

Extra-Dimensionen auf der Waagschale

Suche nach Abweichungen vom newtonschen Gravitationsgesetz

Die Stringtheorie behauptet, dass das Universum mehr als drei Raumdimensionen besitzt. Bisher glaubte man, dass diese Extra-Dimensionen viel zu kompakt sind, um sich jemals direkt bemerkbar zu machen. Seit kurzem jedoch halten es Physiker für möglich, dass diese andere Welt zum Greifen nahe sein könnte. Experimente sollen nun Klarheit verschaffen.

Spe. Die Vorstellung, dass es mehr als die drei uns geläufigen Raumdimensionen geben könnte, mag auf den ersten Blick abwegig erscheinen. Denn nichts deutet darauf hin, dass unsere Position im Raum durch die Angabe von drei Koordinaten ungenügend charakterisiert wäre. Und doch gibt es Physiker, die der Meinung sind, dass es neben den drei ausgedehnten Raumdimensionen, in denen wir uns bewegen, noch weitere Dimensionen gibt, die nur deshalb nicht wahrnehmbar sind, weil sie zu winziger Grösse «aufgewickelt» sind. So wie ein Seidenfaden erst aus der Nähe betrachtet zu einem zweidimensionalen Gebilde wird, sollten sich auch die zusätzlichen Raumdimensionen erst dann offenbaren, wenn man tief genug in das Gewebe des Raums vordringt.

Zu klein, um wahr zu sein

Als Denkmodell mögen die zusätzlichen Raumdimensionen reizvoll sein. Bei empirisch orientierten Physikern stossen sie jedoch auf wenig Resonanz. Denn die Konsequenzen dieser aufgewickelten Dimensionen, denen man im Rahmen der Stringtheorie einen Durchmesser von weniger als 10^{-30} Metern zuschreibt, sind mit den heutigen experimentellen Methoden nicht zu überprüfen. Es ist, als wollte man von ausserhalb des Sonnensystems aus erkennen, ob ein Seidenfaden auf der Erde einen endlichen Durchmesser besitzt. Die vorherrschende Haltung unter Physikern ist deshalb eine pragmatische: Warum den Raum unnötig aufblähen, wenn die überprüfbare Physik doch die gleiche bleibt?

In den letzten beiden Jahren hat sich jedoch eine Entwicklung abgezeichnet, die auch Pragmatiker aufhorchen lässt. Theoretische Berechnungen haben nämlich gezeigt, dass die aufgewickelten Dimensionen nicht notwendigerweise klein sein müssen. Erstaunlicherweise wäre selbst ein makroskopischer Durchmesser von einem Millimeter durch die heutigen Experimente nicht ausgeschlossen, solange man von den vier bekannten Naturkräften nur der Gravitationskraft erlaubt, in die zusätzlichen Dimensionen «auszugreifen». Die Konsequenzen dieser ausgedehnten Extra-Dimensionen sind weitreichend. So sollte zum Beispiel das newtonsche Gravitationsgesetz eine Abänderung erfahren - und das bei Abständen, die durchaus messbar sind. Mittlerweile haben verschiedene Forschergruppen die Suche nach den Extra-Dimensionen aufgenommen. Damit ist eine spekulative Idee unversehens zum Forschungsgegenstand geworden.

Der erste, der die Existenz von zusätzlichen Dimensionen in Erwägung zog, war der deutsche Physiker Theodor Kaluza. Im Jahr 1919 schickte er einen Aufsatz an Albert Einstein, in dem er die Möglichkeit durchspielte, dass unser Raum noch eine vierte, aufgewickelte Dimension besitzt. Die Theorie schien auf den ersten Blick zu leisten, was Einstein noch viele Jahre seines Lebens beschäftigen sollte, nämlich eine Vereinigung von Gravitationskraft und elektromagnetischer Kraft im Rahmen einer einheitlichen Feldtheorie. Auch wenn sich später herausstellen sollte, dass die Theorie Kaluzas Mängel aufwies, war die Idee von zusätzlichen Raumdimensionen geboren.

