

Neues von den Superstrings

Die Suche nach den Fundamenten des Universums

VON STEFAN THEISEN UND MARKUS PÖSSEL

Die Stringtheorie versucht die fundamentalen Kräfte, die in unserem Universum wirken, vereinheitlicht zu beschreiben: die Gravitation und die Kräfte zwischen den Elementarteilchen. Die bald zu erwartende Inbetriebnahme von Gravitationswellendetektoren und leistungsfähigen Teilchenbeschleunigern könnte eine erste experimentelle Überprüfung der Theorie ermöglichen.

Was geschieht im Inneren eines Schwarzen Lochs, wo Materie unvorstellbar dicht zusammengepresst wird? Welche physikalischen Bedingungen herrschten zur Zeit des superdichten Anfangszustands, des Urknalls, aus dem unser heutiges Weltall gemäß den gängigen kosmologischen Modellen hervorging?

Um solche extremen Situationen angemessen zu beschreiben, bedarf es einer Theorie der Quantengravitation, welche die beiden Hauptsäulen der heutigen Physik vereinigt: die Quantentheorie als grundlegende Beschreibung der Mikrowelt und Einsteins Gravitationstheorie,

die Allgemeine Relativitätstheorie. Doch auch neunzig Jahre nach Erscheinen der Fachartikel, in denen Einstein seine Gravitationstheorie vorstellte, und rund sechzig Jahre nach Vollendung der Quantentheorie, ist es den theoretischen Physikern noch nicht gelungen, eine vollständige, in sich schlüssige Theorie der Quantengravitation zu formulieren.

Freilich gibt es hochinteressante Kandidaten für eine derartige Theorie. Der aussichtsreichste und am weitesten entwickelte Ansatz ist die Stringtheorie. Sie erhebt den Anspruch, eine einheitliche quantentheoretische Beschreibung aller Grundkräfte und Materieteilchen un-

serer Welt zu bieten, in der die Gravitation nicht nur enthalten, sondern sogar ein notwendiger Bestandteil ist (siehe SuW-Special Gravitation, 2005, S. 77). Gerade in den letzten Jahren eröffnete die Stringtheorie zahlreiche interessante Denkmöglichkeiten zum Aufbau und zur Grundstruktur des Weltalls, die wir im Folgenden kurz vorstellen.

Von Teilchen zu Strings

Die Ausgangsidee der Stringtheorie führt unmittelbar in die Welt der kleinsten Teilchen. Die vielleicht wichtigste Erkenntnis der modernen Physik besteht darin, dass sich die gesamte Materievielfalt, die wir um uns herum wahrnehmen, aus einer vergleichsweise kleinen Anzahl von Grundbausteinen zusammensetzt. Atome bestehen aus Atomkernen und Elektronen, die durch die elektromagnetische Wechselwirkung an die Kerne gebunden sind. Die Kerne wiederum bestehen aus Protonen und Neutronen, welche ihrerseits aus fundamentalen Teilchen zusammengesetzt sind, die Quarks heißen.

wis

Wissenschaft in die Schulen!

Didaktisches Material zu diesem Beitrag:
www.wissenschaft-schulen.de



▲ Abb. 1: In der Stringtheorie spielen mehrdimensionale geometrische Formen mit »aufgerollten« Extradimensionen eine wichtige Rolle. Das Beispiel zeigt Gebilde, zu denen höherdimensionale Räume aufgerollt sein können, von links nach rechts: Eine Kugel, einen Torus, und einen Schnitt durch ein sechsdimensionales Gebilde namens Quintik.

Quarks, sowie Elektronen und ihnen verwandte Teilchen, sind den Experimenten der Elementarteilchenphysiker zufolge die Bausteine aller Materie. Zwischen ihnen wirken nur vier Grundkräfte: der Elektromagnetismus, der beispielsweise Elektronen an Atomkerne bindet, die starke Kernkraft, welche die Quarks zu Protonen und Neutronen zusammenbindet, die schwache Kernkraft, die für bestimmte radioaktive Zerfälle verantwortlich ist, und die universell wirkende Gravitation. Dabei kommt die Wechselwirkung zwischen den Teilchen der Materie durch den Austausch von so genannten Eichbosonen zustande. Für die elektromagnetischen Kräfte sind das Photonen, für die starke Kernkraft die Gluonen, für die schwache Kernkraft die W- und Z-Bosonen; für die Gravitation kann man hypothetische Gravitonen postulieren. Die Kräfte werden so letztlich auf fundamentale Teilchen zurückgeführt.

Von der Gravitation abgesehen, lassen sich die Materieteilchen und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte im Einklang mit

den Gesetzen der Quantentheorie und der speziellen Relativitätstheorie beschreiben. Das Ergebnis ist das Standardmodell der Elementarteilchenphysik (siehe Kasten: »Standardmodell und Supersymmetrie« auf Seite 44). In der Sprache der theoretischen Physiker ist dieses Modell ein spezielles Beispiel einer so genannten Quantenfeldtheorie.

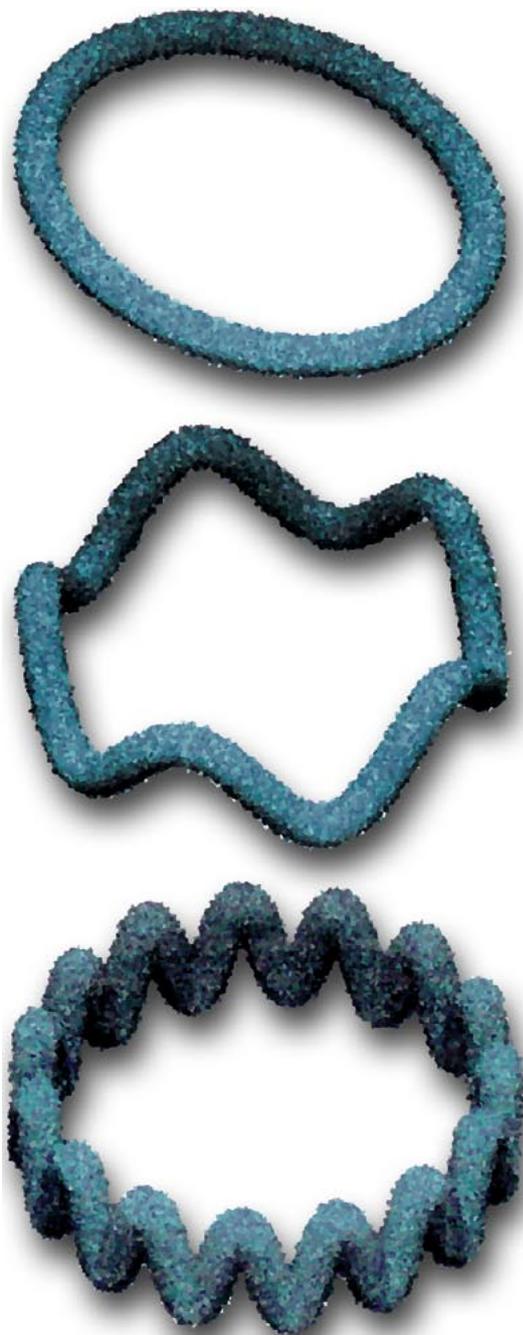
Das Standardmodell enthält rund zwei Dutzend freier Parameter, beispielsweise die Massen der Elementarteilchen und die Stärken ihrer Wechselwirkungen. Ihre Werte folgen nicht aus dem Modell selbst, sondern müssen experimentell bestimmt werden. Sind die Parameter festgelegt, so ergeben sich aus dem Standardmodell solide quantitative Vorhersagen über den Ausgang beliebig vieler weiterer Experimente. Bisher wurden noch keine Abweichungen von den Vorhersagen des Standardmodells gemessen.

Der Versuch, die Quantentheorie mit der Allgemeinen Relativitätstheorie in Einklang zu bringen, indem man die Gravitation in der selben Weise wie die anderen Kräfte in das Modell einbaut, schlägt allerdings fehl – in dem resultierenden Modell nehmen bestimmte Größen unendliche Werte an, die sich nicht, wie bei den anderen Wechselwirkungen, mathematisch »zähmen« lassen. Dadurch verliert das Modell seine Vorhersagekraft: Ehe auch nur eine einzige Vorhersage möglich wäre, so zeigt sich, müssten die Physiker unendlich viele Parameter experimentell bestimmen!

Schwingende Saiten und die Vielfalt der Elementarteilchen

Bei genauerer Untersuchung lassen sich die hinderlichen Unendlichkeiten darauf zurückführen, dass das Standardmodell von der Vorstellung punktförmiger Elementarteilchen ausgeht. Eine Lösung ist der Übergang zu eindimensionalen Grundbausteinen, minimal ausgedehnten Strings, einer Art winziger Saiten – die Grundidee der Stringtheorie.

Ein und dieselbe Saite kann auf viele unterschiedliche Arten schwingen. Eine Kernidee der Stringtheorie besteht darin, solch eine Vielfalt von Schwingungs-



▲ Abb. 2: Die schematische Darstellung zeigt eine Stringschleife im Grundzustand (ganz oben) und in zwei angeregten Zuständen. In der Stringtheorie entsprechen verschiedene Schwingungszustände verschiedenen Elementarteilchen.

»Sterne und Weltraum« im Physik-Unterricht **wis**

Zu diesem Beitrag stehen Ihnen auf unserer Internetseite unter der URL www.wissenschaft-schulen.de didaktische Materialien zum kostenlosen Herunterladen zur Verfügung. Anhand von praktischen Unterrichtsbeispielen zeigen wir, welche Stellen dieses Beitrags, beispielsweise im niedersächsischen Lehr-

plan, Anknüpfungspunkte zum Einstieg in die Stringtheorie bieten.

Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Donaueschingen durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig gefördert.

