Michael Odenwalds Universum Antworten auf die Rätseldes Alls





Michael Odenwalds Universum

Michael Odenwalds Universum

Antworten auf die Rätsel des Alls

Besuchen Sie uns im Internet unter: www.herbig-verlag.de

© 2008 by F. A. Herbig
Verlagsbuchhandlung GmbH, München
Alle Rechte vorbehalten
Umschlaggestaltung: Wolfgang Heinzel
Umschlagmotiv: getty-images, München
Herstellung und Satz: VerlagsService Dr. Helmut Neuberger
& Karl Schaumann GmbH, Heimstetten
Gesetzt aus der 11,25/14,15 PunktMinion
Druck und Binden: GGP Media GmbH, Pößneck
Printed in Germany
ISBN 978-3-7766-2581-3

Inhalt

orwort	.9
rknall	1
Was war vor dem Urknall? 11	
Lässt sich am Urknall noch zweifeln? 17 Sind die Naturkonstanten gottgegeben? 25	
osmologie	\ 1
Ist unser Kosmos unendlich? 31	
Gibt es Paralleluniversen? 36	
Schöpfung ohne Ende 41	
Wohin steuert unser Universum? 47	
eltformel	3
Wird es je eine Weltformel geben? 53	
Warum ist die Stringtheorie revolutionär? 60	

Quan	ntentheorie	65
d V Is V	m Universum regiert der Zufall - oder loch nicht? 65 Vie entsteht Realität? 73 st Beamen möglich? 79 Vas ist Licht? 85 Vas ist es, das die Welt im Innersten rusammenhält? 89	
Grav	itation	93
V	Vie entstehen Gravitationskräfte? 93 Velche Kräfte bremsen die Pioneer-Sonden ab? 99 Voraus besteht ein Schwarzes Loch? 106	
Zeit	und Zeitreisen	15
•	Vas ist Zeit? 115 Können Menschen durch die Zeit reisen? 122	
Über	lichtgeschwindigkeit 1	31
n V	Sind Reisen mit Uberlichtgeschwindigkeit nöglich? 131 Vie die Natur ihr kosmisches Tempolimit aberschreitet 137	

143

Lässt sich aus dem Vakuum Energie gewinnen? 14 Gibt es freie Energie? 148 Liefert die kalte Fusion wirklich unendliche Energie? 153	13
Dunkle Energie und Dunkle Materie	159
Dunkle Energie - die treibende Kraft des Universums 159 Woraus besteht die Dunkle Materie? 165	
Raumfahrt	171
Können Raumschiffe interstellare Distanzen überbrücken? 171 Was will der Mensch im All? 177 Sind fremde Planeten für Menschen dauerhaft bewohnbar? 183 Wie die <i>ISS</i> Einschläge kosmischer Geschosse übersteht 188	
Außerirdische Zivilisationen	195
Können wir je erfahren, ob es Außerirdische gibt? Wie Außerirdische aussehen würden 204 Gibt es den geheimnisvollen Planeten X wirklich? Leben wir in der Matrix? 215	195 210

Vakuumenergie und kalte Fusion

Kosmische Katastrophen	221
Können kosmische Katastrophen die Erde vernichten? 221	
Die Abwehr der Killer-Asteroiden 230	
Himmelsphänomene	. 239
Der Stern von Bethlehem 239 Beeinflusst der Mond den Menschen? 244	
Register	252

Vorwort

Wie entstand das Universum, und vor allem: warum? Was ist Zeit? Kann es schon etwas vor dem Urknall gegeben haben, eine Art Vorläufer-Universum vielleicht? Gibt es Leben auf anderen Planeten, und wie könnten die Geschöpfe dort aussehen? Ändert der Mensch das Klima tatsächlich, oder ist die treibende Kraft hinter der globalen Erwärmung nicht doch die Natur?

Fragen wie diese beschäftigen sehr viele Menschen. Als Wissen schaftsredakteur des Nachrichtenmagazins *Focus* wurde dies für mich immer wieder deutlich: Nach Beiträgen zu kosmologischen Themen, aber auch zum Klimawandel erreichten stets die meisten Leserbriefe die Redaktion.

Viele Leser stellten überdies vertiefende Fragen oder regten weitere Artikel zu diesen Themen an. Daraus erwuchs die Idee, solche Fragen und Anregungen thematisch zu bündeln und im Rahmen einer Serie von Kolumnen in der *online-Ausgabe* von *Focus* zu beantworten. Sie begann im Herbst 2006 unter dem Titel *»Odenwalds Universum«* und umfasste bei Drucklegung dieses Buches 90 Beiträge.

Im vorliegenden Band sind die Antworten zu den wichtigsten und interessantesten Fragen aus den Bereichen Kosmologie, Astro- und Quantenphysik zusammengefasst. Daneben fanden Beiträge Aufnahme, die sich mit den Auswirkungen astronomischer Phänomene auf unsere Lebenswelt befassen, etwa mit dem Einfluss des Mondes auf Mensch und Natur. Für das Buch wurden die Texte aktualisiert, sodass sie den

neuesten Stand der Wissenschaft wiedergeben. In den Beiträgen werden bestimmte wissenschaftliche Sachverhalte und Theorien im Kontext der einzelnen Fragen mehrfach aufgegriffen. Deshalb war es unerlässlich, darin enthaltene Fachbegriffe, Daten und Fakten teilweise wiederholt im jeweiligen Zusammenhang zu erläutern. Der angenehme Nebeneffekt ist, dass sich das Blättern zu den Erklärungen in vorangehenden Texten erübrigt.

Heidelberg, im August 2008 Michael Odenwald

Urknall

Was war vor dem Urknall?

Die Frage führt nach heutigem Verständnis nicht nur an die Grenzen von Raum und Zeit, sondern noch darüber hinaus. Deshalb erklärten sich die Kosmologen bis vor Kurzem für die Suche nach Antworten als nicht zuständig. Am Rand des Universums, argumentierten sie, ende die Wissenschaft. Über alles, was darüber hinausgeht, könne man allenfalls spekulieren - oder das Feld den Theologen überlassen.

Diese Haltung hat sich in den letzten Jahren geändert. Neue kosmologische Modelle, die Entstehung, Struktur und Entwicklung des Universums erklären, verschoben die Grenzen unseres Wissens. Sie erlauben den Forschern auch einen zumindest theoretischen - Blick über unser Universum hinaus und damit auch zurück in eine mögliche Zeit vor dem Urknall. In dieser Urexplosion entstanden nach konventioneller Lehrmeinung Raum, Zeit und Materie gleichzeitig. Diesem Gedanken zufolge konnte zuvor nichts Materielles existiert haben. »Zu fragen: Was war vor dem Beginn des Universums?«, sagte einmal der britische Physiker Stephen Hawking, »ist so sinnlos wie die Frage: Was ist nördlich vom Nordpol?« Im Urknall als dem Punkt Null der Schöpfung laufen die Forscher gleichsam an eine Wand. Sie bekommen es nämlich mit der sogenannten Urknall-Singularität zu tun. Diese ergibt sich aus der Relativitätstheorie, die beschreibt, wie sich das seit dem Urknall auseinanderfliegende All durch das Wirken der Schwerkraft entwickelt. Lässt man den Film der Expansion rückwärts laufen, stürzt alle Materie (Sterne, Galaxien, Gaswolken) am Ende in einem winzigen Raumgebiet zusammen. Druck und damit die Temperatur steigen darin auf extreme Werte und gehen schließlich gegen unendlich. Diesen Zustand, der auch in Schwarzen Löchern herrscht, nennen die Physiker »Singularität«. Hätte es eine Welt vor dem Urknall gegeben, müsste diese Gluthölle jede Information darüber zerstört haben.

Unendliche Größen im Universum sind jedoch unphysikalisch und somit unsinnig. Deshalb versuchen die Astrophysiker, die Urknall-Singularität nach Möglichkeit zu umgehen. Einen ersten Versuch unternahmen die Bonner Astronomen Wolfgang Priester (er starb im Juli 2005) und Hans-Joachim Blome. Statt dem Urknall, sagen sie, habe es einen »Urschwung« gegeben. Ihr Modell beruht auf der Idee, dass es vor der Entstehung unseres Kosmos bereits ein anderes Universum gab. Es bestand ewig, enthielt aber keine Materie, sondern war einzig von Quantenfeldern erfüllt. Diese aber bestehen aus reiner Energie.

Doch auch Energie erzeugt Schwerkraft, dies ergibt sich aus Albert Einsteins wohl berühmtester Formel E = mc² (sie besagt, dass der Energiegehalt von Materie sich aus ihrer Masse und dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit ergibt). Unter ihrem Einfluss, so das rheinische Forscherduo, schrumpfte der Urkosmos langsam, bis er ein winziges Volumen mit hoher (aber nicht unendlicher) Energiedichte erreichte. Die geballte Energie detonierte, dabei entstand unser Kosmos samt der darin enthaltenen Materie. Diesen etwas sanfteren Urknall, in dem das ursprüngliche Universum in unseres überging, nannten Priester und Blome den Urschwung. Andere Forscher glauben, dass sich das Universum zyklisch aus-

dehnt und wieder schrumpft. Hat es die Durchgangsphase des Urschwungs durchlaufen, expandiert es so lange, bis die Schwerkraft seiner Massen die Ausdehnung bremst und schließlich umkehrt. Dann stürzt die Materie in einem Punkt zusammen und durchläuft den nächsten Urschwung. Diese Wiedergeburten des Alls könnte es schon seit ewiger Zeit geben.

Neuerdings versuchen einige Kosmologen, mithilfe der »Schleifen-Quantengravitation« einen Blick in die Zeit vor der Zeit zu erhaschen. Sie umschifft die Urknall-Singularität besonders elegant. Die Theorie entstand bei dem Versuch, die Relativitätstheorie mit der Quantentheorie zur »Quantengravitation« zu vereinigen. Dieses Formelwerk wäre die lange gesuchte »Weltformel«, die alle physikalischen Vorgänge im Kosmos beschreibt.

Der Schleifen-Quantengravitation zufolge setzt sich der Raum aus winzigen Quanten zusammen. Sie messen gerade eine Planck-Länge, das ist die kürzeste im Universum mögliche Entfernung. Sie beträgt 10³³ (ein billionstel trilliardstel) Zentimeter. (Generell bezeichnet die sogenannte Planck-Skala, benannt nach dem deutschen Physiker Max Planck, die kürzestmöglichen Zeitintervalle und Distanzen im Universum.)

Diese Abmessungen sind sehr klein, aber endlich, und sie können auch im Urknall nicht unterschritten werden. Entsprechend werden Dichte und Temperatur in einem Planck-Volumen (es entspricht 10 99 Kubikzentimetern) extrem hoch, doch nicht unendlich. Damit sind die Kosmologen die lästige Singularität los. Eine Konsequenz davon errechnete der deutsche Astrophysiker Martin Bojowald, der in den USA forscht. »Wir können die Zeit jetzt weiter zurückverfolgen, über den Urknall hinaus - sogar so lange, bis wir die negative Unendlichkeit erreichen«, erläutert er. »Das Universum hat somit keinen Anfang, es existiert ewig.«

Auch in diesem Modell ist der Urknall nur ein Durchgangsstadium, in dem sich ein früherer Kosmos in unser All umwandelte. In diesem Spiegeluniversum könnte es Sterne und Galaxien gegeben haben - und vielleicht sogar Leben. Im Lauf der Äonen zog es sich durch die Gravitation seiner Massen zusammen, bis es die geringst mögliche Ausdehnung von eben einer Planck-Länge erreicht hatte. Seine Existenz endete in jenem Feuerball, der unseren Kosmos gebar.

Womöglich ist unser Universum jedoch nur eine Blase in einem unendlichen Netzwerk von Universen, dem sogenannten Multiversum. Dieses Bild skizziert der kanadische Astrophysiker Lee Smolin, ein Miterfinder der Schleifen-Quantengravitation. Sterbende Riesensterne, so seine Idee, könnten jeweils ein »Baby-Universum« erzeugen. Am Ende seines Daseins kollabiert ein massereicher Stern unter dem Einfluss seiner eigenen Schwerkraft. Der Zusammensturz endet in einem Schwarzen Loch. Die Materie darin schnurrt nach Smolin's Berechnungen dabei auf ein Planck-Volumen zusammen. Dieser Prozess aber entspricht genau dem von der Schleifen-Quantengravitation beschriebenen Urschwung. Deshalb, so Smolin, entsteht jedes Mal, wenn irgendwo in den Tiefen des Alls eine Riesensonne kollabiert, ein neues Universum. Allein in unserer Milchstraße gibt es unzählige Schwarze Löcher. Träfe die Idee des Kanadiers zu, hätte jedes davon ein neues All hervorgebracht. Auch unser eigener Kosmos wäre durch einen Sternentod in einem Vorläuferuniversum geboren.

Fantastischer noch ist die Schöpfungsgeschichte, die der US-Physiker John Richard Gott und sein chinesischer Kollege Li-Xin Li ersannen. Ihr zufolge erschuf sich das Universum quasi selbst. Es soll aus einer geschlossenen Zeitschleife hervorgegangen sein, in der die Zeit noch keine Richtung hatte, sondern endlos kreiste. Das All hätte dann einen

Anfang, aber keinen ersten Moment. Heute hingegen ist der Zeitpfeil gerichtet und verläuft von der Vergangenheit zur Zukunft.

In diesem Modell gleicht die Raumzeit einem Stamm, von dem ein Ast abzweigt und zur Wurzel des Stamms wird. Solche selbstbezüglichen Vorgänge hat der niederländische Künstler M. C. Escher in vielfältiger Weise gezeichnet. Gotts Zeitschleife maß gerade eine Planck-Länge und war mit Quantenfeldern angefüllt. Irgendwann gab es eine zufällige Quantenfluktuation, das heißt, ein Quantenfeld änderte sprunghaft seinen Energiewert. Die Schwankung unterbrach das endlose Kreisen der Zeit. In einem ersten Urknall sprang ein Kosmos in eine raumzeitliche Existenz, von dem sich weitere Universen - darunter auch unseres - abspalteten.

Dass unser All aus einem mit fluktuierenden Feldern angefüllten Raum hervorging, glaubt auch der Kosmologe Gerhard Börner vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching bei München. In diesem »Überraum«, so Börner, könnte es immer wieder durch Quantenfluktuationen zu lokalen Urknällen kommen. Die betroffenen Gebiete würden nach der Explosion rasch expandieren. Ein Problem aber bleibt: Der Uberraum müsste schon ewig bestehen. »Was ewig existiert, muss man aber nicht erklären«, sagt Börner. »Die Antworten auf die Fragen nach dem Ursprung der Welt verlieren sich so in der Unendlichkeit.«

Werden wir je eine Chance haben, den Anfang der Welt wirklich zu verstehen? Schließlich übersteigen Begriffe wie Ewigkeit und Unendlichkeit unsere Vorstellungskraft bei Weitem. Eine Annäherung erscheint dennoch möglich. Immerhin gelang uns mit den heutigen Möglichkeiten schon ein winziger Blick über den Tellerrand unseres Kosmos hinaus. Diese Perspektive könnte sich mit neuen Teleskopen und Supercomputern noch beträchtlich erweitern. Ist aber einmal das

»Wie« der Schöpfung verstanden, bleibt noch die Frage, warum das Universum entstand. Sieht man vom Glauben an einen Schöpfergott ab (woher kommt übrigens er?), dürften wir spätestens da die endgültige Grenze der menschlichen Erkenntnisfähigkeit erreichen.

Lässt sich am Urknall noch zweifeln?

Den Urknall gab es mit Sicherheit. Das glauben jedenfalls die meisten Himmelsforscher. Dazu haben sie guten Grund: Anders als die meisten anderen kosmologisehen Theorien ist die Urknall-Hypothese mit Daten unterfüttert. Sie wurden hauptsächlich mit drei unterschiedlichen Beobachtungsmethoden gewonnen. Das Modell einer heißen Urexplosion, aus der Raum, Zeit und Materie hervorgingen, ruht deshalb auf gleich drei Säulen.

In seinen Grundzügen entstand es bereits im frühen 20. Jahrhundert. Als Erster postulierte der russische Physiker Alexander Friedmann, dass das Universum einen Anfang gehabt haben musste. Er hatte sich mit den Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins beschäftigt und bemerkte, dass sie einen Kosmos beschreiben, der - ausgehend von einem Anfangspunkt - ewig expandiert. Das war 1922. Einstein selbst ging demgegenüber von einem statischen, also unveränderlichen Universum aus, das seit ewiger Zeit existierte und weder Anfang noch Ende hatte.

Der belgische Priester und Physiker Georges Lemaitre führte ähnliche Studien durch. Im Jahr 1927 entdeckte er, dass sich aus seinen Berechnungen ein dynamisches Universum ergab, das sich ausdehnte. Lemaitre vertraute aber nicht nur seinen Formeln, sondern baute auch auf astronomischen Beobachtungen auf. Geliefert hatte sie der amerikanische Himmelsforscher Vesto Slipher, der 1912 erstmals die Rotverschiebung der Spektrallinien im Licht weit entfernter kosmischer Nebel-

flecken registrierte. Sie sollten sich später als eigenständige Galaxien entpuppen.

Sliphers Kollege Edwin Hubble ermittelte 1925 die Distanz zu dem bis dahin rätselhaften Nebel im Sternbild Andromeda. Zum Erstaunen des US-Forschers zeigte sich, dass dieser weit außerhalb unserer Milchstraße liegt. Später publizierte Hubble Entfernungsmessungen zu weiteren Galaxien, und 1929 fand er heraus, dass die Rotverschiebung ihres Lichts proportional zu ihrer Entfernung wächst. Damit war klar, dass die Galaxien weit entfernte Sternsysteme sind, die sich alle voneinander wegbewegen, ähnlich wie die Metallsplitter nach der Explosion einer Bombe. Die Theorie von der Expansion des Universums galt damit als bewiesen.

Nun verfolgte wiederum Georges Lemaitre die Bahnen der auseinanderstrebenden Galaxien mittels weiterer Berechnungen rückwärts. Dabei erkannte er, dass sie von einem einzigen Startpunkt aus davongeflogen sein mussten. Ihre Materie war folglich in diesem Punkt vereint. Lemaitre nannte die Materieballung, in der das Universum gleichsam mit einem einzigen Teilchen begann, das »Uratom«. Es war die erste eigentliche Urknall-Theorie. Dann aber war der logische Schluss, dass das All früher sehr viel kleiner und die Materie darin dichter gewesen sein musste. Somit war auch der Druck sehr hoch, und da Druck Wärme erzeugt, muss die Materie in dieser frühen Periode auch sehr heiß gewesen sein. In seinen Grundzügen glich dieses Modell einer Erklärung der Entstehung des Universums, die der griechische Philosoph Anaximander (610-546 vor Christus) ersann. Er glaubte, dass die Welt aus einem zeugungsmächtigen Keim des »Heißen und Kalten« entstand, die in einer Art Urflamme voneinander getrennt wurden.

Die Physiker George Gamow, Ralph Alpher und Robert Herman führten die neuzeitliche Theorie von der Entstehung des

Kosmos fort. In einer 1948 veröffentlichten Arbeit sagten sie vorher, dass es eine Strahlung geben müsse, die das ganze Universum durchdringt, als eine Art Nachleuchten des »Urknall-Lichtblitzes«. Tatsächlich wurde diese Ilintergrundstrahlung 1965 von Arno Penzias und Robert Woodrow per Zufall gefunden. Die beiden US-Physiker erhielten für ihre Entdeckung den Nobelpreis. Sie war eine grandiose Bestätigung der Theorie vom heißen Weltenbeginn.

Nun waren die ersten beiden Säulen als Basis der Urknall-Theorie errichtet, und bald kam eine dritte hinzu. George Gamow und auch andere Physiker erkannten, dass in der Urexplosion nur die Elemente Wasserstoff und Helium sowie Spuren von Lithium entstanden sein konnten. Ihr Modell sagte eine Zusammensetzung der Urmaterie aus 25 Prozent Helium und 75 Prozent Wasserstoff voraus (die schwereren Elemente stammen aus Fusionsreaktionen in Sternen und damit aus einer viel späteren kosmischen Epoche). Als durch astronomische Beobachtungen dieses Verhältnis der ersten Elemente in riesigen intergalaktischen Gaswolken nachgewiesen wurde, war der Triumph der Theorie von der Urexplosion komplett.

Gestützt wird sie auch von neueren Beobachtungen, insbesondere durch das Hubble-Weltraumteleskop. Dieses Weltraumauge blickt Milliarden von Lichtjahren hinaus ins All und damit - wegen der begrenzten Lichtgeschwindigkeit - ebenso viele Jahre zurück in die Vergangenheit. Deshalb sehen die Astronomen heute weit entfernte Objekte so, wie sie vor Milliarden von Jahren ausgesehen haben. Hubble Aufnahmen wie das berühmte »Deep Field« enthüllten, dass es im frühen Universum sehr viele kleine, unregelmäßig geformte Galaxien gab. Aus diesen Bausteinen entwickelten sich die mächtigen Spiralnebel und elliptischen Galaxien, die wir in unserer kosmischen Nachbarschaft sehen. Das Universum

durchläuft offenbar seit Jahrmilliarden eine Evolution. Würde es schon ewig bestehen, müssten alle Galaxientypen in sämtlichen Epochen im gleichen Verhältnis nebeneinander vorliegen.

Kann man angesichts dieser Beweise, die sich so wunderbar schlüssig aneinanderfügen, an der Urknall-Theorie noch zweifeln? Jawohl, man kann. Ob die Zweifel berechtigt sind, ist eine andere Frage. Die meisten Urknall-Skeptiker sind Privatgelehrte, die sich eine eigene Kosmogonie (also einen Mythos von der Entstehung der Welt) zurechtlegen. Daneben glauben religiös motivierte Zweifler, Gott habe das Universum auf übernatürliche Weise geschaffen. Schließlich gibt es sehr vereinzelt auch gestandene Naturwissenschaftler, die nicht an den Weltenbeginn in der Urexplosion glauben.

Ihre Galionsfigur ist der britische Astronom Sir Fred Hoyle. Mit seinen Kollegen Thomas Gold und Hermann Bond setzte er Gamows Theorie eine konkurrierende Idee entgegen: die »Steady-State-Theorie« (englisch »steady State« = gleichbleibender Zustand). Zwar akzeptierte Hoyle, dass sich das Universum ausdehnt. Es sollte aber ohne Anfang sein und schon ewig existieren. Dann müsste sich die Materie darin bereits extrem verdünnt haben, was offensichtlich aber nicht der Fall ist. Deshalb erklärte Hoyle, im All würde fortlaufend neue Materie entstehen, und zwar gerade in der richtigen Menge, um einerseits dessen Expansion voranzutreiben, andererseits die Materiedichte darin in einem »gleichbleibenden Zustand« zu erhalten. Ironischerweise war es Hoyle, der den Begriff »Urknall« (englisch »big bang«) prägte. Er verwendete ihn im Februar 1950 in einer BBC-Radiosendung, um seine Gegner und ihre These von der Urexplosion lächerlich zu machen.

Als die Hintergrundstrahlung entdeckt wurde, musste Hoyle seine Steady-State-Theorie überarbeiten, denn sie konnte das mutmaßliche Nachleuchten des Urknalls nicht erklären. Mit

seinen ehemaligen Schülern Jayant Narlikar und Geoffrey Burbidge entwarf er die »Quasi-Steady-State-Theorie«. Die Hintergrundstrahlung, meinte das Forschertrio, rühre von kleinen Eisennadeln her, die bei Supernova-Explosionen entstehen. Diese könnten die Infrarotstrahlung junger Sterne absorbieren und als Hintergrundstrahlung wieder aussenden. Nur konnte keine astronomische Beobachtung die Nadeln jemals nachweisen.

