?

An dieser Stelle verlor die Stringtheorie ihre Eindeutigkeit. Denn wann immer eine physikalische Theorie mehr als nur eine mathematische Lösung erlaubt, muss man annehmen, dass jede davon mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit realisiert ist, sich in der Realität also tatsächlich beobachten lässt – oder erklären, warum dies eben nicht der Fall ist. Doch unerwarteterweise erwies sich eine riesige Anzahl kompaktifizierter Räume als mögliche Lösung der Stringtheorie. Mit anderen Worten: Die Theoretiker hatten in ihren mathematischen Gleichungen plötzlich eine enorme Anzahl verschiedener Universen mit jeweils un-



KRISTIN REIER

terschiedlichen Eigenschaften entdeckt. Jedes beschreibt gemäß der Stringtheorie ein so genanntes gültiges Vakuum, man sagt auch: einen zulässigen Grundzustand. Aber keines dieser Gebilde sticht besonders heraus, keine dieser Lösungen gibt uns Anlass dazu, sie zu bevorzugen. Damit fehlt uns Theoretikern ein Selektionsprinzip: Wir können nicht begründen, weshalb genau unser Universum – schließlich ist es nur eine Lösung unter vielen – real sein sollte und alle anderen nicht. Existiert also mehr als ein einziges Universum?

Leben in der Mulde

Die Gesamtheit aller Stringwelten, also aller möglichen Lösungen der mathematischen Gleichungen, bezeichnen die Physiker auch als »Landschaft« der Stringtheorie, geformt durch Berge und Anhöhen sowie Täler, Mulden und Rinnen. Diese stringtheoretische Fläche ist natürlich ein hochabstrakter Raum. Täler und Mulden entsprechen Stringwelten, die eine niedrige Vakuumenergie besitzen, während Berggipfel für Universen mit hoher potenzieller Energie stehen. Das Universum, in dem wir leben, entspräche in dieser Landschaft von Universen genau einer Mulde, einem bestimmten Grundzustand mit niedriger Vakuumenergie. Denn einen solchen niedrigen Wert haben unsere Kosmologen tatsächlich gemessen.

Die Darstellung von Lösungen einer Theorie durch eine Landschaft mit energetisch unterschiedlich hohen Gipfeln und Tälern ist nicht neu. Insbesondere auch in der Festkörperphysik haben wir es üblicherweise mit hochkomplexen Systemen zu tun. Deren Gleichungen lassen jeweils eine größere Anzahl von Lösungen zu, die alle realisiert sind oder zumindest realisiert sein können. Die verschiedenen Aggregatzustände etwa von Wasser – flüssig, fest, gasförmig – sind hierfür ein gutes Beispiel. Stringtheoretiker gehen allerdings darüber hinaus. Anders als Materialwissenschaftler, die unterschiedliche Zustände eines Festkörpers im selben Universum beschreiben, ordnen die Theoretiker die verschiedenen Aggregatzustände fundamentaler Strings nun verschiedenen Universen zu!

Besonders überrascht waren die Forscher, als sie in der Landschaft der Stringtheorie nicht nur einige wenige Mulden und Hügel entdeckten, sondern auf eine schier unermessliche Anzahl von ihnen stießen. Theoretische Abschätzungen der Anzahl solcher potenzieller Welten liefern die Größenordnung 10^{100} oder sogar 10^{1000} . Das ist weit mehr als etwa die Zahl der Atome in unserem Universum.