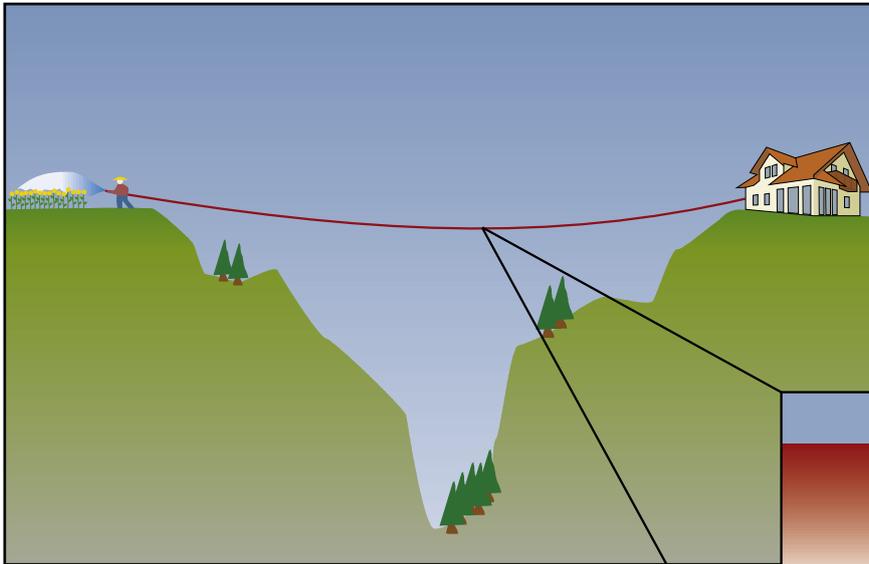


Abb. 3: Aus großer Entfernung betrachtet, erscheint ein Gartenschlauch wie eine Linie, also eindimensional. Vergrößert erscheint er jedoch ausgedehnt. Eine Ameise, die sich auf der Oberfläche des Schlauchs befindet, kann ihn umrunden oder sich entlang seiner Achse bewegen. Der ihr zur Verfügung stehende »Raum« ist also zweidimensional.

zuständen zur Erklärung der Vielfalt der Elementarteilchen heranzuziehen: Nach dieser Auffassung sind die verschiedenen Teilchen des Standardmodells verschiedene Schwingungszustände ein und derselben Sorte fundamentaler Strings!

Allerdings sind die Strings so extrem kurz, dass sie in heutigen Experimenten wie punktförmige Teilchen erscheinen – aber eben, je nach Schwingungszustand, als punktförmige Teilchen mit unterschiedlichen Eigenschaften.

Eine Unterscheidung gilt es noch zu treffen: Je nachdem, ob ein String zwei offene Enden aufweist oder aber eine in sich geschlossene Schlaufe bildet, spricht man von offenen oder geschlossenen Strings, wobei eine Umwandlung möglich ist: Aus einem offenen String, dessen Enden zusammentreffen, kann ein geschlossener String entstehen, und ein geschlos-

sener String kann zerreißen und sich dabei öffnen.

Nicht nur die Materieteilchen, sondern auch die Eichbosonen, welche die verschiedenen Kräfte zwischen den Teilchen vermitteln, sind Schwingungszustände von Strings. Das gilt insbesondere auch für das Graviton, das Austauschteilchen der Gravitation, das einem der Schwingungszustände eines geschlossenen Strings entspricht. Wie auch immer man eine konsistente Stringtheorie formuliert, dieser besondere Schwingungszustand wird

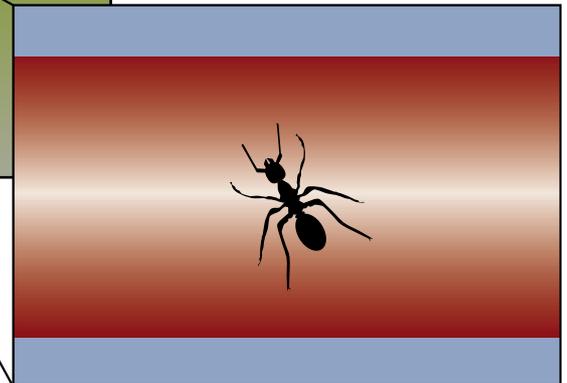
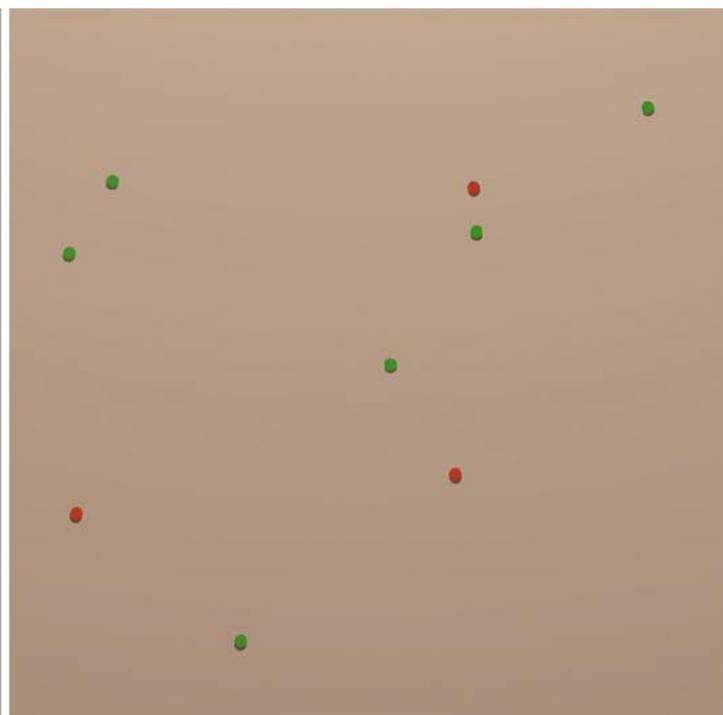
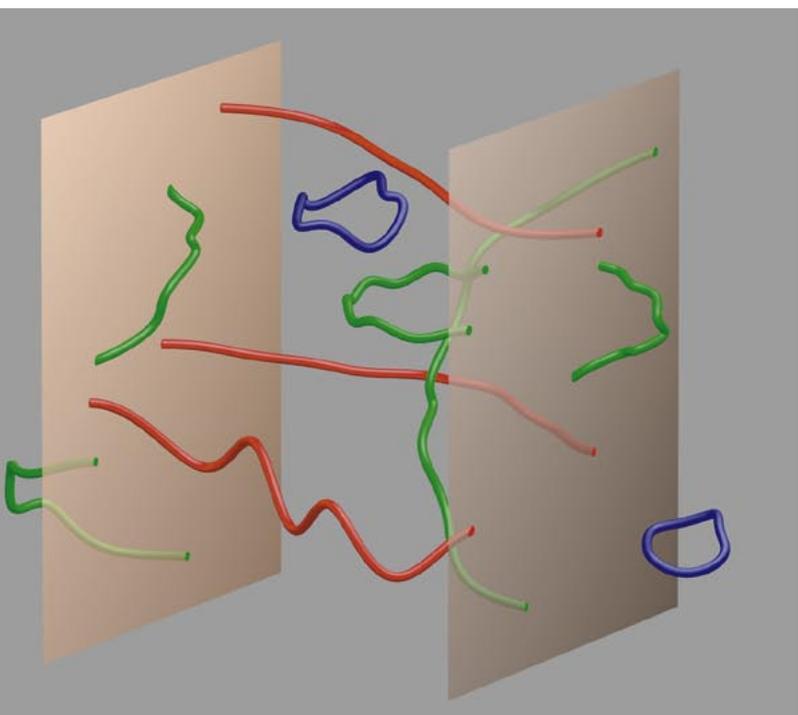


Abb. 4: Die links dargestellten Ebenen entsprechen dreidimensionalen Branen in einem höherdimensionalen Raum. Zwischen den Branen befinden sich teils offene, teils geschlossene Strings. Rechts ist dargestellt, was der Wahrnehmung eines auf der rechten Ebene gefangenen Beobachters zugänglich ist. Von den Strings sieht er nur die auf der Ebene liegenden Endpunkte, die ihm als punktförmige Teilchen erscheinen.



immer dabei sein – Gravitation ist eine zwangsläufige Konsequenz einer String-Beschreibung der Welt. Damit ist in der Stringtheorie die Idee der Vereinheitlichung aller Elementarteilchen und aller Wechselwirkungen auf sehr ökonomische Weise realisiert.

Freilich zeigen genauere Betrachtungen, dass ein Universum der Strings nicht nur beeindruckende Erklärungsmöglichkeiten für die Vielfalt der Elementarteilchen bietet, sondern auch einige höchst ungewöhnliche Eigenschaften aufweist. Die erste wird dem Leser recht harmlos erscheinen: Die Stringtheorie geht mit einer abstrakten Eigenschaft namens Supersymmetrie einher – daher der Name »Superstring«. In der Praxis bedeutet sie, dass zu jedem der bekannten Elementarteilchen ein noch nicht nachgewiesenes Partnerteilchen existieren müsste.

Die zweite Eigenheit des Stringuniversums dagegen rüttelt an einer scheinbaren Selbstverständlichkeit: Um Strings konsistent zu beschreiben, bedarf unser Kosmos nicht nur der üblichen drei, sondern muss neun oder sogar zehn Raumdimensionen aufweisen! Allerdings gibt es Möglichkeiten, wie ein solcher höherdimensionaler Raum Bewohnern wie uns als dreidimensional erscheinen kann – etwa, wenn die Extradimensionen gewissermaßen »eng aufgerollt« sind: Genau so, wie wir einen sehr dünnen Schlauch effektiv als eindimensionales Objekt behandeln (uns interessiert in der Regel vor allem seine Länge) wäre ein Universum, von dessen zehn Dimensionen sechs winzig klein eingerollt sind, für seine Bewohner effektiv vierdimensional (drei Raumrichtungen zuzüglich der Zeitrichtung). Es gibt allerdings noch eine weitere Möglichkeit für die Extradimensionen, und diese bringt uns direkt zu einer überraschenden Konsequenz der Stringtheorie, mit der die Physiker ab Mitte der 1990er Jahre konfrontiert wurden.