Im Jahr 1990 erweiterten Hoyle und seine Mitstreiter ihre Theorie erneut. Zuvor hatten Himmelsforscher überall im Kosmos Spuren heftiger Energieausbrüche gefunden. So schleudern viele Galaxien gewaltige Materieströme (sogenannte Jets) ins All. Aus dem Zentrum der elliptischen Riesengalaxie M87 etwa - sie ist ca. 50 Millionen Lichtjahre entfernt und die hellste Sterneninsel im Virgo-Galaxienhaufen - schießt ein 5000 Lichtjahre langer Jet. Laut Hoyle wird bei diesen Energieausbrüchen die Materie neu geschaffen, die die Massendichte im All auf dem stets gleichen Niveau halten soll. Diese Schwaden würden so zu Brutstätten für neue Galaxien.

Auch die großräumige Struktur des Universums wollte Hoyle mit seiner Quasi-Steady-State-Theorie erklären. Wie die Astronomen erst vor relativ kurzer Zeit entdeckten, sind Galaxien und Galaxienhaufen im All in riesigen Waben angeordnet, deren Wände sich oft über mehrere Hundert Millionen Lichtjahre ausdehnen. Dazwischen klaffen fast runde Leerräume mit Durchmessern von bis zu 100 Millionen Lichtjahren. Niemand weiß, welche titanischen Kräfte unser Universum wie einen Schwamm durchlöcherten. Hoyle sieht hier das von ihm genannte Schöpfungsfeld am Werk: In sehr dichten Materieanhäufungen, postulierte er, erzeuge es ausreichend Energie, um einen Mini-Urknall auszulösen. Dessen Schockwellen würden die Materie in seiner Umgebung

auseinandertreiben und so die Hohlräume und Massenverdichtungen erzeugen.

Daraus leitete Hoyle das Modell eines sich zyklisch erneuernden Universums ab. Die Mini-Urknälle, so seine Überlegung, beschleunigen die Ausdehnung des Alls. Dadurch wiederum verdünnt sich die Materie, sodass die Urknallrate sinkt. Nun wird die Expansion gebremst. Jetzt kann die Massendichte erneut ansteigen - der Zyklus beginnt von vorn. Seit einer Billion Jahren sollen auf diese Weise immer neue Explosionswellen das Universum erschüttern. Doch diese Schöpfungsakte müssten Strahlungsfelder erzeugen, die sich der Hintergrundstrahlung überlagern. In den Daten des Weltraumteleskops WMAP von der kosmischen Mikrowellenstrahlung findet sich jedoch kein solches Muster.

Der endgültige Test für die Theorie steht aber noch aus: Jede Urexplosion erzeugt auch Gravitationswellen. In einigen Jahren wird es Detektoren geben, die solche flüchtigen Stauchungen der Raumzeit messen können. Dann wird sich zeigen, ob es Hoyles Mini-Urknälle gibt oder - was wahrscheinlicher ist - eben nicht. Insgesamt arbeitete die Kosmologie also gegen das Steady-State-Modell, doch bis zu seinem Tod im August 2001 blieb Fred Hoyle der wohl überzeugteste (und zum Schluss sehr einsame) Gegner der Urknall-Theorie.

Er blieb so stur, weil er Materialist war. Ihn störte die Idee vom punktuellen Weltenbeginn aus philosophischen Erwägungen. Wenn das Universum einen Anfang hat, räsonierte er, muss dieser eine Ursache gehabt haben, und damit müsste es einen Schöpfer gegeben haben. Diesen Gedanken lehnte er ab, denn an die Bibel glaubte er genauso wenig wie an den Urknall, den er für eine Art »religiöser Indoktrination« hielt. Andererseits war er der Meinung, dass es das Universum nicht aus bloßem Zufall gibt. Ein so erhabenes Gebilde müsse aber ewig existieren und könne nicht einfach irgendwann begonnen haben.

Ähnlich argumentierten auch andere Forscher, unter ihnen der englische Astronom Arthur Eddington. Der erklärte: »Die Idee eines plötzlichen Anfangs der gegenwärtigen Ordnung der Natur stößt mich philosophisch ab.«

Auch an der physikalischen Begründung der Urknall-Hypothese zweifelten einige Forscher. So glaubte der Schweizer Astronom Fritz Zwicky, die Rotverschiebung des Lichts ferner Galaxien werde nicht durch die kosmische Expansion verursacht, sondern durch die sogenannte Lichtermüdung. Lichtwellen, vermutete Zwicky, treten bei ihrer langen Reise durch die Raumzeit mit der Schwerkraft in Wechselwirkung. Durch diese »Gravitationsreibung« verlieren sie proportional zu der zurückgelegten Entfernung an Energie. Dabei werden sie immer langwelliger und verschieben sich in den roten und schließlich infraroten Bereich des Spektrums. Zwickys Idee stützte die Steady-Stäte-Theorie zunächst. Heute ist sie indes überholt, denn als Ursache der Rotverschiebung erkannten die Kosmologen eindeutig die Ausdehnung des Universums. Neuerdings knüpfen einige Forscher wieder an Hoyles philosophisch begründete Ablehnung des Urknalls an. Zu ihnen zählt der Physik-Nobelpreisträger Robert Laughlin von der Stanford Universität. Zwar will er nicht an den drei Säulen des Urknall-Modells rütteln. Denn sie gründen sich, so bekennt er, auf harte Daten. Nur das daraus resultierende Urknall-Szenarium lehnt er ab, denn dieses sei nur »eine theoretische Synthese aus den Daten«, und damit letztlich »nichts als Marketing« für die unter den Kosmologen vorherrschende Meinung. Fragen wie »Woher kommen wir?« und »Wie entstand das Universum?« gelten ihm als quasireligiös, weil sie nicht mit Daten zu beantworten sind. Alternative Erklärungen bleibt Laughlin indes schuldig.

Da mag es ihn freuen, dass Kosmologen kürzlich ein auf Beobachtungen fußendes Argument gegen den Urknall fanden.

Daten des Weltraumteleskops WMAP zeigen, dass große Galaxienhaufen keine Spuren (»Schatten«) in der kosmischen Hintergrundstrahlung hinterlassen haben. Das aber müssten sie, wenn die gegenwärtigen Urknall-Theorien stimmen sollen. Galaxienhaufen, die näher an der Erde stehen, schirmen die Strahlung weiter entfernter Haufen ab, aus deren Richtung sollte die Strahlungsintensität folglich geringer sein. »Unter den 31 Galaxienhaufen, die wir untersucht haben, zeigten einige einen Schatteneffekt, andere zeigten ihn nicht«, sagt Studienleiter Dr. Richard Lieu von der Universität von Alabama in Huntsville. Eine konventionelle Erklärung für das Phänomen steht noch aus.

Unterm Strich aber, so lässt sich festhalten, hat die Urknall-Theorie keinen ernsthaften Rivalen. Damit bleibt es bis auf Weiteres bei dem Modell, demzufolge Zeit, Raum und Materie vor 13,7 Milliarden Jahren gemeinsam aus einer ursprünglichen Singularität heraus entstanden. Nur: Was den Anstoß für die Urexplosion gab, ist nach wie vor das größte Mysterium für die Menschheit, das die Wissenschaft bislang nicht einmal annähernd zu erklären vermag.

Sind die Naturkonstanten gottgegeben?

Warum gibt es etwas und nicht nichts? Und: Warum sind wir, die Menschen, hier? Darüber grübeln Philosophen und Naturforscher schon seit der Antike. Endgültige Antworten hat noch niemand gefunden. Doch immerhin ermöglichen physikalische Theorien eine Annäherung an diese Mysterien. Unsere Existenz verdanken wir dem unglaublich fein abgestimmten Zusammenspiel der Naturkräfte und Naturkonstanten. Ihre Werte wurden im Augenblick des Urknalls festgelegt, seither bestimmen sie die Entwicklung des Kosmos. Ihr Zusammenwirken ließ das All so werden, wie wir es kennen. Wären sie nur geringfügig anders beschaffen, würde das Universum völlig anders aussehen. Lebewesen, die Planeten, auf denen sie existieren, und die Sonnen, um die diese Trabanten kreisen, würde es nicht darin geben.

Dies lässt sich am Beispiel der »Starken Kraft« illustrieren. Sie hält die Atomkerne zusammen. Wäre sie nur um wenige Prozent stärker, gäbe es keinen Wasserstoff mehr im All: Alle Wasserstoffatome, die im Urknall entstanden, wären nach kurzer Zeit zu Helium verschmolzen. Bei einem geringeren Wert hätten sich hingegen nie Atome bilden können. In beiden Fällen würde es keine Sterne geben und damit keine schwereren Elemente wie den Lebensgrundbaustein Kohlenstoff. Denn massereiche Atome werden in den Sternen aus leichteren Elementen erzeugt.

Für unseren Alltag ist die Elektromagnetische Kraft am wichtigsten, denn sie lässt unter anderem den elektrischen Strom

fließen. Wäre ihr Wert geringfügig anders, gäbe es weder stabile Atome noch chemische Reaktionen und folglich auch kein Leben. Dass Planetensysteme und Galaxien nicht auseinanderfliegen, bewirkt die Gravitation. Sie hält uns auch auf der Erde fest und verhindert, dass wir aufgrund der Fliehkräfte, die durch Erdrotation entstehen, ins All geschleudert werden. Wäre sie stärker, dann gäbe es das Universum nicht, denn es wäre durch die Anziehungskraft der darin enthaltenen Massen rasch wieder kollabiert. Bei einer schwächeren Gravitation hätte sich die Materie dagegen nach dem Urknall zu einem dünnen Gasnebel verflüchtigt. Galaxien, Sterne oder Planeten können in einem solchen Kosmos nicht entstehen.

Das größte Rätsel für die Kosmologen ist indes der Wert der »Kosmologischen Konstanten«. Diesen Begriff prägte Albert Einstein. Er bezeichnete damit eine Kraft, die als eine Art Antigravitation das Universum auseinandertreibt. Nach neueren Erkenntnissen der Forscher beschleunigt sie die mit dem Urknall begonnene kosmische Expansion sogar. Ihre Stärke lässt sich mithilfe der Quantenmechanik berechnen. Wie sich zeigte, ist dieser theoretische Wert um den Faktor 10¹²⁰ (also eine 1 mit 120 Nullen) größer als die Kraft, welche die Astronomen tatsächlich beobachten. Wäre im Urknall der höhere Wert realisiert worden, hätte sie den Kosmos auseinandergerissen - Sterne und Galaxien wären darin nie entstanden. Im Umkehrschluss erfolgte in Bezug auf die Kosmologische Konstante eine Feinabstimmung, die auf 120 Dezimalstellen genau ist.

Insgesamt sind 37 Naturkräfte und Naturkonstanten bekannt. Wieso aber wirken sie so reibungslos zusammen, dass sie Leben hervorbringen? Womöglich, sinnierten manche Kosmologen, ist dies der Zweck des Universums. Denn mit den intelligenten Kreaturen, die es auf unserem und vermutlich

noch vielen anderen Planeten gibt und die den Kosmos beobachten und über seine Beschaffenheit und seinen Ursprung nachdenken, schafft es sich gleichsam ein Bewusstsein seiner selbst. Aus solchen Überlegungen heraus formulierten die Forscher das »anthropische Prinzip«. Es lautet: »Unser Universum muss so beschaffen sein, dass es die Entstehung von Beobachtern in manchen Phasen erlaubt.«

Anfangs drückte das anthropische Prinzip die Hilflosigkeit der Himmelsforscher aus. Ihr Problem ist, dass sich die Konstanten nicht in tiefere Zusammenhänge einbetten lassen. Sie sind nach heutigem Wissen völlig unabhängig voneinander und können nicht aus anderen Größen hergeleitet werden, die dann wahrhaft fundamental wären. Für diesen Umstand sind zwei Erklärungen denkbar: Zum einen könnte es noch unbekannte Kräfte geben, die der Natur innewohnen und die Feinabstimmung gezielt bewirken. Dies bedeutet jedoch letztendlich, dass ein Schöpfer die Werte der Konstanten festgelegt hat und zwar so, dass sie Leben herbeiführen. Dieser Gedanke beschäftigte schon Albert Einstein. »Was mich eigentlich interessiert, ist, ob Gott die Welt hätte anders machen können; das heißt, ob die Forderung der logischen Einfachheit überhaupt eine Freiheit lässt«, äußerte er einmal.

Die alternative Idee ist, dass die passgenauen Werte der Konstanten einem unglaublichen Zufall entspringen. Daran wollen die Wissenschaftler aber erst recht nicht glauben. Manche versuchten, die Wahrscheinlichkeit dafür zu berechnen. Der britische Physiker Roger Penrose etwa kam zu dem Ergebnis, dass die Wahrscheinlichkeit dafür 10 hoch 10¹²³ beträgt. Dies bedeutet, dass ein Schöpfer 10 hoch 10¹²³ Mal würfeln muss, bis sich zufällig genau die Konfiguration unseres Universums mit sämtlichen Teilchen und Feldern ergibt. Würde diese Zahl mit Ziffern von nur der Größe eines Protons ausgeschrieben, würde sie den Durchmesser des Universums übertreffen. Die

Wahrscheinlichkeit für eine Zufallsgeburt unseres Alls ist also von null kaum verschieden.

Für Kreationisten ist diese Rechnung ein Geschenk des Himmels. Mit ihrer Hilfe wollen sie »beweisen«, dass der Kosmos nicht durch natürliche Prozesse entstanden sein kann, sondern dass Gott ihn erschaffen haben muss. Die Naturwissenschaftler kommen aber lieber ohne eine übernatürliche Ursache der Entstehung des Universums aus. Inzwischen haben sie einen Weg ersonnen, der den göttlichen Schöpftingsakt umgehen könnte. Womöglich, so ihre Überlegung, gibt es nicht nur einen Kosmos, sondern Myriaden davon, die ein übergeordnetes Multiversum bilden. Darauf weist die sogenannte Stringtheorie (von englisch »string« = Saite) hin. In diesem Ideengebäude gelten die Elementarteilchen als winzige eindimensionale Fäden, die aber heftig schwingen. Je nach Frequenz und Schwingungsmodus bilden sie die bekannten Teilchen wie Proton oder Elektron. Der Haken dabei: Für die Formeln der Theorie gibt es bis zu 10⁵⁰⁰ verschiedene Lösungen.

Zunächst ließ diese ungeheure Zahl die Forscher verzweifeln. Mit einer solchen Fülle möglicher Lösungen, dachten sie, könne die Theorie unser All niemals zutreffend und eindeutig beschreiben. Später aber erkannten sie, dass genau diese Vielfalt aus dem »anthropischen Dilemma« herausführen könnte - nämlich dann, wenn jede Lösung einen eigenen Kosmos beschreibt. Jeder davon besäße jeweils andere Eigenschaften. Festgelegt würden sie durch Naturkonstanten, die in jedem Universum anders ausfallen. Tatsächlich bringt jede Version der Stringtheorie andere Teilchen und Kräfte hervor. So könnte es Kosmen geben, die von strukturlosem Gas erfüllt sind, andere dagegen von dichten Ballungen exotischer Teilchen. Einige kollabierten unmittelbar nach ihrer Entstehung, manche haben nur zwei Dimensionen oder mehr als drei. In

dieser Landschaft der Universen gibt es nur wenige, in denen lebensfreundliche Konstanten realisiert sind. Dazu zählt unseres, und womöglich ist es sogar das Einzige. Das anthropische Prinzip wäre damit erfüllt, weil wir nur hier, in dem für uns maßgeschneiderten All, existieren können und sonst nirgends. Einige dieser fremden Räume könnten allerdings von exotischen Lebensformen bevölkert sein. Der Fantasie sind dabei keine Grenzen gesetzt. So glauben manche Forscher, dass es Lebewesen geben könnte, die aus magnetisch zusammengehaltenen Plasmawolken oder noch fremdartigeren Gebilden bestehen. Vielleicht besteht das Multiversum auch aus einem unendlichen Netz verzweigter Universen, die unentwegt durch quantenphysikalische Prozesse auseinander hervorgehen.

Die Frage, warum wir hier sind, wäre damit beantwortet: Das Universum hat uns gewissermaßen eingeladen und für unseren Auftritt die Bühne bereitet. Die wohl noch wichtigere Frage, warum es überhaupt etwas gibt, bleibt aber offen. Träfe die Idee mit einer unendlichen Abfolge von Kosmen zu, die sich fortpflanzen, würde das Problem nur zurückgereicht in einen Urkosmos - oder in die Ewigkeit. Dann aber würden wir nie erfahren, woher das Universum kommt und warum es entstand.

Kosmologie

Ist unser Kosmos unendlich?

ie wahre Größe des Universums kennt niemand. Es könnte endlich sein, aber auch unendlich. Dennoch versuchen die Kosmologen einige Annäherungen an die Frage. Ihr Ausgangspunkt ist das für uns beobachtbare All. Dessen Größe wird von seinem Alter, der Lichtgeschwindigkeit und der Expansion des Universums bestimmt. Nach neuesten Erkenntnissen der Forscher ereignete sich der Urknall vor 13,7 Milliarden Jahren. Folglich sind für uns nur jene Bereiche des Kosmos sichtbar, deren Licht uns in der seit dem Urknall vergangenen Zeit erreichen konnte. Diese kosmische Region entspricht einer Kugel mit einem Radius von 13,7 Milliarden Lichtjahren. In dieser Distanz liegt der »kosmische Horizont«, hinter den die Astronomen nicht blicken können. Das Universum ist aber mit ziemlicher Sicherheit deutlich größer. Denn die kosmische Expansion dehnte den Raum in dieser Zeit zusätzlich. Ihre Ursache ist die im Urknall freigesetzte Energie, die den Raum auseinandertreibt.

Von dem expandierenden Raum werden die Galaxien mitgetragen wie Rosinen in einem aufgehenden Teig. Dies bedeutet aber, dass das von ihnen ausgesandte Licht die Ausdehnung des Raums mitmacht. Deshalb legt ein Lichtteilchen (Photon) eine größere Strecke zurück als die Distanz, die ein fernes Sternensystem zu dem Zeitpunkt hatte, als das Photon dort ausgesandt wurde. Das lässt sich anschaulich machen durch eine

Ameise (entspricht dem Lichtteilchen), die über ein Gummiband läuft, das gleichzeitig gedehnt wird (expandierendes Universum).

Der von der Ameise zurückgelegte Weg ist nicht nur ihre Geschwindigkeit relativ zum Gummiband mal der Zeit, sondern zusätzlich noch die Strecke, um die sich das Gummiband in der gleichen Zeit dehnte. Werden die Expansionsrate des Alls (festgelegt durch die sogenannte Hubble-Konstante) sowie die Kosmologische Konstante, die seit einiger Zeit die kosmische Expansion beschleunigt, berücksichtigt, ergibt sich eine Größe des Universums von 42 bis 48 Milliarden Lichtjahren. Diesen Raum nennen die Forscher das Hubble-Volumen. Was außerhalb desselben liegt, ist uns prinzipiell nicht zugänglich. Es spricht aber nichts gegen die Annahme, dass sich die bekannten Strukturen unseres Kosmos - Galaxien, Galaxienhaufen, Sterne etc. - dort draußen fortsetzen.

Noch ein anderer Faktor ist für die Größe des Universums entscheidend - nämlich seine Gestalt (fachsprachlich: Topologie). Nach Einsteins Relativitätstheorie krümmt Materie den Raum. Ist die Massendichte im All hoch, ist die Krümmung positiv, im Extremfall sogar so stark, dass der Raum in sich zurückläuft und eine abgeschlossene Kugel bildet. Er hätte dann zwar keine Grenze, wäre aber endlich (so wie unsere Ameise an keine Grenze stoßen würde, wenn sie um einen Ball läuft).

Es sind aber auch andere Topologien denkbar. In den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall war das Universum noch winzig klein. Die Materie lag hoch komprimiert vor, entsprechend stark war die Gravitation. In diesem extremen Zustand gab es starke Quantenfluktuationen, die das All mit einer Art Quantenschaum erfüllten: Winzige Materieblasen bildeten sich und vergingen wieder, dazwischen lagen fast materiefreie Räume. Diese physikalischen Bedingungen

könnten dazu geführt haben, dass sich kleine Raumabschnitte ineinander verschlangen oder miteinander verknoteten. Dann hätte der Raum eine viel komplexere Gestalt als die einer Kugel: Er könnte ring- oder brezelförmig sein, einen Torus bilden wie der Schlauch eines Autoreifens oder gar tatsächlich aussehen wie ein Wollknäuel.

In einem torusförmigen Kosmos beispielsweise würde ein Raumschiff, das von der Erde losfliegt, um das Universum zu umrunden, sich unserer Milchstraße quasi von hinten wieder nähern. Weil Lichtstrahlen den gleichen Weg nehmen, würden wir unsere Heimatgalaxis auch in den Tiefen des Alls sehen können. Bei einer ähnlichen Geometrie, etwa in einem Spiegelkabinett, kann sich ein Mensch selbst auf den Hinterkopf schauen. Tatsächlich begannen Astronomen bereits nach einem oder mehreren Abbildern unserer Milchstraße am Himmel zu suchen. In diesem Fall wäre das beobachtbare Universum doch wesentlich kleiner als bislang angenommen, und die entfernten Galaxien wären keine weit entfernten »neuen« Sternsysteme, sondern Doppelbilder von Galaxien, die unserer Milchstraße recht nahe liegen. Wegen des kreisförmig gekrümmten Lichtwegs könnten wir sie in ihren vergangenen Zuständen sehen.

Allem Anschein nach ist der Raum in unserem Hubble-Volumen jedoch flach oder allenfalls unmerklich gekrümmt, er weist also keine gekrümmte oder gar verknotete Topologie auf. Dies legen jedenfalls die Daten der Raumsonde WMAP nahe. Sie vermaß die kosmische Mikrowellen-Hintergrund-Strahlung. Ein Universum mit einer nur unmerklichen Krümmung müsste deutlich größer sein als das Hubble-Volumen, es ist aber endlich. Denn eine schwache Krümmung bedeutet, dass das All einer Kugel mit einem riesigen Radius gleicht. Ein völlig flacher Raum kann indes unendlich groß sein. In diesem Fall wäre unser beobachtbarer Kosmos nur eine winzige

Raumzeit-Blase, hervorgegangen aus einem lokalen Urknall. Oder das Universum ist Teil eines »Multiversums«, das zahllose Paralleluniversen enthält.

In einem unendlichen All aber sollte sich die Geschichte jeder beliebigen Region unendlich oft wiederholen. Diese Idee hat eine bizarre Konsequenz: Es müsste in riesigen Abständen kosmische Blasen geben, die der unseren bis aufs Haar gleichen. Der US-Kosmologe Max Tegmarkhat errechnet, in welcher Entfernung sich die nächste unserer Zwillingswelten befinden müsste. Dazu kalkulierte er, wie viele Quantenkonfigurationen sich im Universum ergeben könnten. In ein Hubble-Volumen passen 10^{118} (eine 1 mit 118 Nullen) Protonen. Sie ordnen sich in jeder dieser Welten unterschiedlich zueinander an. Kosmen, in denen sich die in unserem All vorhandenen Konfigurationen wiederfinden, liegen entsprechend in aberwitzigen Entfernungen. Darin gäbe es dann eine wunderschöne Spiralgalaxis als ein exaktes Abbild unserer Milchstraße. In ihr leben auf einem Blauen Planeten, der um eine kleine, gelbe Sonne kreist, Menschen.

Es sind Kopien unserer selbst. Ein Zwilling eines beliebigen Menschen könnte laut Tegmark in einer 10 hoch 10^{25} Kilometer entfernten Galaxis leben. Ein Doppelgänger-Volumen von 100 Lichtjahren Radius sollte in 10 hoch 10^{89} Kilometer Distanz liegen, ein mit unserem identisches Inseluniversum befände sich unvorstellbare 10 hoch 10^{115} Kilometer von uns entfernt. Der Durchmesser unseres beobachtbaren Universums beträgt demgegenüber umgerechnet gerade 4 mal 10-Kilometer. Bei diesen unvorstellbaren Entfernungen ist es ausgeschlossen, dass wir je einen unserer Doppelgänger treffen.