Zudem unterliegt die stringtheoretische Landschaft steter Veränderung. Verbindet man die Gleichungen, die zu ihr führen, mit jenen



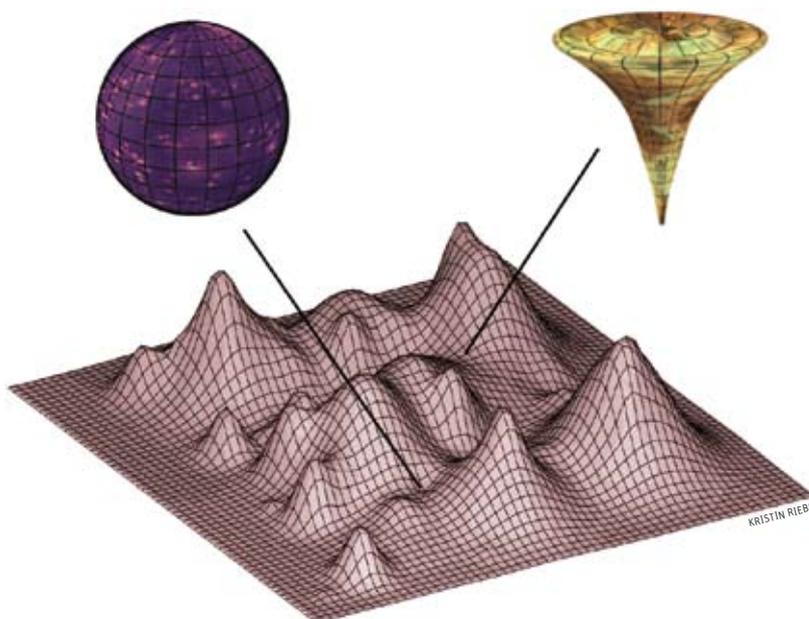
der Gravitationstheorie, erweisen sich nämlich auch spontane Übergänge als möglich. Universen können durch bestimmte Prozesse potenzielle Energie gewinnen und so aus einem Tal auf einen Hügel gelangen. Und wenn sie sich an einem Berghang befinden, streben sie üblicherweise ins nächstgelegene Tal, also in einen Zustand niedrigerer Energie. (Denn genau wie in der Alltagsphysik sind die Zustände niedriger potenzieller Energie wahrscheinlicher als solche mit hoher Energie.)

Bei einem Übergang von einem Energieniveau zum anderen aber verändert sich auch das Universum selbst – unter Umständen auf so fundamentale Weise, dass man geradezu von der Geburt eines neuen Universums sprechen kann. Möglicherweise war das, was wir als Urknall unseres Universums bezeichnen, tatsächlich nur sein Übergang von einem Zustand höherer Energie in ein energetisches Tal.

Die Suche nach einer Weltformel, die Aussagen über ein einziges Universum macht und Vorhersagen für alle unsere zukünftigen Experimente liefert, ist – so müssen wir folgern – wahrscheinlich zu naiv gewesen. Denn mit dem stringtheoretischen Bild eines Multiversums, das eine große Anzahl von Naturkonstanten und Naturgesetzen mit sich bringt, verliert die Physik zumindest einen Großteil ihrer Vorhersagekraft. So scheint die Stringtheorie alles vorherzusagen und damit letztlich nichts.

Es ist sogar sehr schwierig, in der stringtheoretischen Landschaft diejenige Lösung aufzuspüren, die unser eigenes Universum repräsentiert – also unter anderem sein Spektrum an Elementarteilchen und seine Fundamentalkräfte. Und auch wenn sich in letzter Zeit die Anzeichen dafür mehren, dass dies gelingen könnte, müssen sich Physiker dennoch fragen, ob sie überhaupt noch von einer Wissenschaft sprechen können, wenn ihre Theorie

Möglicherweise war der Urknall nur der Übergang des Universums von einem Zustand höherer Energie in ein energetisches Tal



In der Landschaft der Stringtheorie erscheinen Universen mit hoher Vakuumenergie als Hügel. Täler hingegen repräsentieren Universen mit niedriger Energie wie unser eigenes.

weder eindeutige noch überprüfbare und falsifizierbare Vorhersagen macht.