Eine eingebettete Welt

Es gibt mehrere Möglichkeiten, einen offenen String physikalisch sinnvoll zu beschreiben. Eine davon schränkt die Bewegungsfreiheit seiner Endpunkte ein und postuliert, die Enden eines bestimmten Strings lägen alle auf einer zweidimensionalen Fläche, wie in Abb. 4 angedeutet. Bei genauerer Betrachtung wird eine solche Fläche selbst zu einem dynamischen Objekt, dem man Energie und Impuls zuschreiben kann. Dabei ist es durchaus möglich, mehr als eine derartige Fläche einzuführen, und die Endpunkte offener Strings können auf unterschiedlichen Flächen liegen.

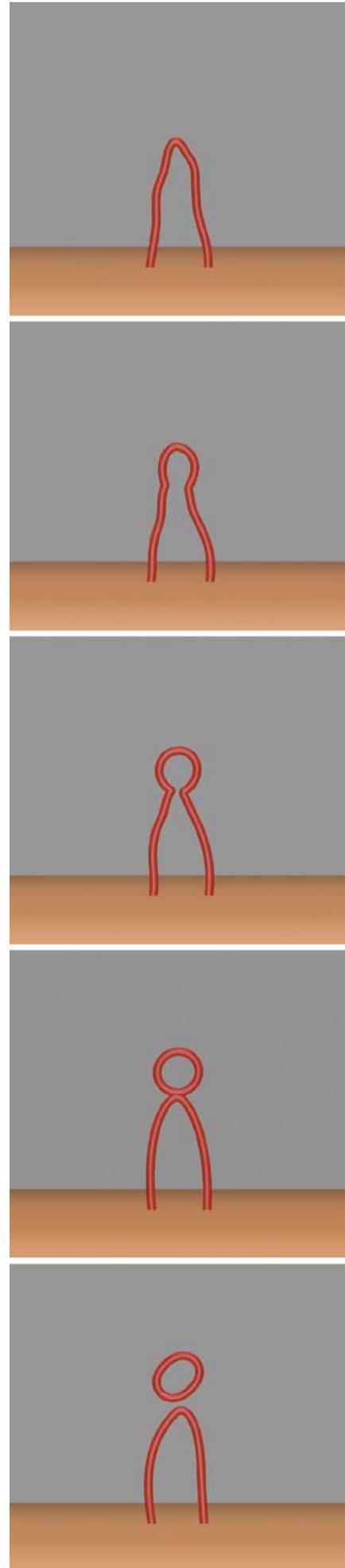
In Anlehnung an zweidimensionale Membranen heißen solche Endpunktflächen Branen. Sie müssen nicht zweidimensional sein, sondern können jede Dimensionszahl bis einschließlich neun Dimensionen aufweisen. Ab Mitte der 1990er Jahre erkannten die Stringtheoretiker, dass sie sich nicht auf die eindimensionalen fundamentalen Strings beschränken durften, sondern dass eine vollständige Stringtheorie notwendigerweise weitere ausgedehnte Objekte enthält, eben solche Branen.

Das Modell der Branen ermöglichte spannende neue Antworten auf die Frage, warum der gewohnte Raum drei- und nicht neun- oder zehndimensional ist. Betrachten wir Abbildung 4. Im rechten Abbildungsteil ist eine Ebene zu sehen, die den dreidimensionalen Raum repräsentieren soll. Die farbigen Punkte darin mögen Elementarteilchen entsprechen, die sich in diesem Raum bewegen.

Aus der Sicht der Stringtheorie könnte diese Welt eine Konsequenz des in der Abbildung 4 links angedeuteten höherdimensionalen Szenarios sein: Die Ebene ist dort eine Bran im höherdimensionalen Raum, und die Elementarteilchen entsprechen den Endpunkten von Strings, welche sich von einem Ort auf der Bran zu einem anderen Ort erstrecken, oder aber von einem Ort auf der Bran zu einer anderen Bran. Das Ergebnis wäre eine so genannte Branwelt. Die Bran entspräche im Falle unserer Welt dem dreidimensionalen Raum, in dem sich die Enden der Elementarteilchenstrings frei bewegen und miteinander interagieren können. Auch wir Weltenbewohner, die wir aus Atomen und damit letztlich aus Elementarteilchen bestehen, könnten uns nur in den gewohnten drei Dimensionen unserer Branwelt – in der Abbildung: auf einer der Ebenen – bewegen, nicht aber in den höherdimensionalen Raum hinaus.

Die Kraftteilchen des Elektromagnetismus und der Kernkräfte würden ebenfalls den Enden von Strings entsprechen. Auch sie könnten nur innerhalb unserer dreidimensionalen Weltbran wirken. Damit ist zugleich ausgeschlossen, dass wir mit Hilfe von Licht oder anderer elektromagnetischer Strahlung in den höherdimensionalen Raum »hinaussehen« können.

► Abb. 5: Von offenen Strings können sich geschlossene Strings ablösen. Diese vermitteln die Gravitationskraft, über welche die Strings – und damit indirekt auch die Branen, auf denen sie enden – in Wechselwirkung treten können.



Eine Art von String dagegen ließe sich nicht auf unsere Bran bannen, nämlich geschlossene Strings – entsprechend den Austauschteilchen der Gravitation. Geschlossene Strings haben per definitionem keine Enden, die an Branen kleben könnten; sie können sich auf der Bran, aber auch im umgebenden höherdimensionalen Raum bewegen. Auch die Gravitation ist damit universell und nicht auf unsere Weltbran beschränkt. Wie in Abbildung 5 dargestellt, können offene Strings über die Gravitation in Wechselwirkung treten, indem sich von ihnen geschlossene Strings abschnüren – Gravitonen, die dann in einer Umkehrung des Abschnürungsprozesses an andere Strings andocken können.

Nachweisbare Extradimensionen?

Die Universalität der Gravitation hat entscheidende Konsequenzen, denn daraus ergeben sich Möglichkeiten, das Vorhandensein der zusätzlichen Dimensionen experimentell nachzuweisen. Die Details hängen freilich davon ab, welches der verschiedenen möglichen Stringmodelle für eine Branwelt man heranzieht.

Das einfachste Szenario einer im unendlich ausgedehnten höherdimensionalen Raum eingebetteten dreidimensionalen Branwelt lässt sich direkt falsifizieren. Vereinfacht gesprochen: Gravitation, die in neun oder zehn Raumdimensionen hinein wirkt, verliert mit zunehmendem Abstand von der Masse schneller an Zugkraft als Gravitation, die nur in drei Raumdimensionen hinein wirkt. Dass die Gravitationskraft in unserer Welt mit dem Quadrat des Abstandes schwächer wird, lässt sich beispielsweise anhand der Bahnen der Planeten um die Sonne nachweisen und schließt die Existenz einfacher, unendlich ausgedehnter Zusatzdimensionen aus.

Allerdings gibt es Modelle, welche die Extradimensionen durchaus mit der gemessenen Abstandsabhängigkeit der Gravitation vereinbaren. Wir hatten bereits aufgerollte Extradimensionen angesprochen, bei denen die zusätzliche Dimensionen nicht unendlich ausgedehnt sind wie eine Gerade, sondern in sich geschlossen wie eine Kreislinie. Sind die Extradimensionen so oder in anderer Weise aufgerollt, zeigt die Gravitationskraft ihre normale Abstandsabhängigkeit – lediglich bei Abständen, die kleiner sind als die Ausdehnung der Dimension, kommt es zu Abweichungen. Solche Abweichungen nachzuweisen ist eine Herausforderung für Experimentatoren, da die Gravitationskraft sehr viel schwächer ist als beispielsweise die elektrostatische Kraft und sich im Gegensatz zu dieser auch nicht abschirmen lässt. Immerhin

konnten die Physiker bislang die Abstandsabhängigkeit zumindest für Distanzen von mehr als etwa einem zehntel Millimeter untersuchen – eine Obergrenze für die Ausdehnung möglicher zusätzlicher Dimensionen, da bei den bisherigen Versuchen keine Abweichungen gefunden wurden.

Auch in Experimenten mit Beschleunigern, in denen Elementarteilchen bei hohen Energien aufeinander prallen, kann sich die Existenz von Extradimensionen bemerkbar machen – etwa durch das Auftreten bestimmter neuer Teilchensorten mit charakteristischen Eigenschaften, oder auch durch das Entweichen von Energie in die Extradimensionen. Eventuell könnte ein Teilchenbeschleuniger sogar kurzlebige Miniaturausgaben Schwarzer Löcher erzeugen – als Hinweis darauf, dass unsere Welt eine bestimmte Variante ausgedehnter Extradimensionen besitzt. So phantastisch dies klingen mag, es ist nicht auszuschließen, dass die Experimente, die ab Ende 2007 am neuen Teilchenbeschleuniger LHC (Large Hadron Collider, Abb. 6) am Forschungszentrum CERN bei Genf durchgeführt werden, zur Entdeckung neuer Dimensionen führen!

Andere Modelle für Branwelten, etwa das von den Physikern Lisa Randall und Raman Sundrum entworfene Szenario, zeigen, dass selbst unendlich ausgedehnte Extradimensionen nicht im Widerspruch zur Erfahrung stehen müssen. Sie enthalten einen Mechanismus, der die Kraftlinien der Gravitation, die sich a priori in alle Raumdimensionen hinein erstrecken, so verbiegt, dass sie immer in der Nähe der Bran verlaufen. Eine gleichmäßige Ausbreitung in alle vorhandenen Raumdimensionen würde zu der erwähnten veränderten Abstandsabhängigkeit der Gravitation führen; bleiben die Feldlinien nahe der Bran, dann verhält sich die Gravitation dagegen so wie im dreidimensionalen Raum. Solche Modelle werden jedoch sehr schwer experimentell zu bestätigen oder zu widerlegen sein.

Urkollision statt Urknall?