Diese Vorstellungen verwirren die Sinne. Um solche Dimensionen zu erfassen, reicht unser Verstand nicht aus. Gleichwohl wollen die Astronomen herausfinden, welches ihrer

Modelle zutreffend ist. So könnten genauere Messungen der kosmischen Mikrowellen Strahlung tatsächlich Auskunft über die Topologie unseres Universums geben, und damit auch über seine Größe. Auch wenn sich dabei herausstellt, dass unser All klein und endlich ist, gibt es eine gute Nachricht: Das Hubble-Volumen, unsere kosmische Heimat, wird pro Jahr um ein Lichtjahr größer.

Gibt es Paralleluniversen?

Stephen Hawking, der gelähmte britische Physiker von Weltrang, ist durch ein Nervenleiden an den Rollstuhl gefesselt. Seine Behinderung konnte ihn aber nicht von amourösen Ideen abhalten. So spielte er einmal als Gaststar in einer Episode der Science-Fiction-Serie "Star Trek" mit. Gemäß dem Drehbuch musste er dabei mit seinen großen Vorgängern Isaac Newton und Albert Einstein sowie der "Star Trek"-Figur Commander Data pokern. Später ließ Hawking Marilyn Monroe so in ein Szenenfoto montieren, dass sie ihm auf dem Schoß sitzt.

In einem Interview darauf angesprochen, erklärte Hawking, es sei durchaus denkbar, dass diese Szene zur Realität geworden sei oder noch werde. Denn einigen physikalischen Theorien zufolge sei jeder erdenkliche Verlauf der Geschichte möglich, nur spiele sich jede Version davon in einem eigenen Universum ab. So könne es einen Kosmos geben, in dem er nicht nur Newton und Einstein beim Pokern Geld abknöpfte, sondern Marilyn auch heiratete. In einem weiteren Parallelraum mit einem anderen Geschichtsverlauf nehme er stattdessen Cleopatra zur Frau.

Die von Hawking bemühte Idee, es könne eine unendliche Vielzahl von Universen geben, leitet sich aus der Quantenmechanik ab. Als Erster veröffentlichte 1957 der US-Mathematiker Hugh Everett ein solches Modell. Seine »Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik« besagt, dass sich die Welt jedes Mal, wenn sich quantenmechanische Pro-

zesse ereignen, in zwei oder mehr Universen aufspaltet. An solchen Punkten verzweigen sich die Weltläufe. Daraus folgt, dass auch die persönliche Geschichte eines Menschen in jedem Universum anders verläuft. Wer hier ein armer Schlucker ist, könnte in der Parallelwelt Milliardär sein, oder - wie Hawking - einen Star ehelichen. Auf quantenmechanischer Ebene bedeutet dies, dass jedes Teilchen in jedem der neu entstandenen Kosmen einen jeweils eigenen Pfad verfolgt. Die Gesamtheit dieser Parallelwelten heißt »Multiversum«.

Everetts Vielwelten-Theorie gründet sich auf ein spezielles Phänomen der Quantentheorie. Diese beschreibt ein physikalisches System nicht nur mittels der Teilcheneigenschaften, sondern auch als Welle, genauer gesagt, wird sein Zustand als Wellenfunktion ausgedrückt. Dabei kann das System mehrere Zustände zugleich einnehmen, die sich überlagern. Erst wenn diese Eigenschaften gemessen werden, entscheidet sich, welchen Eigenzustand das System annimmt.

In einem berühmt gewordenen Gedankenexperiment verdeutlichte der österreichische Physiker Erwin Schrödinger die absurden Konsequenzen dieser geheimnisvollen Doppelidentität der Quanten. In einer Kiste befinden sich eine Katze, eine Giftphiole und ein Behältnis mit einem instabilen Atomkern, der innerhalb einer bestimmten Zeitspanne mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zerfällt. Ein Geigerzähler registriert den radioaktiven Zerfall des Kerns. Er steuert über ein Relais einen Hammer, der die Phiole zertrümmert und dadurch das Gift freisetzt. Zerfällt der Kern, stirbt die Katze.

Bis jemand die Kiste öffnet - also bis zur »Messung« des Systems -, befindet sich der Kern in den sich überlagernden Zuständen »zerfallen« und »nicht zerfallen«. Ergo ist auch die Katze zugleich tot *und* lebendig. Erst bei der Messung entscheidet sich der Zustand des Systems, und beim Öffnen der

Kiste findet der Experimentator Schrödingers Katze tot *oder* lebendig vor. Zerfällt das Atom, »entscheidet« es sich laut Everett aber nicht für einen eindeutigen Zustand, sondern erzeugt ein neues Universum, in dem es intakt fortbesteht. In unserer Welt stirbt die Katze also, im Parallelraum aber lebt sie weiter.

Stephen Hawking selbst entwarf ein anderes Modell des Multiversums. Der Rand unseres Kosmos, erklärt er, befindet sich in ständigem Aufruhr. Er schlägt gewissermaßen Wellen, und manchmal überschlägt sich eine solche Welle ähnlich wie ein Brecher. Sie läuft dabei in sich selbst zurück und bildet eine Blase. Dieses winzige Raumzeit-Gebilde kann sich von unserem Kosmos abschnüren. Es bläht sich auf und beginnt zu expandieren. So wird aus der winzigen Blase ein neues Universum, der Prozess würde von späteren intelligenten Bewohnern darin als Urknall interpretiert.

Träfe dies zu, brächte unser Universum aus den sich abschnürenden Blasen an seinem Rand fortwährend Tochteruniversen hervor. Mit diesen könnte es durch sogenannte Wurmlöcher verbunden sein. Durch solche Raumzeit-Tunnel ist theoretisch ein Übergang von einem zum nächsten Kosmos möglich. Deshalb beschreiben Science-Fiction-Autoren Wurmlöcher gern als Transportwege, durch die Raumschiffe fliegen können. Sie bilden dabei Abkürzungen zu weit entfernten Bereichen des Universums - so wie der Weg eines Wurms zwischen zwei gegenüberliegenden Punkten auf einem Apfel viel kürzer ist, wenn er sich quer durch die Frucht frisst, anstatt an der Oberfläche entlang zu kriechen.

Praktisch funktioniert das leider nicht. Denn die Wurmlöcher sind winzig, viel kleiner als der Durchmesser eines Atoms. Um sie auszudehnen und stabil zu halten, bedarfes manchen kosmologischen Modellen zufolge negativer Energie, wobei niemand weiß, ob es diese tatsächlich gibt.

Verursacht wird das Tohuwabohu am Rande des Alls durch die Vakuumenergie. Selbst scheinbar leerer Raum ist nie völlig leer, auch wenn sich keine Materie darin befindet. Vielmehr enthält er eine gewisse Grundenergie. Nach den Regeln der Quantenmechanik können aus dem Vakuum sogenannte virtuelle Teilchen entstehen, beispielsweise Elektronen und Positronen, die aber sofort wieder vergehen. Diese Vorgänge gibt es wirklich, wie durch eine Reihe von Experimenten und physikalischen Beobachtungen nachgewiesen wurde. Die Vakuumenergie lässt den Raum regelrecht sprudeln, und zwar umso stärker, je kleiner das betrachtete Volumen ist. Im kleinsten im Kosmos möglichen Raumbereich - also auf der Planck-Skala - führt der wilde Tanz des Vakuums dann zu den Abschnürungen.

Hätte Hawking recht, würde sich ein unendliches Netz verzweigter Universen durch die Unendlichkeit erstrecken, das vielleicht schon seit ewiger Zeit existiert. Unablässig sprießen aus den bestehenden Kosmen neue hervor. Die Unendlichkeit bietet ausreichend Raum dafür - auch wenn dies unsere Vorstellungskraft sprengt. Wir haben nach heutigem Wissen aber keine Chance, die Existenz der anderen Universen nachzuweisen oder gar eines davon zu erkunden. Eine ähnliche Idee entwickelte der kanadische Kosmologe Lee Smolin. Nach seiner Theorie gehen neue Kosmen aber nicht aus Vakuumblasen hervor, sondern aus Schwarzen Löchern.

Eine weitere Gattung von Paralleluniversen ergibt sich aus der sogenannten Membrantheorie. Sie ist eine Erweiterung der Stringtheorie. Ihre Modelle reichen weit über unsere Erfahrungswelt hinaus. So bringen sie ein All hervor, das sich in zusätzliche Dimensionen spannt. Sie bilden dabei eine Art Hyperraum, in den unser Kosmos eingebettet ist, im Verein mit zahllosen anderen Universen. Wie Frisbeescheiben driften sie darin umher, ohne je aufeinanderzutreffen.

Weil auch im Hyperraum Vakuumenergie existiert, könnten dort fortwährend neue Kosmen wie aus dem Nichts entstehen. In jedem von ihnen würden eigene physikalische Gesetze herrschen. Eine solche Quanten Schöpfung gleicht der Bildung von Dampfblasen in kochendem Wasser. Manche fallen wieder in sich zusammen, andere expandieren, wie es bei unserem Heimatuniversum geschah. Wir können die Paralleluniversen zwar nicht sehen, da Licht die kosmischen Blasen nicht verlassen kann. Fühlbar aber wären sie durch ihre Schwerkraft, die in unser All hineinwirkt. Möglicherweise lässt sich dadurch die Theorie eines Tages überprüfen.

Das fantastische Panoptikum der Everettschen Vielwelten-Theorie wird sich dagegen vermutlich niemals überprüfen lassen, ebenso wenig Hawkings Quantenschaum, der Baby-Kosmen gebiert. Die möglichen Realitäten außerhalb unseres Kosmos bleiben uns deshalb wohl auf ewig verborgen. Stephen Hawking wird also nie erfahren, ob er irgendwo da draußen seine Marilyn gekriegt hat.

Schöpfung ohne Ende

Vorstellungskraft der meisten Menschen übersteigen. Doch Kosmologen beschäftigen sich von Berufs wegen damit. Einige ihrer neuen Theorien führen nicht nur weit über das uns bekannte Weltall hinaus, sondern gewähren in der Tat einen Einblick in die Unendlichkeit. Denn möglicherweise gibt es nicht nur unseren Kosmos. Er könnte nur einer unter vielen sein, die sich unablässig in einem endlosen Raum entfalten, wie Dampfblasen in einem Topf kochenden Wassers. »Multiversum« nennen die Forscher diese Landschaft zahlloser Universen.

Dabei galt unter den Kosmologen lange Zeit als ausgemacht, dass unser Universum einzigartig ist, hervorgegangen aus dem Urknall als singulärem Schöpfungsakt. Langsam aber ändern sie ihre Meinung. Ihre Theorien über Ursprung und Beschaffenheit des Alls liefern immer mehr Hinweise darauf, dass es mehr als nur ein Universum gibt. Insbesondere ein Modell tritt dabei in den Vordergrund: die sogenannte ewige Inflation. Es gründet sich auf die Hypothese der kosmischen Inflation (von lateinisch winflare« ~ aufblähen), die der Physiker Alan Guth vom Massachusetts Institute of Technology 1980 entwickelte. Anders als bei den hoch spekulativen konkurrierenden Ideen von Paralleluniversen gibt es in diesem Fall Daten, die zumindest die Grundidee der Theorie stützen. Schon früh hatten sich die Himmelsforscher gewundert, dass das All in allen Richtungen gleich aussieht. Auf einer ange-

messenen Größenskala gibt es in jeder Richtung annähernd gleich viele Galaxien, keine Richtung ist bevorzugt. Das erscheint verwunderlich, denn nach dem Urknall flog die Materie in alle Richtungen davon und sammelte sich in Regionen, die untereinander nicht den geringsten Kontakt haben konnten. Denn die Lichtgeschwindigkeit ist endlich, deshalb konnten keine Signale zwischen zwei gewissermaßen an entgegengesetzten Enden des Universums liegenden Gebieten ausgetauscht werden - sie waren jeweils voreinander hinter dem »kosmischen Horizont« verborgen. Entsprechend gab es keinen Mechanismus, der Temperatur und Materieverteilung dieser Regionen einander angleichen konnte. Es sollte also große Unterschiede in der Verteilung von Galaxien und Galaxienhaufen geben.

Zudem weist der Raum im sichtbaren Universum keine messbare Krümmung auf. Doch die extreme Materiedichte im frühen Universum sollte ihn gemäß Einsteins Relativitätstheorie gekrümmt haben. Das Standardmodell, demzufolge das Universum nach dem Urknall mit Unterlichtgeschwindigkeit expandierte, konnte diese Beobachtungen nicht erklären. Was aber wäre, überlegte Guth, wenn sich der Kosmos in den ersten Sekundenbruchteilen seiner Existenz mit rasendem Tempo ausgedehnt hätte, und zwar weit überlichtschnell? Dann hätten die noch winzigen kosmischen Regionen doch kurzfristig in Wechselwirkung gestanden, bevor das auseinanderstiebende All sie voneinander wegriss. Zugleich vergrößerte sich das Universum immens. Wir sehen heute nur einen kleinen Ausschnitt davon. Dieser erscheint flach, so wie die Erdoberfläche aus der Nähe gesehen flach erscheint, weil wir die Erdkrümmung nicht wahrnehmen.

Guths Berechnungen zufolge dauerte diese Expansionsphase nur 10³⁵ Sekunden. In diesem unvorstellbar winzigen Moment wuchs das Volumen des Alls, das zunächst kleiner als ein subatomares Teilchen war, um den gigantischen Faktor von 10⁹⁰. Am Ende dieses Prozesses hatte es die Größe eines Golfballs erreicht. Andere Versionen der Inflationstheorie gehen noch weit darüber hinaus. Danach erreichte der Raum eine Ausdehnung, die weit über der des beobachtbaren Universums lag.

Treibende Kraft der rasenden Expansion ist ein geheimnisvolles Energiefeld, das die Physiker »Inflaton« tauften. Es steht mit der Vakuumenergie in Zusammenhang. Der leere Raum ist in Wahrheit nicht absolut leer, sondern wird von einem See sogenannter virtueller Teilchen erfüllt. Sie entstehen, den Gesetzen der Quantenmechanik folgend, fortwährend aus dem Nichts und vergehen auch sogleich wieder, indem sie sich gegenseitig zerstrahlen. Doch die damit verbundenen wilden Energieschwankungen - Physiker sprechen von Quantenfluktuationen - verleihen dem Raum eine fest stehende Menge an Energie. Sie erzeugt eine abstoßende Kraft, die wie eine Antigravitation wirkt und den Raum auseinandertreibt. Albert Einstein fügte sie unter der Bezeichnung » Ko smo logische Konstante« in die Gleichungen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie ein.

Zu Beginn, als sich unsere Raumzeit-Blase bildete, war die Vakuumenergie darin immens hoch. Forscher sprechen von einem hochenergetischen oder auch »falschen« Vakuum. Dieser Zustand war indes instabil, und in einer Art explosivem Phasenübergang - so wie Wasser zu Eis gefriert - nahm das Vakuum einen viel geringeren Wert an, der nahe bei null liegt. Jetzt war das »echte« niederenergetische Vakuum erreicht, das stabil ist. Der Zerfallsprozess löste die kosmische Inflation aus, dann zündete er einen heißen Feuerball, der die Teilchen der Materie hervorbrachte. »Dieses Ereignis signalisiert das Ende der Inflation und den Beginn der normalen kosmischen Evolution«, erklärt der Kosmologe Alex Vilenkin von der Tufts

Universität im US-Staat Massachusetts. »Aus einem winzig kleinen Keim wird somit ein gewaltiges, heißes und expandierendes Universum.« Das bedeutet, dass der Urknall in Wahrheit auf die kosmische Inflation folgte. Erst danach verlangsamte sich die Ausdehnung des Universums auf den heute beobachteten Wert.

Vilenkin hatte sich früh mit Guths Idee beschäftigt. Dabei machte er eine erstaunliche Entdeckung: Die Expansion kann immer nur an bestimmten Stellen der kosmischen Urblase enden, nicht aber als Ganzes. Das bedeutet, dass sich die Inflation im gesamten Universum ewig fortsetzt. Dabei wächst das Volumen expandierender Regionen endlos an. Manche Teile dieses Raums sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch im Urzustand und mit »echter« Vakuumenergie angefüllt, dort beginnt die Inflation erst jetzt. Bei anderen, wie vor 13,7 Milliarden Jahren in unserer Region des Kosmos, endete diese Phase bereits. Sie bilden »Inseluniversen« im Ozean des sich endlos ausdehnenden Raums. Der Raum zwischen ihnen expandiert so schnell, dass es immer mehr Platz für neue Inseln gibt.

Im Lauf der Zeit förderten die Forscher noch weitere Konsequenzen des in die Unendlichkeit reichenden Schöpfungsakts zutage. So zeigte sich, dass in den Myriaden von Räumen jede erdenkliche Konstellation von Teilchen möglich ist, außerdem kann es völlig andere Arten von Naturkräften geben als diejenigen, die wir aus unserem Kosmos kennen. Es sollten demnach Räume mit mehr oder weniger als vier Dimensionen der Raumzeit existieren, vielleicht auch solche mit zwei Zeitrichtungen oder einer besonderen Chemie, die höchst fremdartige Lebensformen hervorbringt. »Dies erklärt, warum die Naturkonstanten in unserer Blase gerade so fein abgestimmt sind, dass Leben entstehen konnte«, urteilt Vilenkin. »So etwas kann nur in den seltenen Gebieten geschehen, in denen

die Physik und Chemie dazu geeignet sind. Der Rest des Multiversums bleibt lebensfrei, es gibt dort aber niemand, der sich darüber beschweren könnte.«

Damit wird das sogenannte anthropische Prinzip glänzend bestätigt. Es besagt, dass unser Kosmos für die Entwicklung intelligenten Lebens geeignet sein muss, da wir andernfalls nicht hier sein, es beobachten und physikalisch beschreiben könnten. Viele Physiker hatten diese Idee als »unwissenschaftlich« angefeindet, da sie dazu führe, auf die Suche nach einer physikalischen Herleitung der Naturkonstanten zu verzichten. Doch andere Forscher wiesen darauf hin, dass es in einem Multiversum solche unwahrscheinlichen Orte geben müsse, weil jeder Urknall andere Werte für die Naturkräfte erzeugt. Die von der Theorie der ewigen Inflation beschriebene Situation passt demnach genau zu den anthropischen Überlegungen. Unsere Existenz wäre demnach kein Zufall, unser Platz im Multiversum aber wurde von einer gigantischen kosmischen Lotterie bestimmt.

Woher aber kam die kosmische Urblase, mit der die ewige Expansion des Universums begann? Darüber streiten die Gelehrten. Einige glauben, das Multiversum bestehe schon ewig. Andere argumentieren, dass auch ein in alle Zukunft expandierendes All einen Anfang hatte, in Form einer winzigen Urblase. Diese könnte buchstäblich aus dem Nichts entstanden sein - nämlich durch einen speziellen Quantenprozess, das sogenannte Tunneln. »Der Anfangszustand vor dem Tunneleffekt ist ein Universum mit einem verschwindenden Radius - also überhaupt kein Universum«, beschreibt Vilenkin diesen Anfang allen Seins. Dieser Schöpfungsakt bedarf seiner Meinung nach keiner Ursache.

Doch Nichts, auch dies erkennt der Kosmologe, ist nicht mit einem absoluten Nichts gleichzusetzen. Denn da das Tunneln ein Quanteneffekt ist, müsse auch das Nichts den Gesetzen der Quantenmechanik unterliegen. Diese müssten also schon vor dem Kosmos »da« gewesen ein. Könnten sie folglich eine unabhängige, eigene Existenz besitzen, in Form reiner Mathematik? Mathematik aber, so Vilenkin, werde über den Geist vermittelt. »Bedeutet dies, dass vor dem Universum der Geist steht?«, fragt er sich. Zwar könne eine Erschaffung der Welt aus dem Nichts einen Schöpfer von der Bildfläche verdrängen. Doch weil diese letzte Frage noch ungelöst ist, spottet Vilenkin, sei dessen Arbeitsplatz nicht unmittelbar gefährdet.

Wohin steuert unser Universum?

Anche sagen, die Welt endet in Feuer, manche sagen in Eis«, schrieb der amerikanische Dichter Robert Frost in seinem 1920 erschienenen Gedicht »Fire and Ice«. Das gilt auch für die Kosmologen, wenn sie über das Ende des Universums diskutieren. Die Frage ist, ob es in lichtloser Kälte erstarrt oder in einer gleißenden Endexplosion verglüht. Es zeichnete sich zwischendurch sogar noch eine dritte Möglichkeit ab, nämlich ein Ende in einer vernichtenden Katastrophe, die den Raum selbst zerstört. Welches Schicksal das All letztlich ereilt - das heißt, welchen physikalischen Zustand es am Ende einnimmt -, ist jedoch noch völlig unklar. Jede denkbare Antwort aber konfrontiert uns mit der Ewigkeit.

Entscheidend für die Entwicklung unseres Kosmos ist seine Massendichte. Ubersteigt sie einen bestimmten Wert, kann die Schwerkraft seiner Massen seine im Urknall begonnene Expansion bremsen und schließlich umkehren. Galaxien und die Sterne fliegen dann aufeinander zu, bis alle Materie in einem furiosen Endknall zusammenstürzt. Das wäre das feurige Ende. Diese Idee entwickelte der britische »Astronomer Royal« (königlicher Astronom) Sir Martin Rees schon 1969 in einer »Eschatologischen Studie zur Zukunft eines kollabierenden Kosmos«. Der Endknall könnte zugleich der Urknall für ein neues Universum sein. Sogar eine endlose Abfolge von Ausdehnung und Zusammensturz des Alls erschien denkbar, die Kosmologen nennen dies ein »oszillierendes Universum«.

Später aber zeigten astronomische Beobachtungen, dass die Massendichte vermutlich zu gering ist, um die Ausdehnung des Kosmos zu stoppen. Daraufhin skizzierten Astrophysiker einen anderen - nämlich den frostigen - Weg in die Unendlichkeit. Das All entstand vor 13,7 Milliarden Jahren im Urknall. Er brachte alle Materie hervor, aus der nach wenigen Hundert Millionen Jahren Sterne und Galaxien entstanden. Unsere Sonne leuchtet seit 4,5 Milliarden Jahren und wird dies noch mindestens weitere fünf Milliarden Jahre lang tun. Dann geht ihr Brennstoffvorrat zur Neige. Sie bläht sich auf zu einem Roten Riesenstern. Die Oberfläche der Erde schmilzt, jede Spur von Leben und Zivilisation verschwindet.

In größerem Maßstab verschmelzen in den nächsten Billionen Jahren viele Galaxien zu riesigen Materieansammlungen. Darin verglühen nach und nach die Sterne. Sie explodieren als Supernovae oder verdämmern - wie auch unsere Sonne nach dem Riesenstadium - als Weiße Zwerge. Nach 100 Billionen Jahren sind die letzten von ihnen erloschen. Nun folgt die »Epoche der Degeneration«. Das All ist kalt und nahezu leer. Unzählige Sternengenerationen haben alles Brennmaterial (Wasserstoff und Helium) aufgebraucht. Nur Braune Zwerge, die zu massearm sind, um das nukleare Feuer zu zünden, enthalten noch etwas Brennstoff. Kollidieren zwei dieser Ministerne, entsteht eine neue Zwergsonne. Diese stellaren Zeugungsvorgänge können über die folgenden 100 Billionen bis eine Trillion Jahre anhalten. Zusätzlich flammt durch Kollisionen Weißer Zwerge einmal pro Billion Jahre eine Supernova auf. Zugleich verdampfen die Schwarzen Löcher aufgrund von Quanteneffekten. Auch die größten von ihnen schrumpfen auf Atomgröße und verabschieden sich mit einem Strahlenblitz aus dem All. Körper, wie sie uns aus dem heutigen Universum vertraut sind, gibt es dann nicht mehr.