Über diese Frage brach nun vor einigen Jahren ein regelrechter Disput aus. Am heftigsten wird die Stringtheorie dafür attackiert, dass sie unüberprüfbare Aussagen über eine Unzahl von Universen macht – und auch nicht erklären kann, warum Naturkonstanten und Kraftgesetze in unserem Universum gerade so sind, wie wir sie kennen. Die Physikergemeinde zerfällt jetzt in drei Fraktionen. Eine von ihnen akzeptiert zwar die Tatsache, dass im Prinzip viele Möglichkeiten existieren, ein Universum zu modellieren, hält diese Überlegung aber für eine mathematische Spielerei. Diese Forscher suchen daher nach einem Selektionsprinzip, das unser Universum gegenüber anderen Lösungen der Stringgleichungen hervorhebt. Sie mutmaßen oder hoffen zumindest, dass ihre Theorie eines Tages eben doch erklären kann, warum unser Universum gerade so aussieht, wie wir es beobachten.

Eine andere Gruppe von Physikern lehnt die Vorstellung eines Multiversums prinzipiell ab. Sie glaubt an eine einzige real existierende Welt, die sich durch eine einzige Theorie beschreiben lässt. David Gross, Nobelpreisträger und Entdecker zweier der fünf Stringtheorien im zehndimensionalen Raum, bemerkte einmal: »The landscape idea? I hate it! Never, never, never, never give up!« (etwa: »Diese abwegige Vorstellung von einer Stringlandschaft? Ich hasse sie! Gebt euch niemals damit zufrieden!«).

Ein dritter Teil der Physiker akzeptiert schließlich die Vorstellung, dass eine Unmenge von Parallelwelten physikalisch realisiert ist, also tatsächlich existiert. Sie begründen ihre Position mit dem anthropischen Prinzip. Dieses war ursprünglich von Robert Dicke und

Brandon Carter in die Kosmologie eingeführt worden, um zu erklären, warum intelligentes Leben im Universum entstand, obwohl das extrem unwahrscheinlich zu sein scheint. Es besagt in etwa, dass das von uns beobachtete Universum für die Entwicklung intelligenten Lebens geeignet sein muss, da wir sonst nicht existierten, um es zu beobachten. Eine Variante dieses Prinzips besagt nun, dass durchaus viele Welten existieren dürfen, wir uns aber nicht wundern sollten, in genau unserem Universum zu leben. Denn ebendieses liefert die Voraussetzungen für intelligentes Leben oder, abstrakter ausgedrückt, für das Vorhandensein von Beobachtern.

Viele Physiker lehnen das anthropische Prinzip ab. Es besitze keine Vorhersagekraft, weil sich aus ihm keine Zahlenwerte für konkrete physikalische Größen ableiten lassen – es liefert also keine Erklärung für irgendeine Eigenschaft der Natur. Stringtheoretiker sollten es daher nicht missbrauchen, um ihre vielen Lösungen zu rechtfertigen, sondern besser eine einzige Lösung produzieren – ein einziges Universum, das aussieht wie das unsere.

Erklärung eines scheinbaren Wunders

Meines Erachtens ist das anthropische Prinzip jedoch mehr als nur eine philosophische Spitzfindigkeit oder gar eine Ausrede. In der Tat löst es im Rahmen der Stringtheorie zwei alte Probleme der Physik: die Frage, warum unsere Naturgesetze gerade die Form haben, die wir beobachten, und die Frage, warum unsere Naturkonstanten so fein darauf abgestimmt zu sein scheinen, dass sie Leben ermöglichen, wie wir es kennen. In beiden Fällen stützt sich das anthropische Prinzip auf das Gesetz der großen Zahlen: In einer hinreichend großen Stichprobe muss alles, was möglich ist, irgendwo realisiert sein. So ist möglicherweise auch jede Form von Naturgesetzen in jeweils einem Universum verwirklicht – aber Beobachter existieren nur in einem lebensfreundlichen Universum.