Ist unsere Welt tatsächlich auf einer Bran angesiedelt, die sich durch einen höherdimensionalen Raum bewegt, dann ist vorstellbar, dass es noch weitere solcher Branwelten gibt – nicht unbedingt mit der gleichen Anzahl von Dimensionen wie unsere eigene Branwelt, und möglicherweise mit völlig anderen Teilchen- und Wechselwirkungsarten.

Was wie Science Fiction klingt, könnte für unsere Theorien von der Entstehung des Universums entscheidende Konsequenzen haben. Einige Eigenschaften unserer Welt lassen sich in der heutigen Kosmologie nur durch die Annahme erklären,

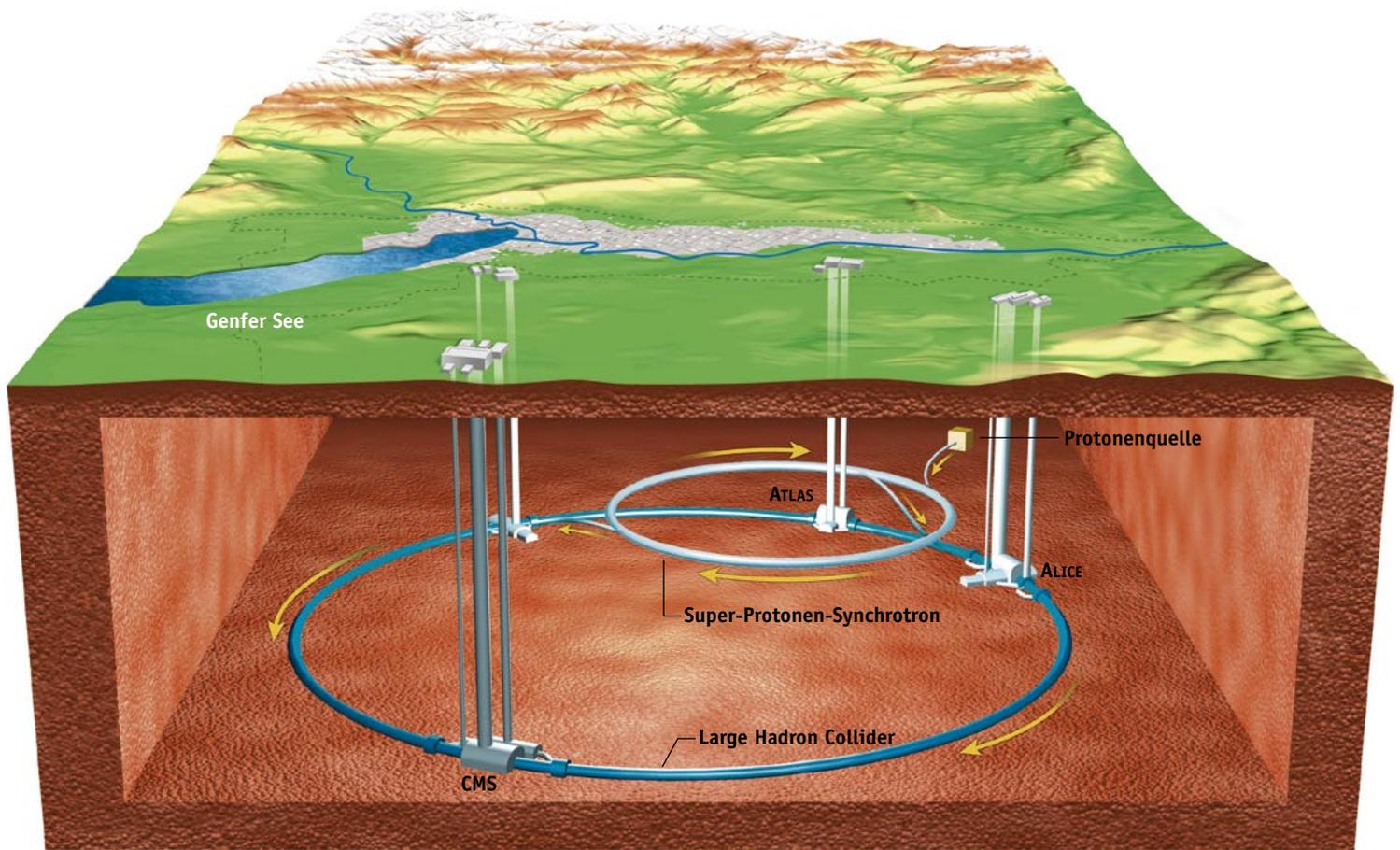


Abb. 6: Der am CERN nahe Genf entstehende Large Hadron Collider (engl.: Großer Hadronenbeschleuniger, LHC) ist ein unterirdischer Ringbeschleuniger mit einem Umfang von 27 Kilometern. Mit den Experimenten CMS (Compact Muon Solenoid) sowie ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) sollen Protonenkollisionen beobachtet werden – Beobachtungen, die unter anderem zum Nachweis supersymmetrischer Partnerteilchen führen könnten. Auch schwere Atomkerne kann man im LHC zusammenstoßen lassen. Das Experiment ALICE (A Large Ion Collider Experiment) ist dafür ausgelegt, das bei solchen Kollisionen entstehende Quark-Gluon-Plasma zu beobachten, welches der im frühen Kosmos vorhandenen Materie ähnelt.

das All habe kurz nach dem Urknall eine so genannte Inflationsphase exponentiell beschleunigter Ausdehnung durchlaufen. Insbesondere lässt sich nur so verstehen, warum der elektromagnetische Nachhall des Urknalls, die kosmische Hintergrundstrahlung, überall am Himmel die gleichen Eigenschaften aufweist. Die ersten direkten Belege für das Inflationsszenario lieferten denn auch winzige Fluktuationen in der Temperatur der Hintergrundstrahlung, die der NASA-Satellit WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) mit großer Genauigkeit vermessen hat (Abb. 7). Eine frühere, gröbere Kartierung dieser Fluktuationen mit dem Satelliten COBE (Cosmic Background Explorer) wurde 2006 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet (SuW 12/2006, S. 19).

Die kartierte Strahlung wurde etwa 400 000 Jahre nach dem Urknall im optischen und infraroten Wellenlängenbereich freigesetzt und breitete sich während der folgenden rund 14 Milliarden Jahre frei im expandierenden Kosmos aus. Dabei wurde die Wellenlänge dieses Lichtes um das Tausendfache gedehnt, sodass es heute vorzugsweise im Mikrowellenbereich zu beobachten ist. Die Karte in Abbildung 7 zeigt, wie die Temperatur je nach Himmelsrichtung um maximal einige Zehntausendstel vom Mittelwert abweicht. Die Analyse dieser Fluktuationen liefert einen entscheidenden Beitrag zur genauen Bestimmung der Werte jener Parameter, welche die Struktur des Kosmos bestimmen (siehe SuW 4/2003, S. 20).

In einem höherdimensionalen, von Branen bevölkerten Raum gibt es eine Reihe von Möglichkeiten, wie es zu einer solchen Inflationsphase auf unserer Branwelt gekommen sein könnte. Fliegen



beispielsweise im Raum neben unserer eigenen Bran zwei andere Branen mit bestimmten Eigenschaften aufeinander zu, so erzeugt das auf unserer Weltbran eine inflationäre Expansion. Stoßen diese beiden Branen zusammen, dann vernichten sie sich zu purer Energie – genau wie sich in den Experimenten der Teilchenphysiker ein Teilchen und das dazugehörige Antiteilchen vernichten können. Diese Energie könnte am Ende der Inflationsphase gerade jene Elementarteilchen erzeugen, die wir heute noch auf unserer Weltbran vorfinden.

Nachweismöglichkeiten: Strings und ihr Peitschenknall

Eine weitere Konsequenz des Zusammenstoßes der erwähnten Branen liegt darin, dass sich auch zu diesem (derzeit noch sehr spekulativen) kosmologischen Szenario in naher Zukunft handfeste Beobachtungsdaten gewinnen lassen könnten: Bei einer Kollision entstehen Strings, die makroskopische Ausmaße erreichen können. Das Konzept solcher »kosmischen Strings«, die sich Sekundenbruchteile nach dem Urknall gebildet haben sollen, kennen die Astrophysiker bereits seit Jahrzehnten; die Existenz extrem dünner, langer Fäden, die selbst im Vergleich mit Atomen mikroskopisch kleinen Durchmesser aufweisen, deren Längen jedoch kosmologische Maßstäbe erreichen können. Allerdings hatten die

damals diskutierten Objekte trotz der Namensgleichheit nichts mit der Superstringtheorie zu tun.

Die nach der Branenkollision gebildeten kosmischen Strings würden mit der Zeit zerfallen und sollten dabei Gravitationswellen erzeugen – etwa, wenn ein Knick an einem dieser Strings entlangläuft und dabei immer schneller wird, das kosmische Analogon eines Peitschenknalls! Das eröffnet eine Möglichkeit, die kosmischen Strings direkt von der Erde aus zu »belauschen«, denn weltweit arbeiten derzeit hunderte von Wissenschaftlern am ersten direkten Nachweis solcher Gravitationswellen (siehe SuW 1/2007, S. 26). Diese breiten sich von ihren Entstehungsorten als Raumverzerrungen mit Lichtgeschwindigkeit durch das Weltall aus und enthalten direkte Informationen über die Kernregionen von Supernovaexplosionen, die Verschmelzung Schwarzer Löcher, oder eben kosmische Strings.

Eine weitere Nachweismöglichkeit ergibt sich daraus, dass kosmische Massen als Gravitationslinsen wirken, also das Licht dahinter liegender Objekte ablenken können; in dieser Weise könnten auch die kosmischen Strings die Lichtausbreitung in unserem Universum beeinflussen.