Von dieser Epoche an wird es schwierig mit den Zahlen. Im Laufe der Äonen verwandeln sich die Atome der erkalteten Sterne und Planeten durch Fusionsreaktionen oder Kernzerfall in das Element mit der günstigsten Energiekonfiguration, nämlich Eisen. So bleiben nach 10¹⁵⁰⁰ Jahren (für diesen riesigen Wert gibt es kein Zahlwort mehr) von einst hellen, warmen Himmelskörpern nur noch eiskalte Kugeln aus blankem Metall. Auch jetzt hat die Materie ihren energetisch tiefsten und damit stabilsten Zustand noch nicht erreicht. Die Eisenkugeln können weiter Energie abgeben, indem sie zu Neutronensternen schrumpfen oder zu Schwarzen Löchern. Diese verdampfen dann wiederum, die letzten von ihnen haben sich in unvorstellbaren 10 hoch 10^{76} Jahren aufgelöst. Ausgeschrieben wäre diese Zahl (eine 1 mit 10 hoch 76 Nullen) größer als das sichtbare Universum. Danach bleibt nur leerer, dunkler Raum, der in die Unendlichkeit expandiert. Die Raumzeit bleibt in diesem Szenarium erhalten, es findet kein Phasenübergang in einen anderen physikalischen Zustand statt wie bei einem Endknall.

Die kosmische Dämmerung verliefe anders, wenn die Protonen, die zusammen mit den Neutronen die Bausteine der Atomkerne sind, instabil wären, wie es einige Theorien vorhersagen. Sie würden in Elektronen, Positronen und Gammastrahlung zerfallen. Nach zehn Sextillionen Jahren (1 Sextillion ist eine 1 mit 36 Nullen) wäre alle Materie aus dem Kosmos verschwunden. Jetzt gibt es keine Strukturen mehr, nur Elektronen und Positronen fliegen noch darin umher. Ab und zu treffen welche aufeinander und zerstrahlen. Nach 100 Novemdecillionen (eine 1 mit 116 Nullen) Jahren erfüllen nur noch Photonen (Lichtteilchen) mit riesigen Wellenlängen und einige Neutrinos das All, es herrscht ewige Nacht. Allerdings wurde bis heute kein Protonenzerfall beobachtet.

Im Jahr 1998 eröffnete eine revolutionäre Entdeckung eine weitere Möglichkeit: Astronomen hatten die Helligkeit einiger Dutzend Supernovae im tiefen Universum gemessen und zugleich deren Distanz bestimmt. Dabei zeigte sich, dass die himmlischen Leuchtfeuer rund 30 Prozent weiter entfernt waren, als sie nach den gängigen Theorien sein sollten. Dies ließ sich nur erklären, wenn sich das All heute rascher ausdehnt als in der Vergangenheit. Offenbar gibt es eine den ganzen Kosmos durchdringende Kraft, welche die Expansion beschleunigt. Die Kosmologen tauften sie »Dunkle Energie«.

Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung bestätigten später ihre Existenz, und sie zeigten die wahre Materieverteilung im Kosmos. Nur vier Prozent davon bestehen danach aus normaler Materie, 23 Prozent aus Dunkler Materie, von der unklar ist, woraus sie besteht. Den großen Rest von 73 Prozent steuert die antigravitativ wirkende Dunkle Energie bei. Mit dieser Entdeckung war das Schicksal des Universums wieder offen, denn Energie und Masse sind, wie Einsteins Formel $E = mc^2$ beschreibt, einander gleichwertig. Die Massendichte im Kosmos wird somit von der Dunklen Energie bestimmt. Entscheidend für die weitere Entwicklung des Kosmos ist, wie sich die mysteriöse Kraft in Zukunft verhält. Wiederum stehen mehrere Möglichkeiten zur Debatte. Die Antigravitation könnte eine Größe sein, die Einstein einst in seine Allgemeine Relativitätstheorie einfügte, später aber wieder verwarf: die Kosmologische Konstante. Physikalisch gesehen resultiert sie aus dem Quantenvakuum. Selbst leerer Raum - das Vakuum - ist nämlich keineswegs leer, sondern erfüllt von Elementarteilchen, die aus dem Nichts hervorspringen und nach Sekundenbruchteilen wieder zerfallen. Der Quantenaufruhr erfüllt das Universum mit einer bestimmten Energie.

Bis vor fünf Milliarden Jahren war in diesem Modell die Schwerkraft die vorherrschende Kraft. Sie bremste die kosmische Expansion. Dann überwog die Dunkle Energie. Von nun an dehnte sich das All immer rascher aus, und zwar gleichmäßig beschleunigt. Als Konsequenz entfernen sich die Galaxien zunehmend voneinander. Irgendwann trägt sie der expandierende Raum mit Uberlichtgeschwindigkeit davon. In rund 100 Milliarden Jahren sind sie so weit voneinander entfernt, dass der Sichtkontakt zwischen ihnen verloren geht. Astronomen in einer der Sterneninseln könnten keine Nachbargalaxie mehr entdecken - es wird sehr einsam im Universum. Das Raumzeit-Gefüge aber bleibt nach heutigem Wissen dabei intakt. Würde die Dunkle Energie mit der Zeit wieder schwächer, gewänne die Gravitation erneut die Oberhand. Dann kehrt sich die Expansion um, es käme zum feurigen Endknall.

Ein alternatives Modell ist die »Quintessenz«. So nennen die Forscher ein Quantenkraftfeld, das den ganzen Kosmos erfüllt. Seine Stärke soll sich jedoch mit der Zeit verändern, was die kosmische Expansion nicht mehr gleichmäßig, sondern zunehmend beschleunigt.

Im äußersten Fall würde die Quintessenz zur sogenannten »Phantomenergie«. Den Begriff prägte der Astronom Robert Caldwell. Sie brächte dem Universum ein schreckliches Ende, da sie die kosmische Expansion extrem stark beschleunigt. Der US-Forscher hat das gewaltsame Finale minutiös skizziert. Danach kündigt sich in 21 Milliarden Jahren das Ende des Universums an. Zu diesem Zeitpunkt geraten die Galaxien wechselseitig außer Sichtweite. Eine weitere Milliarde Jahre später rast der Raum so heftig auseinander, dass er alle Materie zerreißt - der »Big Rip« (das »Große Reißen«) beginnt. Zuerst zerfällt unsere Milchstraße. Nun bleiben dem All noch 60 Millionen Jahre. Drei Monate vor der Stunde null lösen

sich die Planeten von der Sonne. Schließlich - 30 Minuten vor dem Ende - explodiert die Erde. In den letzten Sekundenbruchteilen zerfetzt der rasend expandierende Raum die Atome. Sekundenbruchteile später wird die Struktur der Raumzeit selbst zerrissen - der Kosmos hört auf zu existieren. Er geht in eine Singularität über, in einen ähnlichen Zustand also, wie er auch vor dem Urknall geherrscht haben könnte. Dann hätte sich der kosmische Kreis geschlossen.

Vermutlich bleibt unserem All diese Apokalypse aber erspart. Neueste Beobachtungen zeigen, dass die Zunahme seiner Expansionsgeschwindigkeit am ehesten mit der Kosmologischen Konstante übereinstimmt. Bliebe es dabei, würde Einsteins Relativitätstheorie wieder einmal glänzend bestätigt. Andererseits wissen die Kosmologen nun immer noch nicht, welches Ende dem Universum blüht - ob Feuer oder Eis.

Weltformel

Wird es je eine Weltformel geben?

Von einer Formel, die das ganze Universum erklärt, träumen die Physiker schon lange. Bis heute haben sie aber kein solches Gleichungssystem gefunden. Selbst der große Albert Einstein hatte sich vergeblich daran versucht. Deshalb zweifeln viele daran, dass dieser grandiose Wurf je gelingen könnte.

Beflügelt wurde die Debatte erneut (zumindest im deutschen Sprachraum), als im Herbst 2007 das Buch »Der Abschied von der Weltformel« des US-Physikers Robert Laughlin erschien. Laughlin forscht an der Universität Stanford, 1998 erhielt er den Nobelpreis für seine Arbeiten über ein bestimmtes Quantenphänomen, den sogenannten Quanten-Hall-Effekt.

Unter einer »Weltformel« - die Angelsachsen sprechen von der »Theory of Everything«, zu Deutsch »Theorie von Allem« - ist eine eindeutige und widerspruchsfreie Beschreibung der in der Natur beobachtbaren Phänomene zu verstehen. Sie sollen im Rahmen eines möglichst einfachen Satzes von Formeln darstellbar sein und auch Vorhersagen über neue Phänomene ermöglichen.

Der aktuelle Stand der Physik gibt noch kein solches Formelwerk her, da die großen Theorien - insbesondere die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik - unterschiedliche Weltmodelle liefern. Erstere beschreibt den großräumigen Aufbau und die Struktur des Universums, die im Wesentliehen durch die Gravitation bestimmt werden. Letztere ermöglicht Aussagen über die Welt der kleinsten Teilchen. Beide unterscheiden sich in ihrer mathematischen Struktur beträchtlich. Das große Ziel der Physiker ist also, eine quantentheoretische Beschreibung der Gravitation zu finden, kurz eine Quantengravitation. Sie entspräche der Weltformel.

Laughlin aber glaubt, dass sie sich nie finden lässt, denn schon der erkenntnistheoretisehe Ansatz, mit dem die Physiker an die Vereinigung beider Gleichungssysteme herangehen, sei falsch. Es liege in unserer Natur, uns mithilfe absoluter Wahrheit zu orientieren, argumentiert er. Dann aber würden wir verwirrt und unentschieden vor der Frage stehen, was die »absolute Wahrheit« eigentlich ist. In der Natur, so Laughlin weiter, gebe es auf sehr niedriger Ebene (etwa der von Molekülen und Atomen) einen ähnlichen Konflikt. Die meisten Phänomene lassen sich mit fundamentalen Gesetzmäßigkeiten erklären. Manchmal aber sei das anders. Die Gesetze der Hydrodynamik etwa, die das Verhalten von Flüssigkeiten beschreiben, ließen sich zwar auch aus grundlegend tieferen physikalischen Gesetzen erklären. Doch die hydrodynamischen Phänomene würden in gleicher Weise ablaufen, auch wenn sich die tieferen Gesetze ändern. Die Frage sei also, was fundamentaler ist: die detaillierten tieferen Regeln, welche die Hydrodynamik hervorbringen, oder die höheren Gesetze, die aus den tieferen erwuchsen und nun das Verhalten von Flüssigkeiten beschreiben?

Ist das Gesetz der Teile wichtiger, fragt Laughlin deshalb, oder das des Kollektivs? Das rührt an die Basis der Naturwissenschaften, die bekanntlich reduktionistisch angelegt sind. Der US-Physiker aber lehnt den Reduktionismus ab. Es sei verkehrt, physikalische Phänomene in immer kleinere Einheiten zu zerlegen, um damit wie mit Lego steinen das ganze Universum zu beschreiben. Stattdessen rückt er die Emergenz in den Vordergrund. Darunter ist die spontane Herausbildung von Phänomenen oder Strukturen eines höheren Systems auf der Grundlage des Zusammen spiels seiner Teile zu verstehen, wobei sich die Eigenschaften des neu aufgetauchten Systems von denen seiner Bausteine unterscheiden können. Einfacher gesagt: Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.

Die Natur sei somit nur zu verstehen, wenn sie als Ganzes betrachtet wird. Deshalb gelte es, ihre Fähigkeiten zur Selbstorganisation zu erfassen. Die Grenzen unseres Wissens seien nicht Milliarden Lichtjahre entfernt, und um sie auszuloten, bedürfe es keiner komplizierten Theorien. Die Rätsel der Natur würden vielmehr schon im Alltag sichtbar: Wie organisiert sich die Materie in einem Salzkorn? Was lässt Wasser plötzlich gefrieren? Warum verhalten sich elektronische Bauteile in einer bestimmten Weise? Ideen wie die Stringtheorie, die vielen Forschern als Weg zur Quantengravitation gilt, seien deshalb zum Scheitern verurteilt. Sie treiben den Reduktionismus nur noch weiter, bis hinab auf die Ebene der kleinstmöglichen Teilchen (eben die Strings), und können deshalb nicht zu einer ganzheitlichen Sicht des Universums führen.

Die Physik, meint Laughlin, brauche deshalb einen radikalen Neuanfang. Wie dieser sich gestalten könnte, vermag er aber nicht zu sagen. Zwar gibt er vage Hinweise, wo die von ihm ausgerufene »Neuerfindung der Physik« (so der Untertitel des Buchs) anknüpfen müsse. So lasse sich das Vakuum der Raumzeit als eine Art Materie auffassen, und Einsteins Relativitätstheorie sei keineswegs so grundlegend wie immer behauptet. Doch nach Meinung anderer Forscher ist dies zu wenig, um der Naturwissenschaft eine grundsätzlich neue Richtung zu weisen.

Dennoch steht der Nobelpreisträger mit seiner Ansicht, eine Weltformel werde es nie geben, nicht allein. Schützenhilfe gibt

unter anderem der Wissenschaftshistoriker Ernst Peter Fischer von der Universität Konstanz. Unser Weltverständnis, erklärt er, sei auf Dualität ausgelegt. Die abendländische Denktradition habe Geist und Materie sowie Leib und Seele schon lange getrennt. Eine ähnliche Dualität finde sich nun auch bei Quanten- und Relativitätstheorie.

Diesen Gedanken illustriert Fischer anhand der Stringtheorie: Die Quantenwelt ist von Unstetigkeit geprägt, die Teilchen springen zwischen Energieebenen hin und her, dazwischen können sie nicht verweilen. Die Feldtheorie der Gravitation hingegen muss kontinuierlich sein, UnStetigkeiten schließt sie aus. Schließlich verlaufen auch die Felder selbst, etwa ein Gravitations- oder ein Magnetfeld, kontinuierlich. Ihre Stärke ändert sich stetig, aber nicht in Sprüngen. Die Stringtheorie überdeckt diesen Gegensatz, indem sie die ursprünglich ausdehnungslos gedachten und der Unbestimmtheit unterworfenen Teilchen künstlich in stetige Fäden ummünzt, eben die Strings.

Diese Trickserei, so Fischer, entspringe dem Glauben vieler Theoretiker, die Welt mithilfe der Mathematik letztgültig erklären zu können. Daneben existiere aber auch eine philosophische Weltbeschreibung. In Wahrheit gebe es kein Sein, sondern nur Werden. Der griechische Philosoph Piaton habe sich auf das Sein konzentriert, deshalb seien die Naturwissenschaftler Platoniker. Doch Heraklit mit seinem berühmten »panta rhei« (»alles fließt«) käme der Wirklichkeit viel näher. Fischer: »Weil wir aber nicht heraklitisch denken, schauen wir in die falsche Richtung.«

Der Forscher vom Bodensee nennt ein Beispiel: Der Physiker Werner Heisenberg erfand die Unschärferelation. Sie besagt, dass ein Teilchen in mehreren Zuständen gleichzeitig verharren kann. Erst wenn es im Experiment beobachtet wird, entscheidet es sich für einen klar definierten Zustand.

Heisenbergs Kollege Niels Bohr schloss daraus, in der Natur gelte die Komplementarität, also die wechselseitige Ergänzung von Teilcheneigenschaften. Deshalb, sagt Fischer, müsse man immer zwei Sichtweisen auf die Dinge haben. Beide Betrachtungen mögen sich widersprechen, doch erst zusammen ergeben sie das Ganze. Die eigentliche Einheit sei die Zweiheit, wie sie im Yin-Yang-Prinzip zum Ausdruck kommt. Eine Weltformel könne daher keine einheitliche Gestalt haben, sie sei nicht als Punkt denkbar, sondern als Spannung zwischen Punkten.

»Heute sind wir von dem Traum, eine Weltformel zu finden, weiter entfernt als zu Einsteins Zeiten«, sagt auch der Wiener Quantenphysiker Anton Zeilinger, der durch seine Experimente zur sogenannten Quantenteleportation bekannt wurde. »Es hat sich herausgestellt, dass die Situation weitaus komplizierter ist, als sie damals aussah.« Es bedürfe grundsätzlich neuer physikalischer und philosophischer Ansätze, um wesentliche Fortschritte zu machen.

Ein weiteres Argument gegen eine »Theorie von Allem« ergibt sich aus dem sogenannten Unvollständigkeitssatz des österreichischen Mathematikers Kurt Gödel. Damit wies er 1931 nach, dass sich in Systemen wie der Arithmetik nicht alle Aussagen formal beweisen oder widerlegen lassen. Sein Satz lautet: Jedes hinreichend mächtige formale System ist entweder widersprüchlich oder unvollständig. Das schließt ein, dass sich nicht beweisen lässt, dass Aussagen innerhalb eines solchen Systems frei von Widersprüchen sind.

Oft wird dies mit dem berühmten Lügner-Paradox des altgriechischen Philosophen Epimenides verdeutlicht. Er sagte: »Alle Kreter sind Lügner.« Da er aber selbst Kreter war, hat er bei dieser Aussage gelogen. Folglich sind die Kreter keine Lügner. Dann aber wäre der erste Satz doch wahr, und so fort. Hier kommt die Selbstbezüglichkeit oder Schleifenbildung ins Spiel: Das Paradox entsteht durch die Rolle des Epimenides, der jeweils auf sich selbst verweist. Auch im Werk des niederländischen Grafikers M.C. Escher entstehen die befremdlichen Bilder durch Selbstbezug, etwa bei den zwei Händen, die sich gegenseitig zeichnen.

Dies lässt sich auf die Weltformel übertragen. Wenn es sie denn gibt, muss sie als mächtige, mathematisch ausformulierte Theorie entweder widersprüchlich oder unvollständig sein. Da sie innerhalb des Universums entstand und auf Beobachtungen desselben beruht, wird sie zudem zwangsläufig selbstbezüglich. Aus diesen Gründen werden wir nie wissen, ob sie uns die letztgültige Wahrheit über das Universum verrät. Dies ließe sich nur vermeiden, wenn wir das System - also den Kosmos - von außen sehen könnten. Doch um die Raumzeit zu transzendieren, müssten wir Engel sein.

Die meisten Physiker lassen sich von solchen Einwänden nicht beirren. Unverdrossen forschen sie weiterhin an der »Theorie von Allem«. Einige Theoretiker entwickeln die Stringtheorie weiter, andere versuchen sich an der Schleifen-Quantengravitation, die annimmt, der Raum selbst bestehe aus winzigsten Quanten. Eine neue Variante einer potenziellen Weltformel ersann der US-Physiker Garrett Lisi. Unter dem Titel »Eine außergewöhnlich einfache Theorie von Allem« veröffentlichte er sie Ende 2007. Sie beruht auf einer geometrischen Verknüpfung aller bekannten Elementarteilchen. Die Schwerkraft wird einbezogen, weil in Lisis Teilchennetz auch Gravitationsquanten auftauchen. Die sind zwar noch nicht entdeckt. Doch im großen Teilchenbeschleuniger LHC im Kernforschungszentrum Cern bei Genf, der 2008 in Betrieb ging, könnten welche auftauchen, hofft Lisi.

Vielleicht sollten er und seine Kollegen einmal mit Stephen Hawking reden. Um 1980 glaubte der britische Gelehrte, innerhalb von 20 Jahren sei das ersehnte Formelwerk gefunden. Im Jahr 2001 erklärte er, er glaube immer noch, die Formel sei bis zum Ende des Jahrhunderts gefunden, nur diesmal eben Ende des 21. Jahrhunderts. Dann aber gab Hawking diese Hoffnung auf. Der Grund: Er hatte Gödels Unvollständigkeitssatz eingehend studiert. In einem legendären Vortrag, gehalten im März 2003 an der *Texas A&M University*, bekannte er: »Manche Leute werden enttäuscht sein, wenn es keine endgültige Theorie gibt, die mit einer endlichen Zahl von Prinzipien formuliert werden kann. Ich gehörte in dieses Lager, aber ich habe meine Meinung geändert. Jetzt bin ich froh, dass unsere Suche nach Erkenntnis nie enden wird und wir stets die Herausforderung zu neuen Entdeckungen haben.«

Warum ist die Stringtheorie revolutionär?

Albert Einstein sagte einmal: »Die meisten Grundideen der Wissenschaft sind an sich einfach und lassen sich in der Regel in einer für jedermann verständlichen Sprache wiedergeben.« So verhält es sich auch mit der Stringtheorie (von englisch »string« = Saite). Ihr Grundgedanke lässt sich in einem Satz darlegen: »Elementarteilchen sind nicht, wie zuvor gedacht, ausdehnungslose Punkte, sondern eindimensionale, schwingende Fäden, die je nach ihrem Schwingungszustand die vielen verschiedenen Elementarteilchen ergeben.«

Strings können also wie Elektronen, Quarks, Photonen oder ein anderer Partikel aus dem »Zoo« der über 200 bekannten Elementarteilchen erscheinen. Die Eigenschaften der jeweiligen Teilchen ergeben sich aus ihrer Vibration, so wie ein tiefes, schweres G von derselben Geigensaite herrühren kann wie ein leichtes G ein oder zwei Oktaven höher.

Nach den Vorstellungen der Physiker sind Strings winzig. Sie haben Abmessungen von etwa 10 ³³ Zentimeter. Damit liegen sie in der Größenordnung der Planck-Länge. Ihre Größe verhält sich zum Durchmesser eines Atoms wie dieses zum ganzen Sonnensystem.

Genau genommen gibt es zwei Arten von Strings. Einfache Fäden, die zwei Enden haben, nennen die Physiker »offene Strings«. Sind die Enden verbunden, sodass der Faden eine Schlaufe bildet, sprechen sie von »geschlossenen Strings«. Beide Arten können sich ineinander umwandeln. Treffen die Enden eines offenen Strings aufeinander, können sie sich ver-

binden, sodass ein geschlossener String entsteht. Umgekehrt können geschlossene Strings zerreißen und sich dabei öffnen. Diese Prozesse entsprechen der Umwandlung von einer Teilchenart in eine andere, wie sie in großen Teilchenbeschleunigern fortwährend zu beobachten ist.

Revolutionär ist die Theorie, weil sie womöglich die lang gesuchte Weltformel darstellt. Das Problem ist, dass die beiden großen alten Theorien, Einsteins Relativitätstheorie und die Quantentheorie, unterschiedliche Aspekte des Kosmos beschreiben. So erklären die Formeln der Relativitätstheorie den großräumigen Aufbau der Welt, der durch die Gravitation der darin enthaltenen Massen bestimmt wird. Das Verhalten der Elementarteilchen wird von den Gesetzen der Quantentheorie bestimmt. Eine Weltformel soll beide zur »Quantengravitation« vereinen.

Die Stringtheorie könnte die Lösung sein. Denn obwohl sie Struktur und Verhalten der kleinsten Teilchen beschreibt, erklärt sie auch zwanglos die Gravitation. In den anderen Modellen der Physiker, mit denen sie die Welt beschreiben wollen, lässt sich diese Kraft nicht ohne Weiteres einbinden. Im String-Modell aber entsteht das Graviton, das als Überträgerteilchen der Schwerkraft gilt, automatisch. Es löst sich als kleine Schlaufe von einem offenen String ab. Die Gravitationswirkung der Sonne auf die Erde erklärt sich laut Stringtheorie wie folgt: Ein Graviton wird von einem Teilchen in der Sonne emittiert und von einem Teilchen auf der Erde absorbiert. Diese Wechselwirkung überträgt eine Kraft, die beide Objekte zueinander hinzieht.