Vier sind nicht genug

Eine Renaissance erlebte diese Idee in den siebziger und achtziger Jahren. Immer noch arbei-

teten Physiker an einer vereinheitlichten Feldtheorie aller Kräfte - mit dem Unterschied, dass zu der Gravitationskraft und der elektromagnetischen Kraft mit der schwachen und der starken Kraft inzwischen zwei weitere Kräfte hinzugekommen waren. Mit nur vier Raumdimensionen, das zeigte sich sehr schnell, waren diese vier Kräfte nicht auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen. Im Rahmen der Stringtheorie erweiterte man den Raum deshalb um weitere «kompakte» Dimensionen und schuf damit eine Grundlage für eine einheitliche Beschreibung aller Kräfte.

Die Stringtheorie räumt mit der Vorstellung auf, dass es sich bei Elementarteilchen um punktförmige Objekte handelt. Vielmehr setzt sie diese Teilchen mit winzigen Saiten gleich, die in einem Raum schwingen, der neben den drei gewöhnlichen Raumdimensionen noch sechs aufgewickelte Dimensionen besitzt. Auch wenn diese Dimensionen viel zu kompakt sind, um sich direkt bemerkbar zu machen, bestimmt ihre Geometrie das Schwingungsmuster der Saiten und damit wichtige Eigenschaften der Teilchen wie ihre Masse oder ihre Ladung.

Im Rahmen der Stringtheorie verschmelzen die vier Naturkräfte bei einer Energie von 10^{19} GeV (Gigaelektronenvolt) zu einer universellen Kraft. Die Energien, die man heute mit Teilchenbeschleunigern aufbringen kann, liegen in der Grössenordnung von 10^3 GeV, sind also um Welten von der Vereinigungsskala entfernt. Bei diesen moderaten Energien ist die Gravitationskraft im Vergleich zu den anderen Kräften so schwach, dass ihr Einfluss vernachlässigbar ist. Bis vor zwei Jahren dachte man daher, dass ein direkter Test der Stringtheorie so gut wie unmöglich ist.

Damals stellten Nima Arkani-Hamed und Savas Dimopoulos von der Stanford University sowie Gia Dvali vom Internationalen Zentrum für Theoretische Physik in Triest die Überlegung an, dass die Vereinigungsskala nur scheinbar in unerreichbarer Ferne liegen könnte. Wenn nämlich einige der zusätzlichen Dimensionen nicht ganz so kompakt aufgerollt sind, wie es die Stringtheorie postuliert, könnte die Vereinigung der Kräfte schon bei einer Energie erfolgen, die nur wenig über den heute erreichbaren Energien läge. Die Gravitationskraft wäre dann gegenüber den anderen Kräften nicht wirklich schwach. Sie erschiene nur so, weil das Gravitationsfeld zwischen zwei Massen in die verborgenen Dimensionen ausweichen kann, wenn der Abstand zwischen den beiden Massen klein gegenüber dem Radius der zusätzlichen Dimensionen ist. Das führt zu einer charakteristischen Abweichung vom newtonschen Gravitationsgesetz. Für die anderen drei Kräfte bleibt hingegen alles beim alten. Denn ihr Aktionsradius ist auf den gewöhnlichen dreidimensionalen Raum beschränkt, der wie eine hauchdünne Membran in den höherdimensionalen Raum eingebettet ist.

Mit nur einer aufgeblähten Dimension funktioniert das Modell der drei Forscher nicht. Um die Vereinigungsskala auf das gewünschte Energieniveau zu drücken, müsste diese Dimension nämlich einen Radius von 10^{13} Metern haben. Die daraus resultierenden Veränderungen des Gravitationsgesetzes hätte man an der Bewegung der Planeten um die Sonne längst bemerken müssen. Lässt man zwei zusätzliche Dimensionen zu, so ergibt sich ein Radius in der Grössenordnung von

einem Millimeter. Man sollte meinen, dass das Gravitationsgesetz über diese Distanzen hinreichend genau überprüft ist, um auch diese Möglichkeit auszuschliessen. Doch das Gegenteil ist der Fall. Wie sich die Gravitationskraft bei Abständen von weniger als einem Zentimeter verhält, ist bis heute weitgehend unerforscht. Der Grund ist, dass die Gravitationskraft äusserst schwach ist und Störungen jeglicher Art das Messergebnis verfälschen.