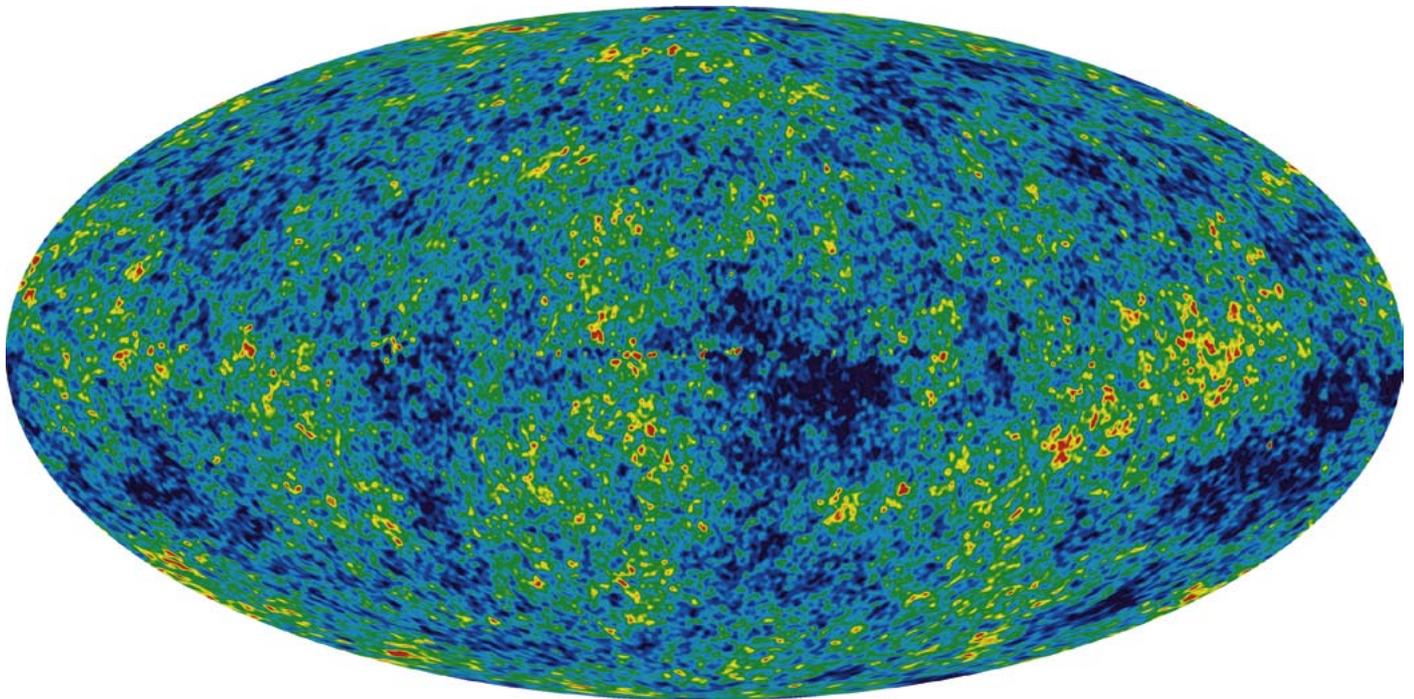
So aufregend es wäre, auf diese Weise direkte Signale aus parallelen Welten zu erhalten – sicher sind diese Nachweismöglichkeiten keineswegs. Für Branenkollisionen gibt es eine Vielzahl möglicher

Modelle. Wie viele kosmische Strings entstehen und ob sie für die genannten Nachweisarten günstige Eigenschaften aufweisen, variiert von Modell zu Modell.

Schwarze Löcher als Informationsspeicher

Extradimensionen sind nicht die einzige Überraschung, welche die Stringtheorie in punkto Dimensionen zu bieten hat. Bei genauerer Hinsicht zeigt sie, dass der Begriff der Dimension einer Welt gar nicht so eindeutig definiert ist, wie man gemeinhin annehmen könnte!

Die ersten Hinweise darauf ergaben sich aus der Theorie Schwarzer Löcher – das sind Raumregionen, in denen eine so starke Gravitation wirkt, dass weder Licht noch Materie jemals daraus entkommen kann. Wer in ein Schwarzes Loch gerät, kann somit keine Nachrichten mehr in die Außenwelt schicken. Schwarze Löcher entstehen beispielsweise aus massereichen Sternen, die den »Fusionsbrennstoff«, der sie zum Leuchten bringt, vollständig verbraucht haben, der Gravitationskraft daher keinen inneren Druck mehr entgegensetzen können und dann vollständig kollabieren. Eine andere Art Schwarzer Löcher findet sich in den Zentren von Galaxien; auch im Zentrum unserer Milchstraße befindet sich ein Schwarzes Loch mit einer Masse vom rund drei Millionenfachen der Sonnenmasse (siehe SuW 12/2006, S. 36).



Die Grenzfläche zwischen einem Schwarzen Loch und der Außenwelt ist der so genannte Ereignishorizont. Seit den 1970er Jahren ist bekannt, dass sein Flächeninhalt ein Maß für die Menge an Information ist, die das Schwarze Loch bereits verschluckt hat – physikalisch ausgedrückt, für seine Entropie. Als Informationsspeicher sind Schwarze Löcher dabei maximal effizient: Kein bekanntes physikalisches System speichert mehr Informationen pro Volumen. Das äußere Erscheinungsbild eines Schwarzen Loches wird durch nur sehr wenige Parameter (Masse, Ladung, Drehimpuls) vollständig bestimmt – zumindest, sobald die turbulente Entstehungsphase überstanden ist. Über die Werte dieser Parameter hinaus kann ein äußerer Beobachter keine weiteren Informationen über das Loch in Erfahrung bringen. Einer der Erfolge der Stringtheorie besteht darin, dass sie zumindest für einige Typen Schwarzer Löcher erklären kann, auf welche Weise die Informationen am Horizont »gespeichert« sind. Für diese Berechnungen betrachten die Physiker eine dem Schwarzen Loch äquivalente Konstruktion aus verschiedenen Branen.

Bemerkenswert ist, dass der Informationsgehalt des dreidimensionalen Volumens durch den Inhalt einer zweidimensionalen Fläche gegeben ist, eben die Horizontfläche. Im Alltag würden wir erwarten, dass beispielsweise der maximal mögliche Informationsgehalt einer Bibliothek durch die Anzahl der Bücher und anderer Medien gegeben ist, die sich darin unterbringen lassen, und damit durch das Volumen der Bibliothek, nicht aber durch den Oberflächeninhalt des Bibliotheksgebäudes. Auch für einfache Sys-

teme, wie etwa ein Gas, ist das physikalische Maß des Informationsgehalts, die Entropie, proportional zum Volumen.

Anders verhält es sich jedoch bei einem Schwarzen Loch: Fällt weitere Materie hinein, so ist die gesamte Information über ihre Beschaffenheit (Waren es Protonen oder Positronen, Stühle oder Raumschiffe?) auf dem Horizont gespeichert. Der Flächeninhalt wächst freilich, wenn wir die Region vergrößern, langsamer an als das Volumen – verdoppelt man etwa die Seitenlänge eines Würfels, dann vervierfacht sich seine Oberfläche, aber sein Volumen verachtfacht sich. Dass der maximale Informationsgehalt proportional zur Oberfläche ist, heißt demnach, dass sich eine gegebene Region nicht so weit mit Information »vollstopfen« lässt, wie man ihrem Volumen nach erwarten könnte.

Das Universum als Hologramm

Die Idee einer »holographischen Welt« geht noch einen wichtigen Schritt weiter: Wenn bereits auf einer zweidimensionalen Fläche alles kodiert sein kann, was im dreidimensionalen Raum geschieht, sollten die Forscher dann auch die physikalischen Theorien, welche die Dynamik dieses Geschehens beschreiben, in solch einem zweidimensionalen Raum formulieren? Verkürzt gesagt: Ist unsere Welt eine Art Hologramm? Liegt der vierdimensionalen Raumzeit, bestehend aus drei Raumdimensionen plus einer Zeitdimension, eine dreidimensionale Realität zugrunde? Gibt es zwei äquivalente (Physiker sagen: »zueinander duale«) Beschreibungen ein und derselben Wirklichkeit: das Hologramm und das rekonstruierte höherdimensionale Abbild?

▲ Abb. 7: Diese auf Daten von WMAP basierende Karte zeigt die Strahlungstemperatur des kosmischen Mikrowellenhintergrunds.

Für dieses »holographische Prinzip« kennen wir seit einer Arbeit des jungen argentinischen Physikers Juan Maldacena aus dem Jahre 1997 eine sehr konkrete Realisierung außerhalb der Physik Schwarzer Löcher – eine explizite vierdimensionale holographische Beschreibung einer fünfdimensionalen Welt (mit vier Raumdimensionen und einer Zeitdimension).

Die vierdimensionale holographische Beschreibung ist den Physikern recht vertraut – es ist eine so genannte Quantenfeldtheorie, verwandt mit demjenigen Sektor des Standardmodells der Elementarteilchen, der die starke Kernkraft beschreibt. Diese vierdimensionale Quantenfeldtheorie, so Maldacenas These, ist äquivalent zu einer Stringtheorie, in der fünf von neun Raumdimensionen in bestimmter Weise aufgerollt sind, während die verbleibende fünfdimensionale Raumzeit unter dem Einfluss der Gravitation in bestimmter Weise gekrümmt ist. Die vierdimensionale Raumzeit mit dem Hologramm (der Quantenfeldtheorie) ist dabei der Rand der fünfdimensionalen Raumzeit, in der die Strings leben, ähnlich wie eine zweidimensionale Kugelfläche der Rand eines dreidimensionalen Kugelvolumens ist. Die von Maldacena postulierte Entsprechung heißt auch AdS/CFT-Korrespondenz, nach den Kürzeln für die betreffende Quantenfeldtheorie (»Conformal Field Theory«) und die fünfdimensionale Raumzeit, in der die Strings leben (»Anti-de-Sitter-Raumzeit«).

Wenngleich ein strenger Beweis für Maldacenas These noch aussteht, konnten die Physiker eine beeindruckende Riege ihrer Vorhersagen bestätigen. Sowohl die AdS/CFT-Korrespondenz, wie auch eine Vielzahl neu gefundener Verallgemeinerungen, begründeten ein hochaktuelles Forschungsgebiet, in dem im übrigen auch die Branen eine wichtige Rolle spielen.