Ein Problem aber bleibt: Als die Physiker die Vibrationen der kleinen Fäden berechnen wollten, scheiterten sie zunächst. Denn in den vertrauten vier Dimensionen der Raumzeit wollten diese partout nicht wie erwartet schwingen. Erst als die Forscher ihren Formeln sechs weitere Raumdimensionen anfügten, stimmte die Mathematik - doch eine zehndimensionale Raumzeit war entstanden.

Wie aber kann ein Raum zehn Dimensionen haben? Anschaulich ist das nicht zu vermitteln, die Stringtheoretiker entwickelten zur Erklärung jedoch ein Modell. Danach sind die zusätzlichen Dimensionen auf einem Raum von der Planck-Größe zusammengeknäuelt. Ein solch winziger, sechsdimensionaler Ball soll gleichsam an jeden Raumpunkt des Kosmos geheftet sein. Im Urknall haben sich nur die vier Dimensionen der Raumzeit entfaltet. Ein Vergleich verdeutlicht die Idee: Wird ein zweidimensionales Blatt Papier zusammengerollt, entsteht eine Art Strohhalm. Schrumpft dessen Durchmesser gegen null, verschwindet die aufgerollte Dimension, es bleibt ein eindimensionaler Faden.

In einigen Varianten der Theorie sind die Knäuel der aufgerollten Dimensionen indes größer, vielleicht im Bereich von einigen hundertstel oder gar zehntel Millimetern. Dann könnten sie mit dem Teilchenbeschleuniger LHC sichtbar werden. So große Raumzeit-Knoten würden nämlich die Art der Teilchenzerfälle, die nach der Kollision der im Beschleunigerring umlaufenden Protonen wie eine Kettenreaktion einsetzen, beeinflussen. Damit ließe sich die Theorie auf ihre Stichhaltigkeit testen.

Sie hat noch eine fantastische Konsequenz: Aus ihren Formeln kristallisierte sich nicht nur ein, sondern gleich fünf String-Modelle heraus. Lange war unklar, welches davon unser Universum richtig beschreiben könnte. Die Antwort gab 1995 der US-Physiker Edward Witten. Alle fünf sind spezielle Spielarten eines übergeordneten Formelwerks, das Witten »M-Theorie« taufte - wahlweise für Membran, Mutter (aller Theorien), Magisch oder Matrix. Darin gibt es neben den eindimensionalen String-Fäden auch höherdimensionale Gebilde, z. B. zweidimensionale Membranen, die wie die Strings

schwingen, kurz »Branen« genannt, als Abkürzung von Membran. Für sie wäre die dritte Dimension ein »Hyperraum«, in dem viele Branen wie Frisbeescheiben umherfliegen, ohne je aufeinanderzutreffen. Analog könnten 3-D-Klümpchen durch einen vierdimensionalen Raum driften usw.

Die Idee lässt sich fortspinnen: Vielleicht ist unser Universum ja nichts als eine große 3-D-Bran, die in einem vierdimensionalen Hyperraum schwebt. Und: Womöglich hat es darin Gesellschaft. Die Quantenmechanik erlaubt, dass scheinbar aus dem Nichts Branen hervorspringen und wieder verschwinden. Eine solche Quanten Schöpfung gleicht der Bildung von Dampfblasen in kochendem Wasser. Manche fallen wieder in sich zusammen, andere expandieren, wie es bei unserem Universum geschah. So könnten also unablässig weitere Kosmen entstehen. Wie Inseln im Ozean liegen sie im sogenannten Multiversum.

Genug der Sinnverwirrung. Niemand weiß, ob es Strings wirklich gibt. Weil sie so winzig sind, ist ihre Existenz experimentell kaum direkt nachzuweisen (die großen aufgerollten Dimensionen wären ein indirekter Beweis). Vermutlich ist mit der Stringtheorie das letzte Wort aber noch nicht gesprochen. Sie ist weder einfach noch »schön«, wie es die Physiker von einer großen Theorie erwarten. Es wird wohl neuer Ideen bedürfen, um die alles erklärende Weltformel zu finden.

Quantentheorie

Im Universum regiert der Zufall - oder doch nicht?

Wenn die Quantenphysik recht hat, ist die Welt verrückt«, soll Albert Einstein gesagt haben. Bislang scheint es so, als sei die Welt tatsächlich verrückt. Denn welche Experimente die Physiker auch durchführen - stets verlaufen sie so, wie es die paradoxen Gesetze der Quantenmechanik vorhersagen. Quanten (also Elementarteilchen wie Photonen oder Elektronen) sind, solange sie niemand beobachtet, an mehreren Orten zugleich, und sie können mehrere Zustände gleichzeitig einnehmen. Wie Quanten-Ereignisse enden, lässt sich nie genau vorhersagen, außerdem scheinen Teilchen Informationen über weit entfernte Objekte zu besitzen und reagieren mit Überlichtgeschwindigkeit, wenn sich bei diesen etwas ändert. Und Quanten reisen scheinbar rückwärts in der Zeit.

Dies alles zeigen mannigfache Versuche. Vielleicht am bekanntesten ist das Doppelspalt-Experiment. Dabei werden Photonen auf eine passend dimensionierte Wand mit zwei Spalten geschossen. Auf einem Schirm dahinter entsteht ein eigenartiges Muster, als ob eine Wasserwelle durch die Spalte gelaufen wäre und sich dahinter wieder zu einem Wellenzug vereint hätte. Physiker sprechen von einem Interferenzmuster. Es entsteht, wenn sich Berge und Täler der Lichtwelle überlagern. An manchen Stellen türmen sie sich zu doppelter Höhe, dort wird es hell. Dazwischen löschen sich Berge und Täler gegenseitig aus, und es wird dunkel. Das funktioniert auch,

wenn nur ein einzelnes Photon auf die Wand trifft. Dafür gibt es bislang nur eine Erklärung: Das Lichtteilchen muss gleichzeitig durch beide Spalte geflogen sein. Das geht nur, wenn ein Teilchen zugleich als Festkörper und als Welle erscheinen kann. Dieser sogenannte Dualismus von Welle und Korpuskel ist ein weiterer Quanteneffekt.

Entscheidend ist aber, dass Quantenprozesse rein vom Zufall bestimmt sind. Damit unterliegen sie nur Wahrscheinlichkeitsregeln, nicht aber den bekannten Gesetzen der Physik. All dies trat nach der Entwicklung der Quantentheorie in den ersten Jahrzehnten des vergangenen Jahrhunderts zutage. Die Konsequenzen für das Weltbild der Physiker waren immens: Bis dahin galt als gewiss, dass die klassische Mechanik, die auf die von Isaac Newton entwickelte Physik zurückgeht, die Abläufe im Universum bestimmt. Danach ist das Universum ein einziges großes Uhrwerk, dessen Räder fein abgestimmt ineinandergreifen. Jedem Effekt geht eine Ursache voraus. Würde man den Bewegungs- und Energiezustand jedes einzelnen Teilchens genau genug kennen, könnten Forscher mithilfe eines ausreichend leistungsfähigen Computers die weitere Entwicklung des Kosmos vorausberechnen - die Welt ist also deterministisch (von lateinisch »determinare« - bestimmen).

Die Quantenphysik setzte an die Stelle des Determinismus jedoch den Zufall, nun glich das Universum einem gigantischen Würfelspiel. Dieses Weltbild liegt der »Kopenhagener Deutung« der Quantenmechanik zugrunde, die um 1927 von den großen Physikern Niels Bohr und Werner Heisenberg formuliert wurde. Sie kanonisierte den Zufall als tiefstes physikalisches Prinzip. Albert Einstein war diese Vorstellung ein Graus. »Gott würfelt nicht« - hielt er den »Kopenhagenern« entgegen. Mit allerlei Gedankenexperimenten und Gegenthesen versuchte er deshalb, die Quantentheorie zu widerlegen.

Er glaubte, es müsse »verborgene Variable« geben, also physikalische Größen, die unterhalb der Quantenebene wirken und die Kausalität wiederherstellen können. Die Quantenphysik, so Einsteins Schlussfolgerung, sei unvollständig und könne die Welt nicht realistisch beschreiben. Er konnte sie indes nicht zu Fall bringen.

Doch neben Einstein wollten sich auch andere Physiker mit einem zufallsbestimmten Kosmos nicht abfinden. Wie er waren (und sind) sie überzeugt, dass es tieferliegende Prinzipien geben müsse, die den Determinismus zurückbringen in die Welt. Viele gründen ihre Zweifel auf den Umstand, dass sich Quanten- und Relativitätstheorie nicht zur Quantengravitation vereinigen lassen; diese vereinte Theorie wäre dann die lange gesuchte Weltformel. Deshalb denken diese Forscher, dass sich hinter der Quantentheorie etwas tiefer Liegendes verbirgt - eine Welt der »Präquanten« vielleicht, die Gewissheiten kennt und objektive Realitäten in der Natur abbilden kann. Zu den Befürwortern dieser Idee zählt der Physiker Joy Christian von der Universität Oxford. Er behauptet, dass die Beweise, die gegen deterministische Theorien sprechen, auf falschen Annahmen beruhen. »Entgegen der überkommenen Lehre schließt die Quantentheorie eine tiefere Theorie nicht aus, die dann vollkommen deterministisch sein könnte«, sagt er. Sein Kollege Gerard t'Ho oft von der Universität Utrecht sekundiert. Die Quantentheorie sei nicht endgültig, meint er, denn »jede Theorie, die ein >Vielleicht< zur Antwort hat, muss als inakkurat gelten.«

Als Beispiel nennt der Brite Christian die sogenannte Verschränkung. Sie entsteht, wenn zwei Teilchen miteinander in Wechselwirkung treten. Dabei werden sie auf mysteriöse Weise quantenmechanisch aneinandergekoppelt. Wird bei einem dieser Teilchen ein Quantenzustand gemessen, etwa der Spin (er entspricht dem Eigendrehimpuls, wobei die

Drehachse nach oben oder unten zeigen kann), so nimmt sein Partner instantan, also ohne Zeitverlust und damit überlichtschnell, den entgegengesetzten Zustand ein - selbst wenn beide Partikel Lichtjahre voneinander entfernt sind. Einstein leitete die Verschränkung als eine Konsequenz aus der Quantenmechanik ab, hielt sie aber für unmöglich, weil er glaubte, nichts im Universum könne schneller sein als die Lichtgeschwindigkeit. Spöttisch sprach er von der »spukhaften Fernwirkung«.

Mittlerweile zeigen zahlreiche Experimente, dass es dieses Phänomen tatsächlich gibt. Aufgrund ihrer Quanteneigenschaft überlagern sich bei den Teilchen die Spin-Richtungen, ihre Achsen weisen also gleichzeitig nach oben und nach unten - bis der Zustand eines der Partikel gemessen wird. Dann klappen die Spins beider Teilchen simultan in jeweils entgegengesetzte Richtungen um. »Was aber«, fragt Christian, »wenn der Spin schon im Moment der Verschränkung festgelegt wird, die Quantentheorie dieses Detail aber nicht erfassen kann?« Dann wäre der Teilchenzustand determiniert gewesen, aber bis zur Messung verborgen geblieben.

Nach solchen verborgenen Variablen suchte der irische Physiker John Bell schon in den 1960er-Jahren. Er schlug ein Experiment vor, mit dem er sie ausfindig machen wollte: Millionen verschränkter Teilchen, so seine Idee, sollten überall auf der Erde ausgesandt werden. In speziellen Messstellen müssten Physiker ihren jeweiligen Spin bestimmen. Er berechnete die zu erwartenden Messergebnisse für beide Fälle, also wenn die Teilchenzustände vorbestimmt sind oder den Quantenregeln unterliegen. Seither wurden viele solcher Experimente durchgeführt, die alle die Quantentheorie zu bestätigen schienen. Doch der Oxford-Forscher Christian argumentiert, dass Bell den Variablen in seinen Gleichungen falsche Zahlenwerte zuordnete. Er konnte zeigen, dass sich bei Verwendung einer

anderen Zahlenfamilie (den sogenannten Quaternionen, die der irische Mathematiker William Hamilton erfand; sie sind in der Computergrafik nützlich) eine deterministische Theorie ergibt, deren Ergebnisse sich nicht von denen der Quantenmechanik unterscheiden.

Andere Physiker versuchen, die »unscharfen« Quantenzustände mit physikalischen Prozessen zu erklären, die sich auf einer tieferen Ebene, unterhalb der Größenskala der Quanten, abspielen. Gerard fHo oft etwa glaubt, dass das Vakuum, also der leere Raum, das Verhalten der Quanten bestimmt. Es kann verschiedene Energiezustände einnehmen, was aber in der Quantenmechanik ignoriert wird. Dies führe die scheinbare Zufälligkeit in der Quantenwelt herbei. Eine weitere These, diesmal von dem britischen Physiker Roger Penrose, sieht in der Gravitation die Ursache von Quantenphänomenen. Eines dieser Phänomene ist die erwähnte Uberlagerung von Teilchenzuständen, die erst endet, wenn das System gemessen wird. Dann entscheidet sich ein Partikel für einen eindeutigen Zustand, die Überlagerung zerfällt. Wieder andere Forscher sehen hierbei noch unbekannte Kraftfelder am Werk. Darauf gründet sich auch eine neuartige Quantentheorie, die der Physiker Stephen Adler vom Institute for Advanced Studies der Universität Princeton entwarf. Sie arbeitet ebenfalls mit Quaternionen. Auf der Subquantenebene ist sie deterministisch, bringt unter Einbeziehung solcher Kraftfelder aber bestimmte Eigenschaften der Quantenmechanik hervor.

Einige Wissenschaftler wollen die zufallsbestimmte Welt mithilfe einer anderen alternativen Quantentheorie überwinden, der sogenannten Bohni sehen Mechanik. Entwickelt hat sie in den 1950er-Jahren der US-Physiker David Böhm. Darin folgen die Partikel genau festgelegten Bahnen durch Raum und Zeit, und ähnlich wie bei Newtons Uhrwerk-Universum ist die Zukunft aus der Vergangenheit ableitbar. »Es handelt sich

um eine Neuformulierung der Quantentheorie, die mit der tiefen Quantenphilosophie nichts zu tun hat. Sie ist präzise, objektiv und deterministisch«, frohlockt der Physiker Sheldon Goldstein von der Rutgers Universität im US-Staat New Jersey. Böhm spann eine Idee fort, die sein französischer Kollege Louis de Broglie bereits 1927 bei der berühmten 5. Solvay-Konferenz in Brüssel vorgetragen hatte, bei der die Elite der damaligen Physiker - darunter Einstein, Bohr und Max Planck - die Quantentheorie diskutierten. Danach sollten Teilchen als Wellen erscheinen, weil sie von einer sogenannten Pilotwelle begleitet werden. Sie ist als eine Art wellenförmiges Quantenfeld jedem Teilchen zugeordnet und führt es auf seiner Bahn. Die meisten anderen Konferenzteilnehmer verwarfen das Modell aber.

Böhm griff es jedoch auf und entwickelte es weiter. Er legte ihm die Gleichungen der Quantentheorie zugrunde, interpretierte sie jedoch anders. Zudem entdeckte er darin Verbindungen zur Newton'sehen Mechanik. Der Ausgang eines Quantenexperiments ist demzufolge nicht völlig zufällig, sondern wird von bestimmten verborgenen Variablen beeinflusst. Sie lenken beispielsweise die Kopplung zweier verschränkter Elektronen. Damit wären ihre Spin-Richtungen schon vor einer Messung festgelegt. Böhm zufolge lässt sich das Doppelspalt-Experiment mit der Pilotwelle erklären. Fliegt ein Photon auf eine Doppelspalt-Wand zu, kann seine Pilotwelle beide Spalte durchdringen. Dahinter vereinigen sich beide Teilwellen wieder und bilden auf dem Schirm das bekannte Interferenzmuster. Dieser Prozess wirkt auf das Teilchen zurück und leitet es durch einen der Spalte. Das bedeutet: Das Teilchen bleibt erhalten und folgt einer eindeutigen Bahn. »Die Wellenfunktion choreographiert die Bewegung der Teilchen«, erklärt der Physiker Detlef Dürr von der Ludwig-Maximilians-Universität München, der mit Goldstein an

der Vervollständigung der Bohm'schen Mechanik arbeitet. »Dabei bleibt alles deterministisch, das Universum entwickelt sich aber so, dass der Anschein von Zufälligkeit entsteht.« Einen anderen Ansatz zur Uberwindung der Quantenmechanik verfolgt der kanadische Kosmologe Lee Smolin, der im Perimeter-Institut im Universitätsstädtchen Waterloo forscht, mit seiner griechischen Kollegin Fotini Markopoulou. Beide arbeiten an der sogenannten Schleifen-Quantengravitation. Sie behandelt den Raum selbst als quantisiert. »Er ist nicht mehr kontinuierlich, sondern gekörnt, denn er besteht aus winzigen, zusammenhängenden Elementen«, erklärt Smolin. »Diese Struktur sitzt nicht im Raum, sie ist der Raum.« Die Raumquanten sind gerade eine Planck-Länge (10 ³³ Zentimeter) groß.

Den Raum bilden die Teilchen, indem sie sich zu sogenannten Spin-Netzwerken zusammenschließen. Dabei können sie ineinander verwobene Schleifen bilden (daher der Name der Theorie) - die Welt als endloses Kettenhemd. Ein unendlich komplexes Spin-Netz, das den gesamten Kosmos abbilden würde, enthielte 10^{184} solcher Volumenatome. Die Schleifen-Quantengravitation wäre demnach die fundamentalste mögliche Theorie, und sie ist einer der wenigen Kandidaten für eine Weltformel, da sie Gravitation und Quantenmechanik auf der tiefsten physikalischen Ebene vereint. Materieteilchen existieren in solchen Netzwerken als Knoten, die frei im Raumzeit-Gewebe umherwandern können. Ihre Bewegung aber verläuft nicht glatt, sondern in Sprüngen von der Dauer der Planck-Zeit (10^{43} Sekunden). In diesem Rhythmus lagern sich die Spin-Netzwerke fortwährend um.

Diese fortwährende Umschichtung könnte zum einen die Zeit erklären. Laut Smolin wird sie durch die Abfolge von Zügen definiert, die das Netzwerk umordnen. Und sie könnte die Kausalität in die Welt zurückbringen. Denn die Umlagerung

der Netzwerke erfolgt nach bestimmten Gesetzen und lässt sich deshalb kalkulieren. Deshalb, so Smolin, sei es theoretisch möglich, »rechnerisch vorherzusagen, was in einem Experiment beobachtet werden kann.« Träfe dies zu, wäre die Beziehung von Ursache und Wirkung als fundamentales Prinzip wiederhergestellt, die von Einstein postulierte kosmische Ordnung wäre real. Sein großer Gegner Bohr, der einmal gesagt haben soll: »Wer über die Quantentheorie nicht entsetzt ist, der hat sie nicht verstanden«, wäre damit widerlegt, was Einstein sicher freuen würde. »Die (Quanten-)Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der Alte nicht würfelt«, schrieb er 1926 in einem Brief an seinen Kollegen Max Born. Wie so oft hätte er auch damit letztendlich recht behalten.

Wie entsteht Realität?

Scheint der Mond auch, wenn ich nicht hinschaue? Die Frage erscheint sinnlos. Denn es ist offensichtlich, dass der Mond nicht erlischt, wenn ich den Blick von ihm abwende. Doch über solchen scheinbaren Absurditäten grübeln die Physiker, seit es die Quantentheorie gibt.

Sie beschreibt die Welt der Elementarteilchen wie Photonen oder Elektronen. Darin gelten andere Gesetze als in unserer makroskopischen Alltagswelt. Elektronen etwa kreisen nicht auf ortsfesten Bahnen um die Atomkerne, wie dies die Planeten bei ihren Umläufen um die Sonne tun, sondern in »Wolken«. Die Physiker können allenfalls die Wahrscheinlichkeit ausrechnen, mit der sich die Teilchen an einem bestimmten Ort innerhalb dieser Wolke aufhalten.

Ein weiteres Beispiel für die Gesetze der Quantenmechanik ist der radioaktive Zerfall: Wann ein bestimmtes radioaktives Atom zerfällt, lässt sich nicht vorhersagen. Die gesamten Zerfallsreaktionen in einem Haufen strahlenden Materials folgen zwar einem statistischen Muster, jeder einzelne Zerfall ereignet sich aber zufällig.

Hinzu kommt, dass sich mehrere Quantenzustände eines Teilchens überlagern können. Eine solche Kenngröße ist die Richtung des Eigendrehimpulses (der sogenannte Spin). Die Drehachse kann nach oben oder nach unten gerichtet sein. Bleibt ein Teilchen unbeobachtet, zeigt sie in beide Richtungen zugleich. Erst wenn eine Messung seiner Quanteneigenschaften erfolgt, »entscheidet« es sich für einen bestimmten

Zustand, den dann die Messdaten anzeigen. Diese Erkenntnis führte die Physiker auch zur Frage, ob der Mond nur dann leuchtet, wenn ihn ein Betrachter anschaut.

Als Sinnbild dieser abstrusen Welt gilt gemeinhin »Schrödingers Katze« - ein Gedankenexperiment, das der österreichische Physiker Erwin Schrödinger 1935 ersann: In einer verschlossenen Kiste befindet sich eine Katze zusammen mit einem instabilen Atom und einem Fläschchen Gift. Zerfällt das Atom, schlägt ein Geigerzähler an. Über ein Relais löst er einen Mechanismus aus, der die Flasche zertrümmert. Die Katze atmet die Giftdämpfe ein und stirbt. Solange die Kiste geschlossen ist und niemand das Atom beobachtet, überlagern sich seine Quantenzustände, sodass es gleichzeitig sowohl zerfallen als auch intakt ist. Folglich ist auch die Katze gleichzeitig tot und lebendig - wie beim Atom überlagern sich beide Zustände. Diese Ungewissheit hält an, bis die Kiste geöffnet wird. Erst diese »Messung« des Systems zeigt, ob das Tier tot ist oder noch lebt.

Die seltsame, unbestimmte und verschwommene Quantenweit verwandelt sich also schlagartig in unsere fest gefügte erfahrbare Welt, wenn ein Beobachter darangeht, ein Quantenphänomen zu messen. Die Physiker nennen diesen Prozess, der unsere reale Welt erst schafft, »Dekohärenz«. Anscheinend verändern die eingesetzten Messgeräte die Welt. Sie machen Ungewisses gewiss, die sich überlagernden Zustände werden schlagartig eindeutig und ergeben präzise Daten. Doch wo und wie genau der Übergang von der mikroskopischen in die makroskopische Welt erfolgt, liegt im Dunkeln.

Eine Theorie besagt, dass die Dekohärenz einfach zu schnell erfolgt, um beobachtet werden zu können. Auch verlieren Teilchensysteme ab einer bestimmten Größe ihre Quanteneigenschaften und treten als makroskopische Objekte in

Erscheinung, die dann den bekannten physikalischen Gesetzen unterliegen. Nur: Bei welcher Größe diese Verwandlung erfolgt, ist unklar, allerdings sind bei einzelnen Molekülen, wenn sie gut von ihrer Umgebung isoliert sind, noch Quanteneigenschaften festzustellen.

Das lässt übrigens auch den Trugschluss in Schrödingers Gedankenexperiment erkennen: Die Katze in der Kiste ist ein makroskopisches Objekt und unterliegt - anders als das radioaktive Atom - nicht den Quantenregeln. Sie ist also stets entweder tot oder lebendig, nicht aber beides zugleich.

Allgemein lässt sich sagen, dass die Entkopplung von der mikroskopischen Welt eintritt, wenn ein einzelnes Teilchen mit seiner Umgebung in Wechselwirkung tritt. Dazu gibt es eine interessante neue Hypothese. Sie beruht auf dem Dualismus von Welle und Teilchen. Laut Quantentheorie besitzt ein Teilchen beide Eigenschaften: Solange es unbeobachtet bleibt, verhält es sich gleichzeitig wie eine (elektromagnetische) Welle und wie eine winzige Billardkugel. Wiederum entscheidet die Art der Messung darüber, welche dieser Eigenschaften wir schließlich wahrnehmen. Dann kollabiert die Wellenfunktion eines Teilchens, wie die Physiker sagen, und es tritt als klassischer Partikel mit eindeutigen Eigenschaften in Erscheinung.