Im Fall der Naturkonstanten erweist sich diese Denkweise als besonders mächtig. Das anthropische Prinzip ist angesichts der Vorstellung eines Multiversums in der Lage, die von einigen Kosmologen behauptete Feinabstimmung des Universums zu erklären – das scheinbare »Wunder« also, dass schon leicht veränderte Naturkonstanten die Entstehung von Leben verhindert hätten. In der großen Menge von Kombinationen, die im Multiversum existieren, muss auch unser »Konstantenfenster« realisiert sein – wir brauchen uns also nicht zu wundern, gerade dieses zu beobachten.

Anders gesagt: Fische leben nun mal im Wasser. Und noch einmal anders gesagt: Unser

Konstantenfenster wird nun statistisch notwendig. Das erhöht auch die Wissenschaftlichkeit dieses Gedankengangs, denn es befreit unseren Kosmos von dem Makel, ein – aus welchen Gründen auch immer – fein abgestimmtes Kuriosum zu sein.

Trotz allem bleibt jedes Argumentieren mit dem anthropischen Prinzip insofern unbefriedigend, als es den Rückzug von einer Theorie bedeutet, die klare Vorhersagen und Erklärungen für unsere Welt liefern könnte. Doch das muss nicht immer so bleiben, zumal sich die Physiker letzten Endes doch darin einig sind, dass jede Theorie zumindest in Teilen einer Bestätigung bedarf. Um dem Dilemma der vielen Kompaktifizierungsmöglichkeiten wieder zu entkommen, verfolgen Stringtheoretiker in den letzten Jahren eine Erfolg versprechende neue Strategie. Sie betrachten Klassen von Stringkompaktifizierungen nach vier Raumzeitdimensionen, um herauszufinden, ob sie in unserem Sinn »gute« physikalische Eigenschaften besitzen.

Insbesondere überprüfen die Forscher, ob sie das Standardmodell der Teilchenphysik enthalten oder die kosmische Inflation, also die explosionsartige Ausdehnung des jungen Universums kurz nach dem Urknall. Im zweiten Schritt untersuchen sie dann, ob diese Kompaktifizierungen gemeinsame und universelle Eigenschaften besitzen, um neue Vorhersagen abzuleiten, die man in Zukunft experimentell überprüfen kann.

Für eine große Klasse von Stringkompaktifizierungen, die so genannten Intersecting-Brane-Modelle, scheint dies tatsächlich schon in Reichweite. Wie jeder anderen Variante der Stringtheorie auch liegen ihnen schwingende Strings zu Grunde. In diesen Modellen wird die Gravitationswechselwirkung durch Strings vermittelt, deren Anfang und Ende zusammengefügt sind, die also geschlossene Ringe bilden. Die anderen Fundamentalkräfte darin – wie etwa die elektromagnetische Kraft – rühren hingegen von offenen Strings her. Die Enden dieser offenen Strings liegen auf so genannten Branen, auf höherdimensionalen Ebenen, die sich in den Extradimensionen schneiden und miteinander wechselwirken.

Intersecting-Brane-Modelle sind sehr gut geeignet, das Standardmodell der Elementarteilchen zu reproduzieren. Insbesondere erlauben sie verblüffende Vorhersagen für die anstehenden Experimente am Teilchenbeschleuniger LHC (Large Hadron Collider) in Genf. Voraussetzung dafür ist, dass die kompakten Extradimensionen, die senkrecht zu den sich schneidenden Branen liegen, sich durch einen relativ großen Raum beschreiben lassen. Dieses Szenario der großen Extradimensionen, die ei-

nen (höherdimensionalen) Durchmesser von fast einem tausendstel Millimeter erreichen, haben Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos und Georgi Dvali entwickelt. Trifft es zu, müssten die am LHC erreichbaren Energien ausreichen, um neue Stringteilchen zu erzeugen. Weil sie sich in seinen Detektoren auch nachweisen ließen, wäre zumindest diese Klasse von Stringmodellen überprüfbar und falsifizierbar. Intersecting-Brane-Modelle stehen zudem in engem Zusammenhang mit der möglichen Erzeugung Schwarzer Minilöcher am LHC. Das eröffnet weitere Chancen für ihre Überprüfung.