Eine der spannendsten Fragen ist, ob es auch zu den Modellen der herkömmlichen Elementarteilchenphysik duale Beschreibungen gibt, etwa eine höherdimensionale Stringtheorie. Wäre dies der Fall, so könnte die Stringforschung unerwartet praktische Konsequenzen aufweisen, denn das holographische Prinzip lässt sich in zwei Richtungen ausnutzen. Ein Verständnis der höherdimensionalen Stringtheorie liefert interessante Informationen über das Hologramm. Umgekehrt lässt das Hologramm Rückschlüsse auf die höherdimensionale Theorie zu. Bestimmte Berechnungen im Rahmen der einen Theorie können sich dabei als deutlich einfacher erweisen als ihre Gegenstücke im anderen Modell. Könnte sie ein höherdimensionales Abbild beispielsweise der Theorie der starken Kernkraft liefern, dann könnte die Stringtheorie zu einem nützlichen Rechenwerkzeug der herkömmlichen Elementarteilchenphysik werden.

Eine Vielfalt möglicher Welten

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik war der vorläufige Schlusspunkt eines langen und steinigen Weges und ist sicherlich eine der wichtigsten Leistungen der theoretischen Physik des 20. Jahrhunderts. Es erlaubt präzise und vielfach verifizierte Vorhersagen, etwa für die Ergebnisse der an Teilchenbeschleunigern durchgeführten Experimente.

Aber einige Wünsche lässt auch das Standardmodell offen: Wie schon erwähnt bleibt in diesem Modell die Gravitationswechselwirkung außen vor. Zudem enthält das Modell rund zwei Dutzend freier Parameter, die nur experimentell bestimmt werden können. Ein Beispiel ist die Masse des Elektrons: Auch mit einer anderen als der in unserer Welt gemessenen Elektronenmasse wäre das Standardmodell in sich schlüssig, allerdings würde es eine gänzlich andere Welt beschreiben. Hätte das Elektron eine mehr als knapp dreimal so große Masse wie in Wirklichkeit, dann könnte das Neutron nicht in ein Proton, ein Elektron und ein Teilchen namens Antineutrino zerfallen. Sowohl die Entstehung der ersten chemischen Elemente im frühen Universum als auch die Fusionsprozesse, die Sterne wie unsere Sonne zum Leuchten bringen,

würden unter veränderten Bedingungen völlig anders oder überhaupt nicht ablaufen. Warum haben diese Parameter gerade die Werte, die sie haben?

Zu dieser Frage treten weitere: Warum gibt es vier fundamentale Wechselwirkungen? Warum hat der Raum auf den uns vertrauten Größenskalen drei Dimensionen? Dies ist nur ein Teil des Katalogs von Fragen, die das Standardmodell unbeantwortet lässt. Viele Jahre lang hoffte die Mehrheit der Stringtheoretiker, diese Antworten finden zu können.

In einer Hinsicht gelingt der Stringtheorie, wie bereits erwähnt, tatsächlich eine Vereinheitlichung: Die Vielzahl der Teilchen erklärt sich aus den Anregungszuständen eines fundamentalen Objekts, des Strings. In einer Welt mit einer Zeit- und zehn Raumdimensionen würde die Stringtheorie zu einem vollständigen Modell ohne freie Parameter führen, das als M-Theorie bekannt, allerdings bei weitem noch nicht vollständig verstanden ist. Doch bereits dafür, wie man durch das Aufrollen von Dimensionen von dieser höherdimensionalen Welt zu einer Welt wie der unsrigen gelangt, die deutlich weniger ausgedehnte Raumdimensionen aufweist, gibt es eine Fülle von Möglichkeiten, die mit allen Konsistenzbedingungen der Stringtheorie vereinbar sind.

Insgesamt ergibt sich eine unübersichtliche Vielfalt zulässiger Welten – nicht nur dreidimensionale, sondern auch Exemplare mit weniger oder mehr Dimensionen unterschiedlicher Größe, mit verschiedenen Elementarteilchensorten, deren Eigenschaften davon abhängen, wie die Strings unter den beispielsweise durch die Eigenschaften der Extradimensionen definierten Bedingungen schwingen können, und verschiedenen Wechselwirkungen unterschiedlicher Stärke. Die Frage, ob die Anzahl der Möglichkeiten endlich oder unendlich ist, ist noch offen. In jedem Fall ist sie von einer enormen Größe – oft liest man in diesem Zusammenhang die geschätzte Zahl von 10^{500} , also ungleich mehr Möglichkeiten, als es in unserem Universum Atome gibt.

Die Stringtheoretiker fanden bereits zulässige Welten, deren Eigenschaften denen unserer eigenen Welt sehr nahe kommen – dies ist keinesfalls selbstverständlich in Anbetracht der unübersichtlichen Menge an Möglichkeiten. Die Suche nach dem exakten Standardmodell innerhalb der Stringtheorie geht indes weiter und birgt nach wie vor die Möglichkeit, die Stringtheorie zu falsifizieren – dann nämlich, wenn es gelänge zu zeigen, dass unsere Welt keiner der in der Stringtheorie zulässigen Möglichkeiten entspricht! Gelingen könnte solch eine Falsifikation freilich nur in Form eines allgemeinen

Bei uns sind Sie umfassend und aktuell informiert. Der Internetservice für Astronomie und Raumfahrt.

<http://www.astronomie.info/>

Am Himmel Astrolexikon Finsternisse Planetarium Sternbilder

Am Himmel
News und Monatsübersichten
 Monatlich stellen wir für Sie das Wichtigste zur Himmelsbeobachtung zusammen. Hier finden Sie z.B. die Planetenübersicht, Mondkalender, einen Spaziergang am Sternenhimmel und ein aktuelles Schwerpunktthema. Hier finden Sie natürlich Schlagzeilen aus Astronomie und Raumfahrt.

Astrolexikon
Astronomie in Stichworten
 Unser Astronomielexikon enthält Hunderte Stichwörter. Sie finden hier das gesamte astronomische Grundwissen. A - B - C - D - E - F - G - H - I - J - K - L - M - N - O - P - Q - R - S - T - U - V - W - X - Y - Z. Auch Java-Applets und vieles mehr...

Finsternisse
Alles über Finsternisse und Transits
 Im Jahr 2007 ist von Mitteleuropa aus einzig eine totale Mondfinsternis zu sehen. Finsternisse sind ein Schwerpunkt von astro!info - deshalb haben wir Hunderte von Karten und Fotos erstellt um Ihnen die Erlebnisse Sonnenfinsternis und Transit möglichst nahe zu bringen. Sie finden aber auch Details über Bedeckungsveränderliche Sterne und Schattenspiele der Jupitermonde.

Sternbilder
Diamanten am Nachthimmel
 Der Sternenhimmel ist voll von schönen Deep-Sky Objekten - finden Sie sie! In unserem Sternbildkatalog finden Sie Beschreibungen von einer Fülle von Deep-Sky Objekten! Natürlich ist jedes einzelne der 88 Sternbilder dargestellt.

CalSKY

Der Astrokalender im Internet, individuell konfigurierbar:

- Satelliten (z.B. ISS, Iridium)
- Planeten, Sonne und Monde
- Sonnen- & Mondfinsternisse
- Kometen, Asteroiden, Deep-Sky
- Polarlichtwarnungen
- Email-Warnservice

<http://www.calsky.com/>

Standardmodell und Supersymmetrie

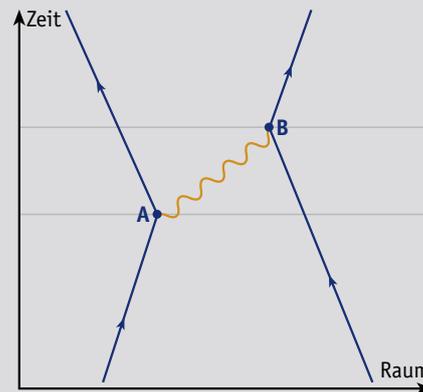
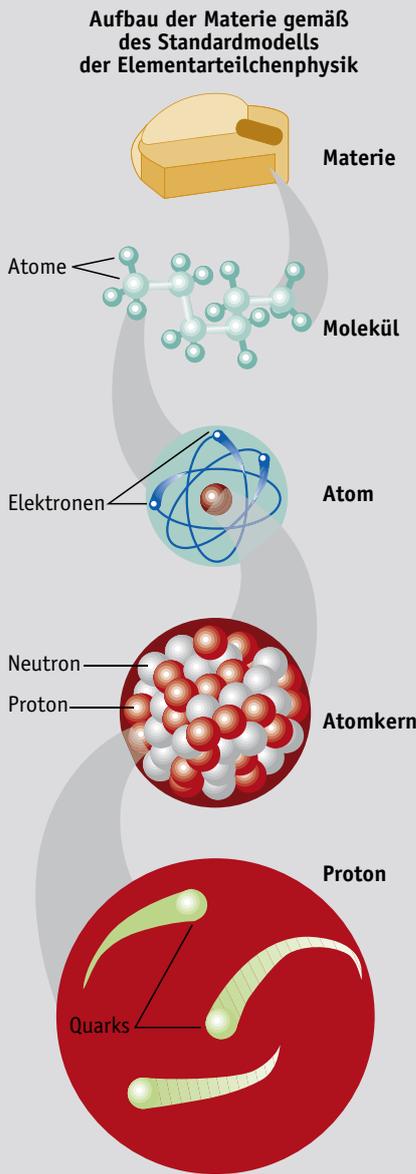
Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik beschreibt die fundamentalen Wechselwirkungen, mit Ausnahme der Gravitation:

■ **Elektromagnetische Wechselwirkung:**

An ihr nehmen alle elektrisch geladenen Partikel teil, beispielsweise negativ geladene Elektronen und ihre positiv geladenen Antiteilchen (Positronen) sowie die in Atomkernen auftretenden Protonen. Zwischen Teilchen mit gleichnamigen Ladungen wirkt die elektromagnetische Kraft abstoßend, bei ungleichnamigen Ladungen anziehend. Teilchen ohne elektrische Ladung, wie zum Beispiel Neutrinos, unterliegen der elektromagnetischen Wechselwirkung nicht.