Dieser Dualismus lässt sich theoretisch auch auf große Objekte übertragen, bis hin zum ganzen Universum. Demzufolge verharren auch diese in dem sich überlagernden Zustand, bis jemand hinschaut. Wir können demnach keine umfassende Information über die objektive Realität unserer Welt erhalten. Doch das widerspricht nicht nur dem gesunden Menschenverstand. Wir messen ja Lichtwellen und Teilchen, die von fernen Galaxien zu uns kommen. Die Beobachtungen auch mit verschiedenen Teleskopen zeigen diese Himmelsobjekte aber immer im gleichen, eindeutigen

Zustand. Es muss also quer durch den Kosmos hindurch doch eine objektive Realität geben. Wodurch aber wird sie erzeugt?

Zwei US-Physiker geben eine Antwort: Die unmittelbare Umgebung, mit der die einzelnen Quanten in Wechselwirkung treten, übernimmt die Rolle des Beobachters und lässt die Wellenfunktion kollabieren. Ein Teilchen, das - etwa im Innern eines Sterns - mit anderen zusammenstößt oder von galaktischen Magnetfeldern auf eine bestimmte Bahn gezwungen wird, erfährt also unmittelbar den Kollaps seiner Wellenfunktion. Bei diesem Vorgang erweisen sich manche Teilchenkonfigurationen als stabiler als andere.

Diese stabilen Zustände werden von den Teilchen bevorzugt eingenommen, denn dadurch werden sie »fitter« für ihre weitere Existenz. »Quanten-Darwinismus« nennen die Forscher das Phänomen, das sie auch schon durch ein Experiment bestätigen konnten. »Die Umgebung eines Teilchens spielt die Rolle eines aktiven Zeugen«, erklären sie. »Ein Reporter, der nicht nur passiv beobachtet, sondern aktiv auswählt, welche Information übermittelt wird.« Damit hätte die Festlegung des Teilchencharakters erstmals eine handfeste physikalische Erklärung gefunden. Frühere Modelle waren demgegenüber eher philosophischer Natur.

Die Fremdartigkeit der Quantenmechanik hat möglicherweise noch eine fantastische Konsequenz: Sie könnte bewirkt haben, dass unser Universum lebensfreundlich wurde und sogar die Existenz von Leben und Bewusstsein in gewisser Weise voraussah. Und, noch sinnverwirrender: Vielleicht wirkten intelligente Beobachter auf den Ursprung des Universums zurück und lenkten dabei die physikalischen Gesetze in eine für die Lebensentstehung günstige Richtung? Diese Idee entwickelte schon vor 30 Jahren der US-Physiker Archibald Wheeler.

Sein Ausgangspunkt ist die berühmte »Heisenberg'sche Unschärferelation«, die der deutsche Physiker Werner Heisenberg 1927 formulierte. Danach können jeweils zwei Messgrößen eines Teilchens, etwa sein Ort und seine Geschwindigkeit, nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmt werden. Versuche, den Ort zu messen, beeinflussen die Geschwindigkeit und umgekehrt. Die UnSchärferelation besagt noch etwas anderes: Selbst wenn die Eigenschaften eines Teilchens gemessen werden, bleibt sein Zustand zu einem späteren Zeitpunkt ungewiss. Das bedeutet, dass es sehr viele zukünftige Zustände einnehmen kann, die es auf unterschiedlichen Pfaden erreicht. Umgekehrt hatte es auch in der Vergangenheit viele mögliche »Historien«, die es zu seinem Zustand in der Gegenwart führten. Nach den Regeln der Quantenmechanik müssen alle diese parallelen Realitäten miteinander verschmelzen, um den aktuellen Teilchenzustand zu erhalten.

Das gilt auch, wenn die Quantenregeln auf das gesamte Universum angewandt werden. Darüber zerbrach sich der gelähmte britische Physiker und Kosmologe Stephen Hawking den Kopf. Es sei ein Fehler, zu glauben, dass es nur eine klar definierte Geschichte des Kosmos gebe, meint er. Stattdessen gebe es eine Vielfalt von möglichen Geschichten, und welche davon in die Menge der realisierten Historien eingeht, hänge von den Messungen ab, die wir heute vornehmen.

Damit aber würden wir durch unsere Eingriffe in die Quantenwelt die Vergangenheit des Universums beeinflussen. »Das führt zu einer tiefgreifend anderen Betrachtungsweise in der Kosmologie«, erklärt Hawking, »auch die Beziehung zwischen Ursache und Wirkung ändert sich.« Sein US-Kollege Wheeler entwarf sogar ein Experiment, das es ermöglicht, die Veränderung von Quantenzuständen in der Vergangenheit zu beeinflussen. In der Praxis reicht es nur ein paar Nanosekun-

den zurück, doch prinzipiell könnte sich der Effekt auf Milliarden von Jahren ausdehnen lassen.

Wheeler zog daraus eine radikale Schlussfolgerung: Die Existenz von Leben und Beobachtern im heutigen Universum könnte nicht nur das Verhalten von Quanten systemen zu Beginn des Universums beeinflusst haben, sondern auch die Festlegung der Naturkonstanten. Diese aber sind gerade so aufeinander abgestimmt, dass Galaxien, Sterne, Planeten und auch Leben entstehen konnten. Schon winzige Änderungen bei einer der Fundamentalkonstanten würden das Universum so stark verändern, dass darin kein Leben mehr aufblühen kann.

Wäre etwa die Gravitation schwächer, als sie ist, hätten sich Sterne und Planeten nie bilden können. Ebenso gäbe es ohne eine präzise eingestellte elektromagnetische Kraft - sie lässt unter anderem den elektrischen Strom fließen - weder stabile Atome noch chemische Reaktionen und folglich auch kein Leben. Unsere Existenz und die Lebensfreundlichkeit des Universums würden demnach in einer selbstkonsistenten Rückkopplungsschleife unmittelbar zusammenhängen.

Zwar fehlen für diese gewagte Hypothese bis heute die Beweise, und viele Physiker lassen kein gutes Haar an ihr. Wheeler selbst spricht von »einer Idee für eine Idee«. Jetzt hoffen ihre Befürworter, sie mit neuen Quantenexperimenten testen zu können. Würde Wheelers These bestätigt, wäre das Universum noch seltsamer, als wir heute glauben. Doch wenigstens hätte der Ursprung der Naturgesetze, die bisher ohne erkennbare Ursache zu existieren scheinen, eine überraschende Erklärung gefunden, und auch wir, die Beobachter des Universums, würden einen neuen Platz in der kosmischen Szenerie einnehmen - nämlich zumindest teilweise den des Schöpfers.

Ist Beamen möglich?

eam me up, Scotty« - das Kommando ist Kult bei den Fans der Science-Fiction-Serie »Star Trek«, und nicht nur bei diesen. In der Regel gab Captain Kirk die Order an seinen Chefingenieur Scotty, wenn er mit seinen Mannen von der Oberfläche eines fernen Planeten wieder an Bord des Raumschiffs »Enterprise« zurückkehren wollte. Die Truppe löste sich in einen farbigen Nebel auf und erschien praktisch ohne Zeitverlust im Transporterraum des Raumschiffs wieder. Die Technik erlaubt somit den Transport von Gegenständen oder Personen von einem Ort zum anderen, ohne dass diese den Weg zwischen Sendeort und Empfangsort zurücklegen müssen.

»Gebeamt« (von englisch »beam« = Strahl) wird hauptsächlich in der englisch sprachigen Science-Fiction-Literatur. Deutschsprachige Autoren sprechen dagegen von »Teleportation« (abgeleitet aus dem Lateinischen heißt das etwa »in die Ferne tragen«). Im Lauf der Zeit wurde das Thema vielfach variiert, dabei ersannen die Verfasser eine Reihe hypothetischer Teleportationstechniken. Den Anfang machte vermutlich der Brite Fred T. Jane, der schon 1897 in seiner Erzählung »To Venus in Five Seconds« das rätselhafte Verschwinden eines Drogisten per Teleportation schilderte. In dem 1958 gedrehten Film »Die Fliege« gerät eine Fliege in einen Transmitter, und der Protagonist kommt halb als Fliege und halb als Mensch ans Ziel. Das Sternentor in den »Stargate «¥ihnen teleportiert nicht direkt, sondern öffnet zuvor

ein Wurmloch. Durch diesen Tunnel durch Raum und Zeit schickt der Ringtransporter die in Energie umgewandelte Materie zu einem anderen Sternentor, das die gesendeten Objekte rekonstruiert.

In »Star Trek« wiederum werden Kirk und seine Mitstreiter zunächst in einen »subatomar unverbundenen Materiestrom« umgewandelt. Ein Techniker programmiert die Zielkoordinaten in das Transportersystem, dann nehmen Molekularbildscanner das Quantenmuster der Körper auf und strahlen die Information weiter an den Zielort, wo die Teilchen nach dem gespeicherten Muster wieder zusammengesetzt werden. Der Materiestrom fliegt mit fast Lichtgeschwindigkeit bis zu 40000 Kilometer weit - genug also, um den Transport aus dem Orbit auf einen Planeten und zurück zu bewältigen.

Für einen interstellaren Transport genügt dies jedoch nicht. Dafür entwickelten einige Forscher eine Alternative: Die Objekte werden in subatomare Teilchen zerlegt, ein Scanner erfasst deren Position sowie ihre jeweiligen Quantenzustände, etwa den Eigendrehimpuls (Spin). Der Sender übermittelt diese Information an den Empfänger. Diesmal aber wird nicht die Materie selbst teleportiert, sondern nur die Zustandsinformation. Diese könnte in einem lichtschnellen Laserstrahl kodiert werden, das Ursprungsobjekt würde bei diesem Vorgehen zerstört.

Deshalb muss der Empfänger neue Teilchen aus einer Art Vorratskasten am Empfangsort entnehmen, um das Objekt rekonstruieren zu können. Ein aus Legosteinen gebautes Modell macht den Prozess anschaulich. Der Sender nimmt das Gebilde auseinander und notiert sich Art und Position jedes Bausteins. Dann ruft er den weit entfernten Empfänger an und übermittelt diesem die Daten. Nun kann der Partner aus seiner Legokiste ein identisches Modell wieder aufbauen.

Nur: In der Realität wird es diese Technik höchstwahrscheinlich nie geben. Denn neben immensen technischen Schwierigkeiten stehen ihr die Gesetze der Quantenphysik entgegen. In seinem Buch »Die Physik von Star Trek« schildert der US-Astrophysiker Lawrence Krauss die Probleme, die sich für das Beamen ergeben. So müsste ein Objekt vor der Teleportation auf etwa eine Milliarde Grad Celsius erhitzt werden, um seine Atome aus ihren Bindungen zu lösen. Diese Höllenhitze zerstört es mit Sicherheit. Zudem benötigt eine solche Maschine mehr Energie, als die gesamte Menschheit gegenwärtig produziert. Müsste man die Atome noch in ihre Bestandteile - die Quarks - zerlegen, stiege der Energiebedarf nochmals gewaltig an. Darüber hinaus verschlingt die Beschleunigung des Materiestroms auf nahezu Lichtgeschwindigkeit weitere Energie.

Das Energieproblem ließe sich zwar prinzipiell lösen, etwa, indem die Menschheit riesige Kraftwerke in Sonnennähe im All platziert und unser Tagesgestirn anzapft. Ein anderes Hindernis ist aber grundsätzlicher Natur: Ort und Impuls eines Teilchens lassen sich nicht gleichzeitig präzise bestimmen. Dies ergibt sich aus der Heisenberg⁵sehen Unschärferelation. Deshalb kann ein Sender auch keine vollständige Information über das Objekt an den Empfänger übermitteln. Dessen identische Rekonstruktion funktioniert also nicht.

Allerdings könnte ein Trick aus dieser Sackgasse herausführen. Er wurde bereits von mehreren Arbeitsgruppen erfolgreich angewendet. Schlagzeilen machten insbesondere die Experimente des Wiener Physikers Anton Zeilinger. Er nutzt das Phänomen der »Verschränkung« von Teilchen. Durch spezielle physikalische Prozesse werden ihre Eigenschaften untrennbar miteinander verbunden. Ein Lichtstrahl etwa kann durch einen fotoaktiven Kristall geschickt werden, der den Strahl teilt. Je zwei Photonen werden dann unterschied-

lieh polarisiert, bilden aber ein gemeinsames System. Wird die Polarisation des einen Photons gemessen, folgt daraus direkt die Polarisation des anderen Photons. Es ist, als ob eine von zwei genau gleichen Münzen, die auf einem Tisch rotieren, zufällig auf »Kopf« fällt. In einem verschränkten System fiele die zweite Münze sofort auf »Zahl«, weil sie nicht mehr unabhängig von der ersten umfallen kann. Die Verschränkung bleibt bestehen, auch wenn die Teilchen Lichtjahre voneinander entfernt sind.

Solche Systeme nutzte Zeilinger, um die Quanteninformation von Teilchen über größere Entfernung zu »teleportieren«. Er verschränkte zwei Photonen, von denen eines mit einem dritten Photon in Wechselwirkung gebracht wird. Es überträgt die Information über den Quantenzustand von Photon Nummer eins ohne Zeitverzögerung und theoretisch über beliebige Entfernungen auf Nummer drei. Damit wird wohlgemerkt aber nur die Information über den Quantenzustand eines Teilchens übertragen, keineswegs das Teilchen selbst. Bislang gelang es auf diese Weise, Informationen von Makromolekülen zu übertragen. Zeilinger schätzt, dass dies bei Objekten bis zur Größe von Viren noch gelingen könne. Dann aber ist Schluss: Noch größere Objekte (oder gar Menschen) lassen sich auf diese Art nicht teleportieren.

Dafür gibt es mehrere Gründe. So ist es extrem schwierig, den Zustand der Verschränkung zwischen den Teilchen aufrechtzuerhalten. Schon geringste Störungen, etwa die Kollision mit einem Gasmolekül, lässt das verschränkte System kollabieren. Deshalb muss es streng von seiner Umgebung isoliert werden, was bei Vielteilchen systemen kaum zu machen ist. Außerdem steigen die zu sendenden Datenmengen mit der Masse des Objekts ins Astronomische.

Zeilingers amerikanischer Kollege Krauss errechnete, dass das Transfermuster eines Menschen zehn Quadrilliarden (das

sind 10²⁸ oder eine 1 mit 28 Nullen) Kilobyte Speicherplatz benötigt. Dies entspricht einer Säule aus jeweils zehn Zentimeter dicken 10-Gigabyte-Festplatten, die 10000 Lichtjahre lang ist. Die »Enterprise« würde mit der zweithöchsten Stufe ihres Uberlichtgeschwindigkeitsantriebs (Warp 9) fünf Jahre benötigen, um die Säule abzufliegen. Andererseits machen die Forscher bei der Lösung dieser Probleme Fortschritte. So gelang es einer Physikergruppe an der Universität Paris, nicht nur Lichtteilchen, sondern Atome miteinander zu verschränken. Ein dänisches Team um den Physikprofessor Eugene Polzik (Universität Aarhus) schaffte es sogar, viele Milliarden Cäsiumatome in zwei getrennten Containern mittels Laserstrahlen zu verschränken, wenn auch nur für sehr kurze Zeit. In ferner Zukunft könnten Steigerungen von Ubertragungsraten in Netzwerken und bei der Datenkompression helfen, die gigantischen Datenmengen zu bewältigen.

Es bleiben aber die quantenphysikalischen Beschränkungen. Um sie zu umgehen, ersannen die »Star Trek«-Erfmder Fantasiegeräte wie den »Heisenberg-Kompensator«, der die »Quantenauflösung« von Objekten gestattet. Auf die Frage, wie der denn funktioniere, soll der technische Berater der Serienautoren, Michael Okuda, geantwortet haben: »Gut, danke.« In Wahrheit aber weiß kein Mensch, wie eine solche Maschine arbeiten könnte.

Schlussendlich stellen sich ethische Fragen: Kommt bei einer Teleportation nach »Star Trek«-Art wirklich der Original-Mensch wieder zum Vorschein - und nicht etwa nur eine Kopie oder gar mehrere? Und: Teleportationen mittels verschränkter Teilchen erzeugen Kopien. Kehrt bei ihnen jedes reproduzierte Atom zuverlässig zurück in seinen Urquantenzustand, sodass ein identischer Mensch mit den gleichen Erinnerungen und Gefühlen wie das Original entsteht? Dies alles ist völlig unklar. Die Fragen ließen sich nur klären, wenn

sich Freiwillige beamen ließen, sofern irgendwann einmal ein Materietransmitter bereitstünde. Doch sie würden ein hohes Risiko eingehen.

Insgesamt sieht es so aus, als ob die Teleportation dem Reich der Science-Fiction vorbehalten bleibt. So verlockend die Vorstellung ist, zum Abendessen in Sekundenschnelle nach Paris gelangen zu können oder zu einer Expedition auf die Oberfläche eines fernen Planeten, so wenig realistisch erscheint die Aussicht, dass Menschen dies jemals wirklich erleben werden. Die Quantenmechanik dürfte dauerhaft verhindern, dass Scotty das Kommando »Beam me up« jemals in der Realität durchführt.

Was ist Licht?

Licht, so die gängige Vorstellung, hat eine Doppelnatur: Einmal tritt es als Teilchen auf und einmal als Welle, je nach der gewählten Versuchsanordnung, mit der die Physiker die Eigenschaften des Lichts erforschen wollen. Das läuft dem gesunden Menschenverstand zuwider: Wie kann etwas weiche Welle und fester Körper zugleich sein? In Wahrheit stellt sich die Frage so nicht. Denn vermutlich sind die Lichtteilchen (Photonen) tatsächlich ausschließlich Wellen, die in bestimmten Situationen die Teilcheneigenschaft lediglich vorgaukeln.

Licht ist eine elektromagnetische Welle, die sich aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern zusammensetzt. Sie baut sich aus Schwingungen des elektromagnetischen Feldes auf, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Das elektromagnetische Spektrum geht weit über das sichtbare Licht hinaus, es umfasst Radio- und Mikrowellen, Infrarotstrahlung, UV-Licht sowie Röntgen- und Gammastrahlung.

Zwar besitzt Licht keine Ruhemasse, das heißt, ein Photon fliegt mit der im jeweiligen Medium gültigen Lichtgeschwindigkeit oder es verschwindet. Doch auch für die Lichtteilchen gilt die von Einstein entdeckte Äquivalenz von Masse und Energie, ausgedrückt in der Formel E = mc². Das bedeutet, dass auch Photonen eine Masse besitzen und damit einen Impuls übertragen können, und dass sie in starken Gravitationsfeldern abgelenkt werden. Diese Impulsübertragung

wollen sich manche Raumschiffkonstrukteure zunutze machen, indem sie am Heck ihres Raumkreuzers eine riesige Folie aufspannen. Photonen, die auf die Folie treffen, hätten den gleichen Effekt wie Luftmoleküle, die mit dem Wind auf das Segel einer Jacht prallen: Sie übertragen ihren Impuls auf das Segel und treiben das Schiff so an.

Der Streit um die Natur des Lichts begann schon früh. Der niederländische Forscher Christiaan Huygens entwarf die Wellentheorie. Sie fußt auf der Beobachtung, dass Licht, das durch schmale Spalte gesandt wird, helle und dunkle Streifen bildet. Diese können nur entstehen, wenn Lichtwellen sich an den hellen Stellen gegenseitig verstärken, sich an den dunklen Stellen aber gegenseitig auslöschen. Das entspricht genau dem Verhalten von Wasserwellen, etwa wenn jemand zwei Steine nebeneinander in einen Teich wirft und die dadurch erzeugten Wellen aufeinandertreffen.

Der englische Physiker Isaac Newton hingegen betrachtete Licht als Strom zwar unwägbarer, doch schnell dahinfliegender Teilchen. Anhand dieser Definition konnte er die Zerlegung des Sonnenlichts in Spektralfarben erklären. Auch der Fotoeffekt, für dessen Deutung Albert Einstein den Nobelpreis erhielt, war am besten mit der Idee vereinbar, Lichtteilchen verhielten sich wie winzige Billardkugeln. Dies lässt sich am Beispiel von Sonnenzellen, die aus Halbleitern bestehen, verdeutlichen. Die kleinen Kugeln übertragen beim Auftreffen auf das Material so viel Energie, dass sie Elektronen aus den Atomhüllen schlagen und so Strom erzeugen.

Welche der Alternativen aber trifft nun zu? Eine einleuchtende Erklärung fand der Heidelberger Physikprofessor Otto Greulich, der inzwischen am Institut für Molekulare Biologie in Jena forscht. Nach seiner Überzeugung ist »alles Welle«. Das Teilchenbild, meint er, leite sich vom Quantenbild der Photonen ab, das in den 20er-Jahren entstand. Danach besteht Licht

aus kleinen »Energieportionen«, die ihre Energie wie die besagten Billardkugeln auf andere Teilchen übertragen können. Das aber sei irreführend. Denn tatsächlich bestehe Licht ausschließlich aus Wellen, die allerdings die Eigenschaften von Teilchen annehmen können. Seine Vorstellung erklärt Greulich anhand von Wellen am Strand: Baden Menschen im Wasser, empfinden sie kleine Wellen als weich und angenehm. Deren Energiegehalt reicht aber aus, um Sandburgen zu zerstören.

Das gleiche Wasser ändert seinen Charakter jedoch dramatisch, wenn es - etwa nach einem Seebeben - in Form eines gewaltigen Tsunami an Land brandet. Dann wirkt es betonhart und zerschmettert alles, was ihm im Weg steht, Menschen ebenso wie Häuser. Dies zeige, wie Wellen mit anwachsender Energiedichte zunehmend Teilcheneigenschaften annehmen können. Ob wir ein Photon als Welle oder Teilchen wahrnehmen, hängt laut Greulich daher vom Detektor ab. Entscheidend sei das Verhältnis der Energiedichte der Photonen zu der des Empfängers. Bei Radiowellen ist die Energiedichte klein gegenüber dem Metall der Antennen. Energiereiche Gammastrahlen dagegen werden als Teilchen empfunden, denn ihre Energiedichte ist gegenüber dem Detektormaterial sehr hoch. Aus diesem Grund spricht - anders als bei den Radiowellen niemand von Gammawellen. Photonen des sichtbaren Lichts liegen genau im Übergangsbereich zwischen »weicher« und »harter« elektromagnetischer Strahlung. Deshalb, so Greulich, sei es nicht verwunderlich, dass mit ihnen der Welle-Teilchen-Dualismus formuliert wurde.

Diese Idee lässt noch eine viel weiter gehende Schlussfolgerung zu: Vermutlich bestehen alle Teilchen, also auch die »festen« Atome, aus Wellenpaketen. In der Quantenmechanik ist diese Sichtweise nicht neu. Sie ergab sich bereits aus den Formeln, die der französische Physiker Louis de Broglie entwarf:

Er ordnete jedem Teilchen eine Wellenfunktion zu. Womöglich sind die Elementarteilchen einfach dreidimensionale stehende Wellen, deren Schwingungsmodus ihre jeweiligen Eigenschaften bestimmt. Dann würde nicht nur das Licht aus Wellen bestehen, sondern die ganze materielle Welt.