Das Gravitationsgesetz im Test

Ungeachtet dieser Schwierigkeiten sind derzeit verschiedene Gravitationsexperimente in Vorbereitung, die in diesen Bereich vorstossen wollen. Ein erstes, bisher noch vorläufiges Resultat präsentierte kürzlich Eric Adelberger von der University of Washington an einer Tagung der American Physical Society in Long Beach, Kalifornien. Mit einer flachen Torsionswaage, die über einer rotierenden Scheibe sitzt, konnten die Forscher bei Abständen bis hinunter zu 200 Mikrometern keine Abweichung vom newtonschen Gravitationsgesetz feststellen. Damit wird es auch für zwei zusätzliche aufgeblähte Dimensionen eng. Um diesen Fall definitiv ausschliessen zu können, wollen die Forscher den Abstand zwischen den Testmassen weiter verringern. Sollte sich auch dann noch keine Abweichung vom Gravitationsgesetz zeigen, müsste man wohl Zuflucht zu mehr als zwei Extra-Dimensionen nehmen. Die Konsequenzen hiervon lassen sich allerdings mit einem Gravitationsexperiment kaum mehr überprüfen. Denn je mehr zusätzliche Dimensionen man ins Spiel bringt, desto mehr schrumpft ihr Radius.

Zum Glück haben jedoch auch die Teilchenphysiker ein gewichtiges Wörtchen in dieser Sache mitzureden. Wenn nämlich die Gravitationskraft schon bei «moderaten» Energien von 10^3 GeV (und nicht erst bei 10^{19} GeV) ähnlich stark wird wie die anderen drei Kräfte, so sollten sich die Konsequenzen hiervon in Beschleunigerexperimenten bemerkbar machen. So würde man zum Beispiel damit rechnen, dass die Teilchen, die bei einem Stoss massenhaft erzeugt werden, sich anziehen und deshalb unter etwas anderen Winkeln davonfliegen als ohne Gravitationskraft.

Auch eine nicht ausgeglichene Energiebilanz wäre eine mögliche Signatur für zusätzliche Raumdimensionen. Wenn man mit der Energie in die Nähe der Vereinigungsskala kommt, könnten bei einem Stoss nämlich nicht nur Photonen, sondern auch zahlreiche Gravitonen - also die Übermittler der Gravitationskraft - produziert werden. Anders als die Photonen, die an den dreidimensionalen Raum gebunden sind, könnten die Gravitonen in die zusätzlichen Dimensionen entschwinden und Energie aus unserer Welt entführen. Unter Umständen ist das Gastspiel der Gravitonen in der Schattenwelt aber nur von kurzer Dauer. Wie aus dem Nichts können sie wieder in unserer Welt auftauchen und in andere Teilchen zerfallen, die sich dann nachweisen lassen.

Am Fermilab in Chicago, wo sich der derzeit leistungsfähigste Beschleuniger der Welt befindet, hat eine Arbeitsgruppe um Gregory Landsberg nach solchen Signaturen gesucht - bisher ohne Erfolg. Aus dem Misserfolg lässt sich eine untere Grenze für die Energie ableiten, bei der die Vereinigung der Kräfte stattfinden soll. Diese Grenze von 1300 GeV ist allerdings nicht hoch genug, um

die zusätzlichen Dimensionen ausschliessen zu können. Deshalb ruhen die Hoffnungen der Physiker nun auf dem Large Hadron Collider, der im Jahr 2005 am Cern in Betrieb gehen soll. Mit diesem Beschleuniger wird man die Theorie einem wesentlich härteren Test unterziehen können.

Neben der Teilchenphysik liefern auch Astrophysik und Kosmologie Bedingungen, denen eine

Theorie mit zusätzlichen Dimensionen genügen muss. Solche Einschränkungen wird man vermutlich brauchen, um ein eindeutiges Verdikt gegen die Zusatzdimensionen zu sprechen. Denn theoretische Physiker sind findige Leute. So hat es in den letzten beiden Jahren zahlreiche Arbeiten gegeben, in denen die ursprüngliche Idee weiterentwickelt wurde. Entsprechend gross ist der Spiel-

raum für Theorien mit zusätzlichen Raumdimensionen geworden. Die heutige Situation hebt sich aber immer noch positiv von jenen Zeiten ab, als die zusätzlichen Raumdimensionen wegen ihrer extremen Kompaktheit überhaupt keinem Test zugänglich waren.