■ **Starke Wechselwirkung:**

Die Bestandteile der Atomkerne – Protonen und Neutronen – setzen sich aus so genannten Quarks zusammen. Quarks treten in mehreren Varianten (in der Fachsprache der Physiker: »Flavours«) auf, die sich durch ihre elektrische Ladung und Masse unterscheiden. Die leichtesten Quarks sind das Up-Quark u (elektrische Ladung: $+\frac{2}{3}$) und das Down-Quark d (elektrische Ladung: $-\frac{1}{3}$). Das Neutron n setzt sich aus zwei Down-Quarks und einem Up-Quark zusammen, kurz $n = (u, d, d)$. Beim Proton p sind es zwei Up-Quarks und ein Down-Quark, $p = (u, u, d)$. Quarks unterliegen einer extrem starken Wechselwirkung, die jedoch von sehr kurzer Reichweite ist. Sie wird auch als starke Kernkraft bezeichnet, denn sie sorgt für den Zusammenhalt der Atomkerne: In abgeschwächter Form wirkt die



▲ Im Standardmodell beschreiben Raum-Zeit-Diagramme den Austausch von Photonen zwischen geladenen Teilchen.

starke Kraft auch außerhalb von Protonen und Neutronen und bindet diese Teilchen aneinander.

■ **Schwache Wechselwirkung:**

Die schwache Wechselwirkung ist für bestimmte radioaktive Zerfälle verantwortlich. Mit ihrer Vermittlung können sich beispielsweise Quarks unterschiedlicher Flavours ineinander umwandeln, etwa beim Zerfall eines Neutrons in ein Proton, den wir sogleich näher betrachten werden.

■ **Austausch von Kräften durch Botenteilchen:**

Das Standardmodell beschreibt die Wirkung von Kräften zwischen den Elementarteilchen durch den Austausch von Botenteilchen. Dieser Vorgang lässt sich durch ein Raum-Zeit-Diagramm veranschaulichen (siehe Skizze). Bei der elek-

mathematischen Ausschlussbeweises (in der Physik als so genannte »No-go-Theoreme« bekannt), im Gegensatz zum separaten Verwerfen jeder einzelnen Möglichkeit.

Eine Landschaft möglicher Welten

Mit ihrer Vielfalt möglicher Welten scheint es, als habe die Stringtheorie nur eine Frage durch eine andere ersetzt: An die Stelle des Unwissens über die Parameter und weiteren Eigenschaften des Standardmodells ist die Unwissenheit darüber getreten, warum die Extradimensionen gerade so und nicht anders aufgerollt sind. Die Hoffnung, ein Selektionsprinzip zu finden, mit dessen Hilfe alle bis auf eine dieser Welten – die unsrige – ausgeschlossen werden könnten oder die Vielfalt auf eine überschaubare Zahl von Möglichkeiten reduziert werden könnte,

hat sich bislang nicht erfüllt. Das ist in einer Hinsicht nicht überraschend, denn es ist keinesfalls logisch zwingend, dass eine vereinheitlichte Theorie aller Materie und Wechselwirkungen wirklich alle Eigenschaften der Welt zwingend festlegen muss – auch wenn die unglücklich gewählte Bezeichnung »Theorie für Alles«, die gelegentlich im Zusammenhang mit der Stringtheorie auftaucht, im Sinne eines solchermaßen überzogenen Anspruchs missverstanden werden kann.

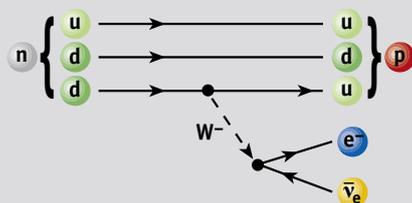
Bildlich kann man sich die Vielzahl der zulässigen Welten – von denen sich einige mehr, andere weniger ähneln – als eine Landschaft mit Tälern und Bergzügen vorstellen. Die Höhe eines Ortes über dem Meeresspiegel entspräche dabei der Energie, die dem leeren Raum in der dieser spezifischen Parameterwahl entsprechenden Welt zukäme. Manche Täler sind durch Schluchten miteinander

verbunden, andere dagegen sind isoliert, ohne direkten Zugang zu anderen Tälern jenseits der Berge.

Die meisten Orte in dieser Landschaft entsprechen Welten, die der Unsrigen nicht im Geringsten ähneln. Zu hoch gelegene Regionen etwa entsprechen Welten, bei denen die kosmische Expansion so stark beschleunigt verläuft, dass sich keine Sterne oder Planeten bilden könnten – Leben, wie wir es kennen, wäre unmöglich. Zu tief gelegene Orte dagegen sind Welten, in denen das Vakuum selbst bereits eine so hohe Energie aufweist, dass die betreffenden Universen nach kurzer Expansionsphase wieder in sich zusammenfielen, ohne dass Zeit zur Bildung von Galaxien und zur Entwicklung von Leben gewesen wäre. Doch selbst die allermeisten Universen, die unserem eigenen Kosmos in Dimensionalität und Expansionsverhalten ähneln, wären uns

tromagnetischen Wechselwirkung heißen die Botenteilchen Photonen, bei der schwachen Wechselwirkung W^+ , W^- und Z^0 -Bosonen und bei der Starken Wechselwirkung Gluonen.

Beispiel: Die schwache Wechselwirkung wird durch drei massebehaftete Botenteilchen vermittelt, die »Vektorbosonen« W^+ , W^- und Z^0 . Zusätzlich zu ihrer Masse besitzen zwei dieser Teilchen auch elektrischen Ladungen: Das W^+ und W^- sind elektrisch positiv beziehungsweise negativ geladen, das Z^0 ist elektrisch neutral. Die schwache Wechselwirkung verursacht Umwandlungsprozesse wie den Zerfall des Neutrons in ein Proton: Ein Neutron besteht aus einem Up-Quark u (elektrische Ladung: $+2/3$) und zwei Down-Quarks d (elektrische Ladung jeweils $-1/3$), kurz: $n = (d, d, u)$. Nach durchschnittlich 886 Sekunden – der mittleren Lebensdauer des Neutrons – emittiert eines der Down-Quarks ein W^- -Boson und verwandelt sich dabei in ein Up-Quark. Das nun verbleibende System besteht aus zwei Up-Quarks und nur noch einem Down-Quark, kurz: (u, u, d) – ein Proton ist entstanden. Das bei der Wechselwirkung emittierte W^- verwandelt sich in ein Leptonenpaar, bestehend aus einem Elektron e^- sowie einem elektronischen Antineutrino $\bar{\nu}_e$.



äußerst fremd. Dies sind Universen mit geringer Vakuumenergie, die in der beschriebenen Landschaft am Grunde von Tälern auf Höhe des Meeresspiegels liegen. Hätte beispielsweise die Elektronenladung in einem dieser Universen einen nur geringfügig anderen Wert als in unserem, so hätte sich kein Kohlenstoff und damit kein Leben in der uns bekannten Form bilden können.

Warum, um auf die Frage nach den konkreten Eigenschaften unserer Welt zurückzukommen, liegt unser eigenes Universum denn nun gerade in seinem speziellen Tal und nicht in einem der vielen anderen Täler? Ein hinterhältiger Teilaspekt dieser Frage deutet sich bereits in den Querverbindungen an, die im vorangehenden Absatz zwischen den Eigenschaften der möglichen Welten und den Voraussetzungen für unsere eigene Existenz gezogen wurden.

■ **Supersymmetrie und Strings:** In der Quantenmechanik und Elementarteilchenphysik wird der Eigendrehimpuls eines Teilchens als Spin bezeichnet und durch die Spinquantenzahl s charakterisiert. Teilchen mit halbzahligem Spin, wie das Elektron ($s = 1/2$) bezeichnet man als Fermionen, Teilchen mit ganzzahligem Spin, wie das Photon ($s = 1$), als Bosonen. Die Supersymmetrie (Susy) erweitert das Standardmodell durch eine vereinheitlichte Beschreibung von Fermionen und Bosonen. Sie ordnet jedem bekannten Boson des Standardmodells ein Fermion als Superpartner zu. Umgekehrt postuliert sie zu jedem Fermion ein Boson. Der Preis für die Supersymmetrie ist also die Annahme bisher unbekannter Teilchen, sogenannter Superpartner. So ist der hypothetische Partner eines Elektrons ein »Selektron« genanntes Teilchen mit ganzzahligem Spin ($s = 0$), der Partner des Photons ein »Photino« mit halbzahligem Spin ($s = 1/2$). Dem steht als Gewinn gegenüber, dass supersymmetrische Theorien beispielsweise bezüglich der im Haupttext kurz erwähnten »Zähmung der Unendlichkeiten« günstigere Eigenschaften haben als herkömmliche Theorien. Eine bestimmte Variante der Susy ist ein grundlegender Bestandteil der Stringtheorie, deshalb sprechen die Physiker auch von »Superstringtheorien«. Zwar ließ sich bislang noch keines der Susy-Teilchen nachweisen, doch ab dem Jahr 2008, wenn der leistungsfähige Large Hadron Collider seinen Betrieb aufnimmt, hoffen die Forscher erste Hinweise auf die Existenz der Susy-Teilchen finden zu können.

Das anthropische Prinzip

Zum besseren Verständnis betrachten wir zunächst eine analoge Frage aus weit weniger exotischen Gefilden der Physik: Warum ist die Erde gerade so weit von der Sonne entfernt, wie sie es tatsächlich ist? Auch diese Frage enthält bei genauerer Betrachtung eine direkte Verbindung zu uns, den Fragenden. Wäre die Erde der Sonne sehr viel näher, oder aber viel weiter von ihr entfernt, so gäbe es kein flüssiges Wasser – Wasser würde entweder verdampfen oder gefrieren; menschliches Leben könnte sich unter diesen Bedingungen nicht entwickeln. Es gibt damit schlichtweg keine Situation, in der ein menschenartiges Wesen auf einem seiner Sonne zu nahen oder zu fernen Planeten steht und fragt, warum sich seine Spezies gerade auf einem derartigen Planeten entwickelt hat. (Siehe dazu auch den Beitrag von Rudolf Kippenhahn ab Seite 48.)