Damit ist jedoch immer noch nicht genau erklärt, was ein Photon eigentlich ist. An dieser Frage biss sich bereits Albert Einstein die Zähne aus. »Heute glaubt jeder Lump, er wisse, was ein Photon ist, aber er irrt sich«, seufzte er 1950 ratlos. Jetzt skizzieren Greulich und einige seiner Fachkollegen ein neues Bild des Lichtteilchens. Danach gleicht es zwei sich gegenüberstehenden Wolken aus unterschiedlichen elektrischen Ladungen. Sie ziehen einander an und werden dabei nach klassischen Gesetzen der Elektrodynamik so abgelenkt, dass ein ringförmiger elektrischer Strom entsteht.

Mit diesen Eigenschaften gleicht das Photon einem Oszillator, dessen Ladungen rasch schwingen. Ähnlich verhält sich ein spezieller Schwingkreis, der Bestandteil vieler elektronischer Bauteile ist. Die Schwingungen erzeugen abwechselnd elektrische und magnetische Felder, die das Teilchen im Vakuum des Alls genau mit Lichtgeschwindigkeit vorantreiben. Dieses Modell erklärt, warum energiereiche Gammaquanten in Elektronen und Positronen zerfallen können, die entgegengesetzte elektrische Ladungen tragen: Bei einem solchen Zerfallsprozess werden die Ladungswolken dauerhaft getrennt. Umgekehrt zerstrahlen sich diese Teilchen gegenseitig, wenn sie aufeinandertreffen. Dabei entsteht ein Gammaquant, das dann beide Ladungsarten in sich tragen muss. Noch ist diese Theorie über die Natur des Lichts nicht vollständig, auch ist sie noch nicht als allgemeingültig anerkannt, dazu ist sie noch zu neu. Doch sie liefert frische Antworten auf die alte Frage, was Photonen wirklich sind.

Was ist es, das die Welt im Innersten zusammenhält?

Zu werkennen, was die Welt im Innersten zusammenhält«, darum mühte sich nicht nur Faust in Goethes gleichnamiger Tragödie, der wir das weltberühmte Zitat verdanken. Bereits in der Antike sinnierten insbesondere die griechischen Philosophen über Struktur und Aufbau des ihnen bekannten Universums. Ihnen - genauer dem Denker Demokrit und seinem Lehrer Leukipp - verdanken wir die Einsicht, dass die Materie aus kleinen Teilchen besteht, den von ihnen so genannten Atomen (von griechisch watomos« - unteilbar).

Heute wissen die Naturforscher bedeutend mehr über die Struktur der materiellen Welt. Zusammengehalten wird sie von den Naturkräften. Vier davon sind bekannt. Von ihnen spielt im Alltag die Schwerkraft (Gravitation) die größte Rolle. Sie bewirkt, dass sich Massen gegenseitig anziehen, und sie kann, wie wir seit Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie wissen, den Raum krümmen. Sie ist es, die das Universum im Großen zusammenhält. Galaxienhaufen, die auf der kosmischen Größenskala weit oben stehen, werden von der Gravitation ebenso zusammengehalten wie Sternhaufen in den einzelnen Galaxien oder Sonnensysteme, in denen Planeten um ihre Muttersterne kreisen.

Die Gravitation bewirkt auch, dass kalte Gasnebel in sich zusammenstürzen. Dabei verdichten sie sich und erhitzen sich schließlich so sehr, dass in ihrem Zentrum ein neuer Stern aufflammt. Danach hält sie die neu entstandenen Sterne in der

Balance. Denn die Schwerkraft zieht die Materie weiter in Richtung auf deren Zentrum. Dort laufen jedoch aufgrund des hohen Drucks und der höllenheißen Temperaturen Kernfusion sreaktionen ab. Sie erzeugen die Energie, die die Sterne leuchten lässt. Die bei der Fusion freigesetzte Strahlung treibt die durch das Sterninnere wabernden Gasmassen nach außen. Schließlich stellt sich zwischen beiden Bewegungen ein Gleichgewicht ein, das im günstigsten Fall - wie bei unserer Sonne - über Jahrmilliarden anhält. Dadurch wurde die Entstehung von Leben auf der Erde erst möglich.

Für den Zusammenhalt der Materie sind weitere Naturkräfte von Bedeutung. Zunächst die Elektromagnetische Kraft (oder, wie die Physiker sagen: Wechselwirkung). Sie richtet die Kompassnadeln nach Norden aus und lässt Strom durch die Leitungsdrähte fließen. Vor allem aber hält sie Elektronen auf ihrer Umlaufbahn um die Atomkerne. Diese Eigenschaft bildet die Grundlage der Chemie. Denn sie ermöglicht den Atomen, sich mit anderen zu Molekülen zu verbinden. Aus diesen wiederum bestehen die Planeten, Berge, Flüsse, Häuser und die Körper der Lebewesen, einschließlich des Menschen. Die Elektromagnetische Kraft hält somit die um uns befindlichen und für uns wahrnehmbaren Dinge zusammen.

Die nächste Kraft, die sogenannte Schwache Wechselwirkung, bewirkt den radioaktiven Zerfall von Atomen, was für unseren Alltag weniger bedeutsam ist. Umso wichtiger ist die vierte im Bunde, die »Starke Wechselwirkung«. Sie hält die Welt schon recht tief innen zusammen, nämlich auf der Ebene der Atomkerne. Diese sind nicht »elementar«, sondern setzen sich aus weiteren Teilchen zusammen, nämlich den Protonen und Neutronen. Auch diese sind zusammengesetzt: Sie bestehen aus den sogenannten Quarks. Je drei von ihnen bilden, je nach ihrer elektrischen Ladung, entweder ein Proton oder ein Neutron.

Das ist aber nur die halbe Geschichte. Denn es genügt nicht, drei Quarks quasi in einen Sack zu stecken, um daraus ein Proton zu machen. Es braucht vielmehr ein weiteres Teilchen, das die Quarks in ihrem Behältnis zusammenbindet. »Bindeteilchen« heißt entsprechend diese Art von Partikeln. Die Physiker nennen sie »Gluonen«, vom englischen Wort »glue«, zu Deutsch: Klebstoff. Sie schwirren in den Protonen und Neutronen unablässig um die Quarks und verschweißen sie so zu einem größeren Teilchen (der Prozess ist in Wahrheit viel komplizierter und auch noch nicht in allen Details verstanden). Anders ausgedrückt, vermittelt das Gluon die Bindung zwischen den Quarks. Bei der Elektromagnetischen Wechselwirkung ist es das Photon, das die Wechselwirkung vermittelt, bei der Schwachen Kraft sind es »Bosonen« und bei der Schwerkraft »Gravitonen«. Diese sind jedoch rein hypothetisch, ein Nachweis ihrer Existenz ist den Physikern bis heute nicht geglückt. Theoretisch beschrieben wird das Zusammenwirken von Kräften und Teilchen im Standardmodell der Elementarteilchen.

So hält also dieses ewige Wechselspiel die Welt zusammen, aber vielleicht noch nicht im Innersten. Denn es gibt Hinweise aus kernphysikalischen Experimenten, dass auch Quarks und Elektronen, die bislang als elementar gelten, aus noch kleineren Teilchen zusammengesetzt sind. Träfe dies zu, könnte sich das Spiel auf noch tieferen Ebenen wiederholen. Einmal aber erreichen die Teilchen die Planck-Länge, also die kleinstmögliche Ausdehnung im Universum. Unter dieser Grenze kann es keine Strukturen mehr geben.

Womöglich liegt die endgültige Antwort auf die Eingangsfrage in diesen unvorstellbar winzigen Bereichen verborgen. Das jedenfalls glauben die Erfinder der Schleifen-Quantengravitation. Die besagt ungefähr Folgendes: In diesen winzigen Dimensionen ist der Raum nicht mehr »glatt«, wie wir ihn

wahrnehmen, sondern besteht aus winzigen Quanten. Gäbe es ein Mikroskop mit entsprechender Vergrößerung, würden Abbildungen nicht mehr die normalen glatten Konturen aufweisen, sondern stark verpixelt erscheinen. Der Raum also besteht aus winzigen Elementen, die miteinander verbunden sind. Sie befinden sich nicht im Raum, sondern sie *sind* der Raum. Jedes Raumquant nimmt ein Planck-Volumen ein, das 10 99 Kubikzentimeter entspricht. Den Raum bilden die Teilchen, indem sie sich zu Netzwerken zusammenschließen. Dabei können sie ineinander verwobene Schleifen bilden. Der Kosmos wäre ein unendlich komplexes Netz aus solchen Volumenatomen.

Die Theorie hat Charme, manche Kosmologen sind von ihr begeistert. Angesichts der winzigen Dimensionen, die sie beschreibt, lässt sie sich wohl auf lange Sicht nicht beweisen. Träfe sie jedoch zu, würde sie die Antwort auf die Menschheitsfrage liefern, die schon Goethe um trieb: Dann hielten die winzigen subatomaren Schleifen die Welt im Innersten zusammen.

Gravitation

Wie entstehen Gravitationskräfte?

Anfang der wissenschaftlichen Gravitationsforschung stand der Apfel. Dem Physiker Isaac Newton, so wird überliefert, soll eine solche Frucht auf den Kopf gefallen sein, als er grübelnd in seinem Garten saß. Um 1680 hatte der große britische Gelehrte mit seinen Arbeiten über die Bewegung der Planeten im Sonnensystem begonnen. Der Fall des Apfels habe ihn auf die Idee gebracht, die Himmelsmechanik beruhe auf demselben Mechanismus wie der Fall von Gegenständen auf die Erde. Allerdings ist die schöne Geschichte keineswegs gesichert; manche Historiker glauben, Newton habe das Histörchen selbst erfunden, um seine Methode zu illustrieren, aus Alltagsbeobachtungen wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen.

Tatsache aber ist, dass Newton in jenen Jahren intensiv über diese seltsame Anziehungskraft nachdachte, die Gegenstände stets nach unten, niemals aber nach oben, von der Erde weg, bewegt. Er erkannte, dass alle Körper, die Masse haben, einander anziehen, und erstellte in der Folge die Formeln zur Berechnung der zwischen den Körpern wirkenden Kräfte. Damit konnte er die zuvor von Johannes Kepler gefundenen Gesetze zu den Bahnbewegungen der Planeten erklären. Diese Ergebnisse legte er in seinem 1687 erschienenen Hauptwerk »Philosophiae Naturalis Principia Mathematica« dar. Das Wesen der Gravitation aber blieb ihm verborgen. Er vermute-

te, sie sei eine den Körpern innewohnende Eigenschaft. Ubertragen werden sollte sie durch die Fernwirkung von Kraftfeldern, die jeden Körper umgeben - und zwar »instantan«, das heißt, sie wirkt ohne Zeitverlust und breitet sich somit unendlich schnell im Universum aus.

Erst Albert Einstein gelangte über das von Newton skizzierte Bild der Gravitation hinaus. Er erweiterte dessen Theorie zur Allgemeinen Relativitätstheorie. Darin erklärte er die Schwerkraft geometrisch: Die Körper krümmen den Raum und folgen daher kurvenreichen Pfaden durch das Universum. Objekte und Raumkrümmung beeinflussen sich also gegenseitig. Große Massen krümmen den Raum stärker als kleine, massearme Objekte fallen deshalb auf schwergewichtigere Körper zu. Relativitätstheoretiker illustrieren dies gern mit dem Bild vom aufgespannten Gummituch, in das eine große Metallkugel gelegt wird. Sie erzeugt eine große Delle im Tuch. Wird eine kleine Holzkugel in ähnlicher Weise wie eine Roulettekugel in die Delle geworfen, rollt sie auf die große Kugel zu. Dies soll zeigen, dass die Gravitation zwischen zwei Massen über die lokale Krümmung der Raumzeit vermittelt wird.

Das neue Weltbild brachte gegenüber Newtons Konzept grundlegende Neuerungen: Ändern große Massen ihre Bahn, verändern sie die Krümmung der Raumzeit. Sie wird gewissermaßen gestaucht und dehnt sich danach wieder aus. Dies geschieht mit besonderer Wucht bei der Kollision zweier Schwarzer Löcher. Diese kurzfristige Kontraktion pflanzt sich durch das All fort - eine Gravitationswelle entsteht. Sie läuft aber nicht unendlich schnell, sondern ist auf die Lichtgeschwindigkeit begrenzt. Inzwischen fahnden mehrere Forschungsinstitute - eines davon ist das deutsche Projekt »Geo 600« bei Hannover - nach den Gravitationswellen, bislang ohne Erfolg.

Ein drittes Konzept der Gravitation ergibt sich aus der Forderung, die Relativitäts- mit der Quantentheorie zur sogenannten Quantengravitation zu verbinden. Diese Theorie wäre die von vielen Forschern händeringend gesuchte Weltformel. Während Einsteins Relativitätstheorie Struktur und Dynamik der Welt im Großen beschreibt, also die Bewegungen von Galaxien, Galaxienhaufen, Sternen und Planeten (natürlich auch von fallenden Äpfeln, obwohl dafür auch weiterhin die viel einfacheren Formeln Newtons genügen), versagt sie in der Welt der Elementarteilchen. Dort gilt die Quantentheorie. Die Quantengravitation ist der Versuch, beide Formelwerke, die sich durch ihre mathematischen Ansätze grundlegend unterscheiden, doch zu vereinen.

Doch in der Quantenwelt vermitteln bestimmte Teilchen - sogenannte Bindeteilchen - die Kräfte, die zwischen den massiven Teilchen wirken. Ein Beispiel ist die Starke Kraft, die Atomkerne zusammenhält. Sie wird von den sogenannten Gluonen (»Klebeteilchen«) vermittelt, die in den Atombausteinen (Neutronen und Protonen) umherflitzen. Ein ähnliches Bindeteilchen sollte laut der Quantengravitation auch die Schwerkraft vermitteln. Die Physiker tauften es »Graviton«. Massive Körper werden nach diesem Konzept durch den Austausch von Gravitonen aneinandergekoppelt. Gesichtet wurde dieses Teilchen jedoch noch nicht.

Diesen Ideen ist gemeinsam, dass die Schwerkraft - wie immer sie vermittelt wird - die Körper im Universum zueinander zieht. Dies gilt auch für unser Planetensystem und damit für das System Sonne-Erde. Ein Gedankenexperiment zeigt, welche Bedeutung die Schwerkraft für die Erde und das Leben darauf hat. Unser Planet umkreist unseren Mutterstern in 150 Millionen Kilometer Entfernung. Diese Distanz durchfliegt das Licht in acht Minuten, die Sonne ist also acht Lichtminuten von uns entfernt. Würde sie plötzlich erlö-

sehen - etwa, weil die energieliefernden Fusionsprozesse in ihrem Innern plötzlich enden -, wäre es acht Minuten später auf der Erde finster. Wenn unser Mutterstern als gravitierender Körper erhalten bleibt, so fliegt die Erde samt der anderen Planeten unbeeinträchtigt auf ihrer Kreisbahn weiter. Nur wäre alles Leben auf der Erde in kurzer Zeit erstorben. Verschwindet die Sonne dagegen aus dem Zentrum des Planetensystems - dies könnte etwa durch den Zusammenprall mit einem massereichen Schwarzen Loch geschehen -, geschähe etwas ganz anderes. Weil sich auch die Gravitation mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzt, würde acht Minuten später die Anziehungskraft der Sonne abrupt enden. Dann fliegt die Erde einfach geradeaus weiter, tangential zu ihrer bisherigen Bahn, und verschwindet mit ihrer durchschnittlichen Bahngeschwindigkeit von 29,78 Kilometer pro Sekunde in der Schwärze des Alls. Ebenso erginge es allen anderen Planeten.

Die verschiedenen Konzepte lassen erkennen, dass wir mit unserem Verständnis vom Wesen der Gravitation nicht viel weiter gediehen sind als weiland Isaac Newton. Vielleicht beflügelt aber eine neue Idee unser Verständnis. Sie leitet sich von einer speziellen Theorie über die Massenträgheit ab. Diese Kraft presst uns z. B. bei jedem Flugzeugstart in den Sitz. Physikalisch gesehen leistet die Materie Widerstand gegen die Beschleunigung. Zunächst schlug der österreichische Physiker Ernst Mach eine Erklärung vor: Er glaubte, die Gravitationsfelder aller im All vorhandenen Massen würden auf beschleunigte Körper wirken und dabei die Massenträgheit erzeugen.

Eine Forschergruppe um den US-Astrophysiker Bernhard Haisch entwickelte jedoch eine andere, geradezu revolutionäre Idee: Trägheit werde bewirkt durch die sogenannte Vakuumenergie. Das Vakuum des Weltalls - der leere Raum also, in

dem keine Materieteilchen vorhanden sind - ist nicht wirklich leer. Infolge quantenmechanischer Gesetze springen Partikel für winzige Sekundenbruchteile in die Existenz und verschwinden sofort wieder. Sie hinterlassen aber Spuren in Form elektromagnetischer Felder, die das ganze Universum erfüllen.

Teilchen, die sich gleichförmig in diesem Energiesee bewegen, bemerken von dessen Existenz nichts, so wie ein in einer Badewanne ruhender Mensch körperwarmes Wasser nicht fühlt. Erst wenn Atome beschleunigt werden, treten ihre elektrisch geladenen Bausteine - etwa die Elektronen in den Atomhüllen - in Wechselwirkung mit dem universellen Elektromagnetischen Feld. Wie ein Flugzeug den Luftwiderstand fühlen sie eine Kraft, die sie zu bremsen sucht - eben die Trägheit.

Somit wäre Massenträgheit nichts als ein elektromagnetisches Phänomen. Sie ist aber mit Masse verknüpft - und somit auch mit der Gravitation. Folglich hängt auch die Schwerkraft mit der Elektromagnetischen Kraft zusammen. Diese Naturkraft lässt unter anderem den elektrischen Strom durch die Leitungen fließen. Physikalische Beobachtungen und auch Experimente zeigen, dass diese Überlegungen im Grundsatz stimmen. Dann aber könnte es möglich sein, Massenträgheit und Gravitation eines Tages mittels einer hoch entwickelten Elektrotechnik zu manipulieren - etwa, um Raumschiffe anzutreiben. Das Ziel wäre, ihre träge Masse zu modifizieren. Wöge ein Raumkreuzer statt 100 Tonnen nur noch zwei Gramm, so rechnet Haisch vor, ließe er sich von der Erde aus leicht ins All bringen und relativ schnell auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigen. Noch sind derartige Ideen reine Utopie. Immerhin aber hat die US-Raumfahrtbehörde NASA die Theorie im Rahmen ihres »Breakthrough Propulsion Physics Program« aufgegriffen, mit dem sie nach neuen Konzepten für Raumschiffantriebe sucht. Hätten die NASA-Forscher dabei Erfolg, könnten sich kühne Raumfahrer in der Zukunft mittels künstlich erzeugter (Anti-)Gravitation aufmachen zu den Sternen.

Welche Kräfte bremsen die Pioneer-Sonden ab?

Zwei Raumsonden fliegen durch die Tiefen des Alls. Es handelt sich um die baugleichen Schwestersonden Pioneer 10 und 11 der NASA, die im März 1972 bzw. im April 1973 starteten. Als erste irdische Späher durchquerten sie den Asteroidengürtel und passierten den Riesenplaneten Jupiter. Dessen Schwerkraft nutzten die NASA-Experten, um die Sonden in einem Swing-by-Manöver weiter zu beschleunigen und auf ihren endgültigen Kurs zu bringen. Pioneer 11 passierte danach noch den Ringplaneten Saturn. Die Kommunikation mit Pioneer 11 riss im Herbst 1995 ab. Pioneer 10 hielt länger durch: Von ihm empfingen die Antennen des »Deep Space Network« der NASA im Januar 2003 das letzte Signal. Ein neuerlicher Kontaktversuch im März 2006, als die Erde in einer günstigen Position stand, schlug fehl. Offenbar war die Isotopenbatterie an Bord zu schwach geworden.

Mittlerweile hat das Sonden-Duo unser Sonnensystem in entgegengesetzten Richtungen verlassen. Pioneer 10 ist knapp 14 Milliarden Kilometer von der Erde entfernt, das entspricht der 93-fachen Distanz Erde - Sonne (unser Planet ist knapp 150 Millionen Kilometer von seinem Zentralgestirn entfernt). Der Späher hat eine Goldplatte an Bord, die in Symbolen - darunter die Gestalten einer nackten Frau und eines nackten Mannes - und kodierten Zahlen Auskunft über die Menschheit und das Sonnensystem gibt. In etwa zwei Millionen Jahren wird er den Stern Aldebaran im Sternbild Stier erreichen. Pioneer 11 fliegt auf das Sternbild Adler zu

und wird in etwa vier Millionen Jahren beim nächsten Stern ankommen.

Bis zum Ende der Übertragungen sandte das Sondenpaar gewaltige Datenströme zur Erde. Bei ihrer Analyse wurden die NASA-Forscher jedoch stutzig: Die Frequenz erwies sich als leicht verschoben, und zwar zu niedrigeren Werten hin. Dies bedeutet, dass Pionier 10 und 11 sich nicht an der Stelle im All befinden, an der sie nach theoretischen Berechnungen eigentlich sein sollten. Offenbar wurden sie von einer geheimnisvollen Kraft abgebremst. Zuerst entdeckte eine Arbeitsgruppe um den Physiker John Anderson in den frühen 1980er-Jahren diese Anomalie. Seither rätseln Forscher in aller Welt darüber, was die Ursache dafür sein könnte. Die britische Zeitschrift »New Scientist« zählt das Phänomen sogar zu den 13 wichtigsten Rätseln der Wissenschaft.

Etwas Ähnliches kennen die Astrophysiker aus der Kosmologie. Nach ihren Beobachtungen verschieben sich die Wellenlängen des Lichts weit entfernter Galaxien in den roten Bereich des Spektrums. Die Ursache dieser Rotverschiebung ist, dass sich die Sterneninseln durch die Expansion des Universums immer rascher von unserer Milchstraße entfernen. Dahinter steckt der nach dem österreichischen Physiker Christian Doppler genannte »Doppler-Effekt«. Er beschreibt die Veränderungen der Frequenz von Licht- oder Schallwellen, die sich ergeben, wenn sich Sender und Empfänger der Wellen einander annähern oder voneinander entfernen. Nähern sich Beobachter und Quelle einander, steigt die vom Beobachter wahrgenommene Frequenz, entfernen sie sich voneinander, verringert sie sich. Ein Alltagsbeispiel ist die Änderung der Tonhöhe des Martinshorns einer Ambulanz. Solange das Fahrzeug herankommt, ist der Ton höher. Hat es den Beobachter passiert und entfernt sich wieder, erscheint der Ton tiefer.

Zunächst glaubten Anderson und seine Kollegen an einen Messfehler. Doch die Frequenzverschiebung tauchte in den Pioneer-Daten immer wieder auf. Offenbar ist der Effekt real. Später zeigte er sich auch bei der Sonnenforschungssonde Ulysses. Die gemessene Abbremsung (physikalisch entspricht sie einer Beschleunigung zur Sonne hin) ist klein: Über einen Zeitraum von 15 Jahren führte sie zu einer Abweichung von rund einer Million Kilometern von der Sollposition.

Grundsätzlich, meinen die beteiligten Forscher, gibt es nur zwei Erklärungen für die Anomalie: Entweder bremsen triviale mechanische Vorgänge die Sonden, oder bislang unbekannte Gravitationskräfte zerren an ihnen. Auch John Anderson vermutete zuerst eine profane Ursache für die Entschleunigung, ein Hitzeleck in den Plutoniumbatterien etwa oder eine undichte Treibstoffleitung. Würde beispielsweise das Treibgas durch ein Leck bevorzugt in Flugrichtung ausströmen, könnte sein Rückstoß die Sonde verlangsamen.

Weiter zogen die NASA-Forscher elektromagnetische Kräfte in Betracht, die von einer elektrostatischen Aufladung der Sonde herrühren könnten. Daneben hielten sie eine ungleichmäßige Alterung ihrer Oberfläche für möglich, was ebenfalls in einer ungleichmäßigen Wärmeabstrahlung resultiert, oder einen Schubeffekt durch die Antenne. Vielleicht pflügten die Späher auch durch eine Wolke interstellarer Materie, deren Reibungswiderstand sie abbremste. Einschläge von Mikrometeoriten aus der Flugrichtung hätten den gleichen Effekt.