Auch Kosmologen können die Stringtheorie testen

Damit die LHC-Experimente tatsächlich zu diesen Resultaten führen, müssen zugegebenermaßen einige optimistische Annahmen zutreffen, allen voran die Existenz großer Extradimensionen. Daher dürfen entsprechende Überlegungen bislang auch nur als Spekulation gelten. Doch auch Kosmologen können die Stringtheorie testen. Sie könnten unterschiedliche Stringkompaktifizierungen mit den neuen Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung vergleichen – denn in der Theorie hat die Art der Kompaktifizierung einen Einfluss auf deren Eigenschaften. Neue Erkenntnisse über Dunkle Materie, Dunkle Energie oder Gravitationswellen versprechen zudem weitere Optionen, die Stringtheorie experimentellen Überprüfungen zu unterziehen.

Weil einige Aussagen der Stringtheorie also doch überprüfbar sind und das anthropische Prinzip gerade auch im Fall der Naturkonstanten zu mehr Wissenschaftlichkeit führt, bin ich überzeugt, dass die heutige theoretische Physik immer noch eine exakte Naturwissenschaft darstellt. Sie stellt physikalische Fragen, sucht sie zu beantworten und hat den Kontakt zum Experiment keineswegs verloren – bleibt also in weiten Bereichen falsifizierbar. Außerdem hat sie etwa mit der Schleifenquantengravitation eine Konkurrentin, gegenüber der sie weiterhin ihre Vorzüge beweisen muss.

Wer sie allerdings akzeptiert, kommt um den Gedanken nicht herum, dass die Theorie des Multiversums – nach Kopernikus und Darwin – dem Menschen vielleicht sogar seine Sonderrolle wieder zurückgibt. Denn ihr zufolge ist er nicht nur glücklicher Sprössling eines ansonsten wohl weithin unbelebten Universums, sondern stellt vielleicht sogar in einer ganzen Landschaft von Universen den extrem unwahrscheinlichen Ausnahmefall eines intelligenten Beobachters dar. Und der ließe das Phänomen des Lebens wohl noch kostbarer erscheinen, als es ohnehin schon ist. ◀



Dieter Lust ist Professor für Mathematische Physik und Stringtheorie an der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU), Direktor am Max-Planck-Institut für Physik sowie Sprecher des »Elite Master Course Theoretical and Mathematical Physics« an der LMU/TU München. Im Jahr 2000 erhielt er den Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft und wurde in die Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften aufgenommen. Zu seinen Arbeitsgebieten gehören die Stringtheorie sowie Probleme von Eich- und Gravitationstheorien.

Mitarbeit: **Vera Spillner**. Sie studierte Theoretische Physik in Heidelberg, Minneapolis (USA) und Berlin und promoviert an der Universität Bonn in Philosophie.

Dvali, G.: Die geheimen Wege der Gravitation. In: Spektrum der Wissenschaft Dossier 1/2009, Parallelwelten, S. 42–49.

Lüst, D. et al.: The LHC String Hunter's Companion. In: Nuclear Physics B 808(1–2), S. 1–52, 11. Februar 2009.

Lüst, D.: The Landscape of String Theory. In: Fortschritte der Physik 56(7–9), S. 694–722, August 2008.

Lüst, D.: Intersecting Brane Worlds: A Path to the Standard Model? In: Classical and Quantum Gravity 21, S. 1399–1424, 20. April 2004.

Nicolai, H.: Auf dem Weg zur Physik des 21. Jahrhunderts. In: Spektrum der Wissenschaft 11/2008, S. 28–37.

Smolin, L.: Die Zukunft der Physik: Probleme der String-Theorie und wie es weiter geht. DVA, München 2009.

Vilenkin, A.: Many Worlds in One: The Search for other Universes. Hill and Wang, New York 2006.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/987527.