Die Antwort auf diese Frage ist dieselbe wie auf eine Frage allgemeineren Typus: Warum leben wir auf einem Planeten, auf dem Bedingungen herrschen, unter denen sich menschliches Leben entwickeln konnte? Weil wir ansonsten nicht hier wären, um diese Frage zu stellen. Die Auswirkung der bloßen Existenz des Fragenden auf die Antwort ist auch als anthropisches Prinzip bekannt (wobei warnend hinzugefügt sei, dass es eine Reihe abweichender Definitionen dieses Prinzips gibt).

Ist die anthropische Antwort befriedigend? Auf die Komplikation, dass es Leben auf gänzlich anderer als der irdischen Kohlenstoffbasis geben könnte, für welches dann möglicherweise ein ganz anderer Abstand zur Sonne günstig wäre, möchten wir hier nicht eingehen, sondern stattdessen einen anderen wichtigen Aspekt ansprechen.

Obwohl noch Kepler versuchte, die Abstände der Planeten von der Sonne wissenschaftlich zu erklären und damit ein »Selektionsprinzip« für die tatsächlichen Abstandswerte zu finden, wissen wir seit der Entdeckung des Gravitationsgesetzes durch Newton, dass der exakte Abstand der Erde von der Sonne nur eine von unendlich vielen Möglichkeiten ist. Der tatsächliche Abstand ist ein historischer Zufall, und dass sich auf gerade diesem Planeten menschliches Leben entwickeln konnte, ist eine Folge dieses Zufalls. Und doch wäre die allgemein akzeptierte anthropische Erklärung höchst fragwürdig, wenn es im Universum nur eine einzige Sonne mit ihren Planeten gäbe. Erst die Tatsache, dass es in unserem Kosmos Abermilliarden von Sonnen mit Planeten in allen Abstandsvariationen gibt, macht die anthropische Erklärung überzeugend, denn dass wir in dieser realisierten Vielfalt auf einem Planeten leben, der alle für unsere Existenz notwendigen Voraussetzungen bietet, ist selbstverständlich.

Damit zurück zur Stringtheorie in der es, wie bereits geschildert, ebenfalls unzählige verschiedene mögliche Welten gibt. Warum sind die Parameter und weiteren Eigenschaften des Standardmodells gerade dergestalt, dass menschliches Leben entstehen konnte? Ob das anthropische Prinzip eine befriedigende Antwort auch auf diese Frage liefert, hängt davon ab, ob die vielen Möglichkeiten auch realisiert sind oder unsere Welt die einzig existierende ist.

Letztere Möglichkeit würde eine Wiederauferstehung des anthropozentrischen Weltbilds bedeuten, wonach dem Menschen eine ausgezeichnete Stellung im Universum zukommt. Doch es gibt Alternativen: Noch bevor sich aus der Stringtheorie das Bild der Landschaft aller

Weitere Informationen

Brian Greene: Das elegante Universum. Die Suche nach der Weltformel. Berliner Taschenbuch Verlag, 2002

Brian Greene: Der Stoff, aus dem der Kosmos ist. Pantheon, 2006

Hermann Nicolai, Markus Pössel: Strings – Grundbausteine des Kosmos? SuW-Special Gravitation, S. 77. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg 2005

Markus Pössel: Das Einstein-Fenster. Eine Reise in die Raumzeit. Hoffmann und Campe, 2005

Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos und Georgi Dvali: Die unsichtbaren Dimensionen des Universums. Spektrum der Wissenschaft 10/2000, S. 44

Hans-Peter Nollert, Matthias Kunle und Hanns Ruder: Physik der Gravitationswellen. SuW-Special Gravitation, S. 42. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg 2005

Bogdan Povh: Elementarteilchenphysik und Kosmologie. SuW-Dossier Struktur des Kosmos, S. 52. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg 2005

Pierre Ramond: Strings – Urbausteine der Natur? Spektrum der Wissenschaft 2/2003, S. 24

Lisa Randall: Verborgene Universen. Eine Reise in den extradimensionalen Raum. Verlag S. Fischer, Frankfurt am Main 2006

Stephen Webb: Out of this World. Colliding Universes, Branes, Strings, and Other Wild Ideas of Modern Physics. Springer Praxis Publishing, New York 2004

Barton Zwiebach: A first Course on String Theory. Cambridge University Press, Cambridge 2005

Interessante Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.suw-online.de/artikel/863833

möglichen Universen ergab, hatten Kosmologen mit der Theorie einer »ewigen Inflation« die Existenz eines »Multiversums« postuliert, die sich an folgendem Bild veranschaulichen lässt: Öffnet man eine Sektflasche, so entstehen überall in der Flasche kleine Kohlendioxidblasen. Die Blasen steigen auf und werden größer; ob sie miteinander verschmelzen hängt davon ab, ob sich auch das Gemisch aus Flüssigkeit und Gas als Ganzes schnell genug ausdehnt. Im Szenario der ewigen Inflation entsprechen die Blasen verschiedenen Universen, die in winzigen Raumregionen ihren Ausgang nehmen und dann, expandierend, ihren eigenen Raum schaffen.

Im Gegensatz zur Sektflaschenanalogie können dabei sogar innerhalb einer bereits bestehenden Blase neue, eigenständige Blasen entstehen. Auch im Rahmen der Stringtheorie ist eine derartige dynamische Entstehung immer neuer Universen möglich. Entscheidend ist, dass die Blasen dabei Universen mit verschiedenen Eigenschaften entsprechen – aus einem Universum etwa, dessen Eigenschaften einem Ort in einem Tal der Landschaft entsprechen, kann dabei durch so genanntes »quantenmechanisches Tunneln« ein neues Blasenuniversum entstehen, dessen Eigenschaften einem Ort in einem noch tieferen Tal entsprechen. Das Ergebnis wäre eine Vielzahl sehr verschiedener Welten. Das anthropische Prinzip besagt nun, dass wir uns notwendigerweise in einer davon

befinden, in der die Bedingungen für die Entstehung hinreichend intelligenten Lebens gegeben sind. Dass eine der Welten die nötigen günstigen Eigenschaften besitzt, ist umso wahrscheinlicher, je mehr verschiedene Welten es gibt.

Die Vorhersage einer Vielzahl weiterer Welten, mit denen wir aller Voraussicht nach niemals werden in Verbindung treten können, ist ob ihrer Unüberprüfbarkeit vom wissenschaftlichen Standpunkt aus höchst unbefriedigend, und auch viele Stringtheoretiker sind der Meinung, dass das letzte Wort in dieser Angelegenheit noch nicht gesprochen ist. Allerdings gewinnt die Überzeugung an Boden, dass man das anthropische Prinzip im Rahmen der Stringtheorie nicht wird außer Acht lassen können, wenn es darum geht, die Frage zu beantworten, warum unsere Welt so ist, wie sie ist.

Ausblick

Die Stringtheorie konfrontiert uns mit der Möglichkeit, dass unser Universum ganz anders ist, als allgemein angenommen. Die Existenz zusätzlicher Dimensionen, die Welt als Membran-Analogon in einer höherdimensionalen Raumzeit, die Welt als Hologramm oder als unbedeutendes Staubkorn in einem Multiversum voller anderer Welten – das sind faszinierende Ideen, aber wie ernst sollte man sie nehmen?

Einerseits nicht zu ernst, denn die Suche nach einer Theorie der Quantengravitation ist noch lange nicht abgeschlos-

sen, experimentelle Prüfungen stehen noch aus, und alle Teilergebnisse stehen dementsprechend unter Vorbehalt. Andererseits wäre es falsch, die Stringtheorie zu unterschätzen. Wenn die Forschung der letzten sechzig Jahre eines gezeigt hat, dann, dass es mitnichten einfach ist, die drei Wechselwirkungen der Elementarteilchenphysik mit der Gravitation unter einen Hut zu bringen. Ein Modell, das bei dieser schwierigen Aufgabe so große Fortschritte vorzuweisen hat wie die Stringtheorie, verdient es, ernstgenommen zu werden.

Noch überzeugender wären natürlich Experimente, mit denen sich direkt prüfen ließe, ob die Stringtheorie der richtige Weg zu einer Theorie der Quantengravitation ist. Diese gibt es bislang nicht – vor allem deswegen, weil die typischen mit der Quantengravitation assoziierten Energien weit jenseits der Reichweite heutiger Experimente liegen: Selbst ein (herkömmlicher) Teilchenbeschleuniger, so groß wie das gesamte beobachtbare Universum und betrieben mit der Energie aller darin befindlichen Sonnen, würde dazu nicht ausreichen. Doch mit etwas Glück wird sich die experimentelle Beweislage in den kommenden Jahren ändern – sei es, dass in der Nähe von Genf entstehende Large Hadron Collider ab 2008 erste Spuren von Extradimensionen findet, dass Experimente Veränderungen der Abstandsabhängigkeit der Schwereanziehung bei winzigsten Abständen belegen, oder dass Gravitationswellendetektoren das »Peitschenknallen« kosmischer Superstrings »hören«. Zumindest für einige der ungewohnten Vorhersagen der Stringtheorie wüssten wir dann, ob sie auf unser Universum zutreffen – oder ob unser Kosmos vielleicht noch viel sonderbarere Eigenschaften besitzt, als sie sich die Stringtheoretiker träumen lassen. □



Stefan Theisen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut), dem in Potsdam, wo seine Forschungsarbeit einer Vielfalt von Themen aus der Stringtheorie gilt. Am gleichen Institut arbeitet auch **Markus Pössel**, dessen Forschungsinteresse sich nach einer Doktorarbeit in der Stringtheorie weitestgehend Fragen der Grundlagen, Vermittlung und Didaktik der relativistischen Physik zugewandt hat.