Doch es ist nur schwer vorstellbar, dass solche Phänomene in exakt gleicherweise aufbeide Sonden einwirken. Deshalb nahmen die NASA-Forscher andere Details der Mission unter die Lupe, vom Design der Sonden bis zu den Antennen des Bahnverfolgungssystems. Ihre Befunde veröffentlichten die Weltraum-Detektive im September 2002 in einer

umfangreichen Studie. Eine Erklärung für die Abbremsung hatten sie nicht gefunden. »Erweist sich der Effekt weiterhin als real«, schrieben sie ratlos, »könnte er mit kosmologischen Größen zusammenhängen.« So könne im Sonnensystem vorhandene Dunkle Materie durch ihre Gravitation die Sonden bremsen, oder tief im All ändere sich einfach die Schwerkraft.

Diese Schlussfolgerung rührt an eine fundamentale Frage: Haben wir überhaupt eine richtige Vorstellung vom Wesen der Gravitation? Manche Physiker zweifeln daran. Tatsächlich kennen wir die Effekte der Schwerkraft auf den meisten kosmischen Skalen - also bei den allergrößten wie den allerkleinsten Strukturen im All - nicht annähernd genau. Dies gilt für Galaxienhaufen ebenso wie auf der Ebene der Elementarteilchen. Das Problem ist, dass sich die schwache Gravitationskraft in diesen Extrembereichen kaum präzise messen lässt.

Deshalb meinen einige Wissenschaftler, es könne bereits in Raumbereichen wie unserem Sonnensystem Abweichungen von dem so ehern erscheinenden Gravitationsgesetz geben, das der britische Gelehrte Isaac Newton 1687 in seiner "Principia Mathematica" formulierte. Es beschreibt, warum Dinge zur Erde fallen und wie Planeten ihre Bahn ziehen. "Finden wir keine Erklärung für die Abbremsung, müssen wir in Betracht ziehen, dass uns die Natur etwas Neues mitteilen will", meint der Astrophysiker Michael Nieto vom Los Alamos National Laboratory in New Mexico.

An eine sich wandelnde Gravitation glaubt auch der israelische Physiker Mordehai Milgrom. Um die Pioneer-Anomalie zu erklären, entwickelte er eine »Modifizierte Newton'sche Dynamik«, kurz MOND. Sie besagt, dass die Anziehungskraft eines großen Körpers auf langsam fliegende Objekte, die sich weit vom Schwerkraftzentrum entfernt aufhalten, merkwür-

digerweise wieder stärker wird. Mathematisch ausgedrückt heißt das: Bei sehr kleiner Beschleunigung fällt die Gravitationskraft einer anziehenden Masse nicht länger umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands ab, wie es Newton beschreibt, sondern nur noch einfach umgekehrt proportional. Der gravitative Einfluss würde also schwächer werden, aber wesentlich langsamer, als er es sollte. Das klassische Gravitationsgesetz würde also im äußeren Sonnensystem nicht mehr gelten.

Kanadische Forscher schlugen indes noch eine weitere Erklärung vor: Es gebe eine fünfte Naturkraft, die sich der »normalen« Schwerkraft überlagert und deren Stärke verändert. Der Effekt werde jedoch erst jenseits der Plutobahn spürbar. Inzwischen aber rücken viele Wissenschaftler von solchen exotischen Theorien wieder ab. »Es ist nicht nötig, die dunklen Kräfte des Universums zu bemühen«, meinen die Physiker José de Diego, Dario Nunez und Jesus Zavala von der *Universidad Nacional Autonoma de Mexico* in einer gemeinsamen Studie. »Man sollte erst versuchen, das Phänomen mit ganz alltäglicher Physik zu erklären.«

Eine solche »natürliche« Erklärung liefert der Kuiper-Gürtel quasi frei Haus. So nennen die Astronomen eine Ansammlung zahlloser eisiger Himmelskörper, die aus der Frühzeit des Sonnensystems übrig blieben. Bislang galt als gesichert, dass das Reich dieser Eiskörper erst jenseits der Neptun-Bahn beginnt und sich von dort weit hinaus ins All erstreckt. Die Berechnungen der mexikanischen Arbeitsgruppe ergaben jedoch, dass der Kuiper-Gürtel bereits hinter der Bahn des Planeten Uranus beginnen und zehnmal massereicher sein könnte als bislang gedacht. Dann würde die Schwerkraft der Eiswelten das Sondenpaar abbremsen.

Außerdem wiesen norwegische Physiker nach, dass eine modifizierte Gravitation unweigerlich auch die Bahnen der äußeren Trabanten Neptun und Pluto beeinflussen müsste, was aber nicht beobachtet wird. Deshalb, fordern sie, möge man doch bitte die bewährten Gravitationsgesetze beibehalten und noch genauer nach möglichen »technischen« Ursachen suchen. Genau das nahm ein internationales Team von Astrophysikern und Programmierern, die sich zur »Pioneer Explorer Collaboration« zusammenschlossen, in Angriff. Die Gruppe analysierte sämtliche von den Sonden zur Erde übermittelten Daten neu.

Im Frühjahr 2008 legte sie erste Ergebnisse vor. Der Astrophysiker Slava Turyschew vom *Jet Propulsion Laboratory* der NASA im kalifornischen Pasadena hatte die während der verschiedenen Reiseetappen auf beiden Sonden gemessenen Temperaturen unter die Lupe genommen. Dabei wurde er fündig: Der Strom an Bord wird von thermoelektrischen Generatoren erzeugt. Sie nutzen dazu die beim Zerfall radioaktiven Plutoniums entstehende Wärme. Die Thermoelemente des Generators benötigen zur Stromerzeugung einen möglichst großen Temperaturunterschied. Deshalb wird eine Seite der Apparatur durch das radioaktive Präparat erhitzt, die andere strahlt über eine große, dunkle Fläche Wärmeenergie ins All ab und kühlt so ab.

Dieser Vorgang verläuft zwar gleichmäßig, doch es gibt einen Prozess, der die reguläre Abstrahlung überlagert und bewirkt, dass die Wärme nicht in alle Richtungen gleichmäßig abgegeben wird. Trifft die Wärmestrahlung nämlich die Oberfläche der Sonde, wird sie absorbiert, zurückgeworfen und gelangt erst dann endgültig ins All. Dieser Mechanismus hängt von der Form der Sonden-Bauteile ab. Insbesondere treffen die Infrarot-Photonen auf die Rückseite der großen Antenne von Pioneer 10 und 11. Das wirke wie eine auf der Sonde angebrachte Bremsrakete, die mit den Infrarot-Lichtteilchen der Wärmestrahlung gespeist wird, so Turyschew. Der Schub wir-

ke entgegen der Flugrichtung und bremse die Sonden geringfügig.

Zudem war eine Seite der Stromgeneratoren stets der Sonne ausgesetzt, die andere wies in Richtung des kalten Weltraums. Auch diese Temperaturverteilung, die über nunmehr 30 Jahre bestehen blieb, könnte zu Verformungen geführt haben, wodurch mehr Hitze in Flugrichtung abgegeben wird. Ein Problem aber bleibt: Die bisherigen Berechnungen der *Pioneer Explorer Collaboration* können nur etwa ein Drittel der gemessenen Abbremsung erklären. Es muss also noch weitere Ursachen für den Effekt geben. Forscher des Instituts für Astrophysik und Extraterrestrische Physik der Universität Bonn bringen diesbezüglich interstellaren Staub ins Spiel. Die Menge, die davon im äußeren Sonnensystem vorhanden ist, beläuft sich auf etwa ein Zehntel der Erdmasse. Bei dieser Dichte könnten Kollisionen mit Staubteilchen den Flug der Sonden verlangsamen.

Andere Experten spekulieren über eine Veränderung der Sondenoberfläche, etwa, weil während des langen Raumflugs Farbe abgeplatzt ist und sich so das Reflexionsvermögen veränderte. Bis diese möglichen mechanischen Ursachen nicht endgültig abgeklärt sind, bleiben die exotischen Theorien von der fünften Naturkraft oder der modifizierten Gravitation jedoch auf dem Tisch.

Woraus besteht ein Schwarzes Loch?

Chwarze Löcher entstehen in einem dramatischen Prozess, nämlich in einer Supernova. So nennen die Astronomen die titanische Explosion, mit der massereiche Sterne ihr Leben beenden. Wenn sie ihren Kernbrennstoff aufgezehrt haben, werden sie instabil. Bis dahin hielten sich die Gravitation - sie zieht die Materie nach innen, in Richtung auf das Zentrum des Sterns - und der nach außen gerichtete Strahlungsdruck die Waage. Wird die Strahlung schwächer, gewinnt die Schwerkraft die Oberhand. Innerhalb weniger Zehntelsekunden stürzt die Materie der Sternhülle nun auf den Kern und prallt von dort zurück, sodass die Gasmassen ins All davonstieben. Als Supernovae explodierende Sterne leuchten so hell, dass sie ganze Galaxien überstrahlen können. Erfolgt die Detonation in unserer Milchstraße, erscheint scheinbar ein neuer Stern am Himmel (daher der Name Supernova, von lateinisch *»novus«* = neu).

Was aus dem zurückbleibenden Kern wird, hängt von der ursprünglichen Masse der verglühenden Sonne ab. Nur Sterne, die mehr als die 1,4-fache Masse unserer Sonne aufweisen, können das Supernova-Stadium überhaupt erreichen. Sind sie kleiner, verglimmen sie als Weiße Zwerge. Liegt die Sternmasse zwischen 1,4 und ungefähr drei Sonnenmassen, kollabiert der Kern während der Explosion und wird zu einem Neutronenstern. Dabei steigt der Gravitationsdruck in seinem Innern so sehr an, dass die Elektronen aus den Hüllen der Atome in deren Kerne gedrückt werden. Aus den Elektronen

und den in den Atomkernen vorhandenen Protonen bilden sich bei diesem Prozess Neutronen, außerdem fliegen in ungeheurer Zahl Neutrinos davon. Auf diese Art entsteht die am dichtesten gepackte Materie des Universums. Ihre Dichte beträgt etwa 10¹² Kilogramm pro Kubikzentimeter. Ein Teelöffel Neutronenmaterie würde auf der Erde mehrere Milliarden Tonnen wiegen. Der Durchmesser von Neutronensternen liegt bei etwa 20 Kilometern.

Übersteigt die Masse des detonierenden Sterns jedoch drei Sonnenmassen, endet der Kernkollaps nicht beim Neutronenstern, sondern geht weiter. Jetzt entsteht ein Schwarzes Loch. Seine Schwerkraft krümmt den Raum so stark, dass von außen aus gesehen nichts in endlicher Zeit aus seinem Inneren entweichen kann, nicht einmal Licht. Aus diesem Grund ist das Objekt unsichtbar. Die Grenze des Bereiches, in dem die Gravitation jeden Informationsfluss zur Außenwelt unterbindet, heißt Ereignishorizont.

Die Idee, dass Sterne so massereich sein können, dass sie das Licht gefangen halten, ist nicht neu. Schon 1783 sinnierte der britische Naturforscher John Michell über »dunkle Sterne«, deren Gravitation ausreicht, um Licht gefangen zu halten. Er maß als Erster im Labor die Anziehungskraft zwischen zwei Massen. Die Existenz solcher Sterne vermutete auch der französische Astronom Pierre Simon Laplace. In seinem 1796 erschienenen Werk »Exposition du Systeme du Monde« (Darstellung des Weltsystems) schrieb er: »Ein Himmelskörper der gleichen Dichte wie die der Erde und dessen Durchmesser 250-fach größer ist als der der Sonne würde aufgrund seiner Attraktion keinen seiner Strahlen bis zu uns entkommen lassen; es ist deshalb möglich, dass die großen Leuchtkörper des Universums unsichtbar sind.« Diese Ideen bewegten sich jedoch vollständig innerhalb der Newton'schen Mechanik.

Ein genaueres Bild der unsichtbaren Himmelskörper ergab sich, als Albert Einstein 1915 seine Allgemeine Relativitätstheorie erstellt hatte. Bereits ein Jahr später berechnete der deutsche Physiker Karl Schwarzschild anhand ihrer Feldgleichungen die Größe und das mögliche Verhalten eines dunklen Sterns. Den Ausdruck »Schwarzes Loch« prägte dann 1967 der US-Physiker John Archibald Wheeler, weil diese Himmelskörper einem menschlichen Auge als vollkommen schwarz erscheinen.

Die Sonnen, aus denen Schwarze Löcher hervorgehen, besitzen Durchmesser von vielen Millionen Kilometern. Der Rote Riese Beteigeuze etwa, der rötlich glimmende östliche Schulterstern im Sternbild Orion, misst über 600 Millionen Kilometer. Von ihm erwarten die Astronomen, dass er demnächst (also in den nächsten zehn- bis hunderttausend Jahren) als Supernova detoniert. Die resultierenden Schwarzen Löcher sind aber nur einige Dutzend Kilometer groß. Im März 2008 entdeckten die Himmelsforscher das bis dahin kleinste davon im Sternbild Altar: mit 24 Kilometern ist es etwa doppelt so groß wie der Berliner S-Bahnring. Würde die Materie der Sonne in einem Schwarzen Loch komprimiert, hätte es 2,9 Kilometer Durchmesser, bei der Erde wären es etwa neun Millimeter. Daneben gibt es noch sogenannte supermassive Schwarze Löcher. Sie weisen viele Millionen Sonnenmassen auf und stehen in den Zentren der Galaxien.

So viel die Astrophysiker heute über Schwarze Löcher auch wissen - mit einem Problem kämpfen sie noch immer: Sie haben keine Ahnung, in welchem Zustand sich die Materie in deren Innern befindet. In dieser Hinsicht sind sie noch nicht schlauer als weiland Karl Schwarzschild. Er war zu dem Ergebnis gekommen, dass die gesamte Materie des Objekts in dessen Zentrum zusammenstürzt. An dieser Stelle wird die Krümmung der Raumzeit unendlich groß, ebenso die Werte

für Temperatur und Dichte. Dabei entsteht eine punktförmige Singularität. Ähnliche Zustände herrschten auch im Urknall.

Die unendlichen Größen kommen jedoch nur zustande, weil die Gleichungen der Relativitätstheorie an diesem Punkt versagen; physikalisch sind sie natürlich unsinnig. Punktförmige Objekte unterliegen den Gesetzen der Quantenmechanik. Somit dürfte es erst möglich werden, sinnvolle Aussagen über die Materie im Inneren eines Schwarzen Lochs zu treffen, wenn die Quantentheorie mit der Gravitationstheorie zur Quantengravitation vereinigt ist.

Einen etwas anderen Ansatz wählte der neuseeländische Mathematiker Roy Kerr. Ihm war eingefallen, dass Schwarze Löcher im All höchstwahrscheinlich rotieren. Schließlich besaßen bereits die Sterne, aus denen sie hervorgingen, eine Eigendrehung, außerdem dürften sie durch die Supernova-Explosion, in der sie entstanden, einen weiteren Kick erhalten haben. In einem rotierenden Schwarzen Loch herrscht aber eine andere Metrik. Ihr zufolge ist die Singularität, in der sich die Materie konzentriert, nicht punktförmig wie bei der Schwarzschild-Lösung, sondern sie bildet einen Ring. Es gibt noch einen entscheidenden Unterschied: Raumsonden (oder Astronauten), die sich diesem Ring nähern, werden nicht zerquetscht, sondern können ihn passieren. Dabei würden sie aber in einem Paralleluniversum landen. Denn der Ring entspricht einem Wurmloch, das einen Tunnel durch die Raumzeit öffnet. Damit dient er als Tor zu den Parallelwelten.

Für die Kerr-Theorie fanden sich mittlerweile einige Beweise. Denn sie sagt eine Reihe physikalischer Phänomene vorher, die in der Nähe Schwarzer Löcher auftreten. Einige davon wurden von den Astronomen bereits beobachtet, darunter die Materiestrahlen (Jets), die an den Polen der Schwerkraftmonster aufgrund magnetohydrodynamischer Effekte in entgegengesetzten Richtungen ins All geschleudert werden.

Wie es im Inneren der Schwarzen Löcher aussieht, bleibt aber weiterhin unklar. Den älteren Theorien zufolge sollte das Areal innerhalb des Ereignishorizonts keinerlei Struktur oder messbare Eigenschaften aufweisen. Nach Meinung mancher Forscher lässt die Kerr-Metrik jedoch die Existenz dünn verteilter Partikel darin zu, Materie bliebe also in ihrer ursprünglichen Form erhalten. Damit ähneln rotierende Schwarze Löcher unserem Universum mit seinem dünn verteilten intergalaktischen Gas. Es wurde deshalb schon ernsthaft diskutiert, ob unser Kosmos nicht selbst ein Schwarzes Loch sein könnte, in dessen Inneren wir leben. Vielleicht bildet sich in den Schwarzen Löchern auch eine besondere Form jener »entarteten Materie«, wie sie in den Neutronen Sternen vorliegt. In einem neueren Modell schlagen US-amerikanische Physiker vor, dass die Materie unter den extremen Bedingungen im Inneren Schwarzer Löcher in sogenannte Strings zerfällt, die das Objekt dann anfüllen. Die Existenz dieser subatomaren Fäden, aus denen letztlich alle Materie aufgebaut sein soll, ist bislang aber rein hypothetisch.

Über das Geschehen am Ereignishorizont wissen die Astrophysiker demgegenüber besser Bescheid. An dieser Grenze vertauschen Raum und Zeit ihre Bedeutung. Aus dem Inneren des Schwarzen Lochs kann keine Form von Energie entweichen, da selbst ein Photon von außen gesehen unendlich lange braucht, um den Ereignishorizont zu erreichen oder ihn zu überqueren. Würde ein Raumschiff, das außerhalb der Reichweite des Schwerkraftmonsters stationiert ist, eine Forschungssonde zu diesem entsenden, böte sich der Besatzung ein seltsamer Anblick.

Von ihrer Warte aus würde die Sonde bei der Annäherung immer langsamer, beim Erreichen des Ereignishorizonts

käme sie zum Stillstand und würde ewig dort verharren. Dies ist ein relativistischer Effekt. Deshalb sprachen einige Forscher bis zur Einführung des Begriffs »Schwarzes Loch« von »gefrorenen Sternen«, da am Rand des Lochs die Zeit für äußere Beobachter aufgrund der gravitativen Zeitdilatation stehen bleibt. Die Sonde, die sich in ihrer Eigenzeit befindet, würde dennoch das zu erwartende Ende erfahren: Sie taucht (sofern sie stabil genug gebaut ist) hinter den Ereignishorizont und wird spätestens beim Sturz durch das Innere des Lochs aufgrund der gewaltigen Gezeitenkräfte zu Spaghettiform gedehnt und schließlich zerrissen, bevor sie in der Singularität verschwindet.

Seit einiger Zeit wissen die Forscher auch, dass Schwarze Löcher in Wahrheit nicht völlig schwarz sind. Sie können aufgrund von Quanteneffekten eine schwache Strahlung abgeben. Diese kommt jedoch nicht aus ihrem Inneren, sondern entsteht am Ereignishorizont. Entdeckt hat dies Stephen Hawking. Die nach ihm benannte Strahlung transportiert Masse aus dem Loch, sodass es gleichsam langsam verdampft. Dieser Prozess dauert jedoch bei einem stellaren Schwarzen Loch viele Milliarden Jahre, bis es sich, auf Atomgröße geschrumpft, mit einem Strahlenblitz aus dem All verabschiedet.

Bei ihren Betrachtungen über Schwarze Löcher stießen Stephen Hawking und sein US-amerikanischer Kollege Kip Thorne auf ein interessantes philosophisches Problem: Sie fragten sich, ob sich Information vernichten lasse. Schließlich fangen Schwarze Löcher Teilchen aus ihrer Umgebung ein und verschlucken sie auf Nimmerwiedersehen. Damit gehen auch die Informationen über ihre Quantenzustände - etwa ihren Spin, also den Eigendrehimpuls - verloren, die sie in sich tragen. Viele Forscher betrachten Information aber als eine Grundgröße des Universums. Einige glauben sogar, das

ganze Universum sei nichts als ein gigantischer Quantencomputer, der unablässig mit den darin enthaltenen Informationen rechne.

Damit ähnelt Information Energie. Wie diese sollte sie sich nicht vernichten, sondern allenfalls in andere umwandeln lassen. Außerdem erfordern einige Regeln der Quantenmechanik ihre Erhaltung. Die Schwarzen Löcher indes schienen mit der Vernichtung von Quanteninformationen dieses Naturgesetz zu verletzen. Im Jahr 1997 schlossen Hawking und Thorne mit ihrem Fachkollegen John Preskill vom California Institute of Technology in Pasadena eine Wette über diese Frage ab. Hawking vertrat die Meinung, die Information sei unrettbar verloren. Später aber kam er mit einigen anderen Physikern zu dem Schluss, dass zumindest gewisse Informationen mit der Hawking-Strahlung wieder nach außen dringen können, oder dass die Schwerkraftfallen spätestens mit dem Strahlenblitz bei ihrem Ableben die gesammelte Information wieder abgeben. Im Jahr 2004 gestand Hawking seine Niederlage ein und bezahlte mit Thorne seine Wettschulden an Preskill in Form eines Baseball-Lexikons.

Eine andere Lösung bietet die erwähnte Theorie, dass Strings das Innere der Schwarzen Löcher anfüllen. In diesem Fall wären sie die Träger der hinter dem Ereignishorizont verschwundenen Information. Diese bliebe somit erhalten, ob sie sich je wiedergewinnen ließe, ist indes unklar.

Dass Information eine fundamentale Größe ist, glaubt auch der Wiener Physiker Anton Zeilinger, der durch seine Experimente zur Teleportation von Quantenzuständen bekannt wurde. In der Quantenwelt verschwimmt die Realität und wird durch den Zufall abgelöst. Damit lassen sich über Quantensysteme auch keine klaren Aussagen mehr treffen. Hier kommt die Information ins Spiel: Sie bestimmt laut Zeilinger, was über den Mikrokosmos der Quanten gesagt werden kann.

Weil die Information, die ein Quantensystem beinhaltet, endlich ist, könne man ableiten, wie Zufall und Unbestimmtheit in die Welt kommen. Deshalb sei sie in der Quantenwelt das fundamentale, primäre Prinzip. Sie nehme in gewisser Weise eine Zwischenposition zwischen geistiger und materieller Welt ein. Mehr noch: Wirklichkeit und Information könnten zwei Seiten einer Münze sein, deshalb müsse man die Trennung zwischen beiden Entitäten aufgeben, denn sie seien ineinander verwoben. Was dies bedeutet, bekennt Zeilinger, wisse aber niemand.

Um mehr Erkenntnisse dazu zu gewinnen, könnte es helfen, das Rätsel um das Wesen der Schwarzen Löcher zu lösen. Bis dies gelingt, bleiben sie die wohl mysteriösesten Objekte im Universum.

Zeit und Zeitreisen

Was ist Zeit?

ie Frage rührt an eines der großen Mysterien der Natur.

Über das Wesen der Zeit rätseln Gelehrte und Philosophen schon seit dem Altertum, bislang aber ohne greifbares Ergebnis. Den meisten dürfte es dabei ergangen sein wie dem Kirchenvater Aurelius Augustinus. »Was ist Zeit? Wenn mich niemand danach fragt, so weiß ich es. Will ich es aber einem Fragenden erklären, weiß ich es nicht«, schrieb er schon vor über 1500 Jahren. Ebenso hilflos zeigte sich im frühen 20. Jahrhundert Albert Einstein. Lapidar erklärte er: »Zeit ist das, was man an der Uhr abliest.«

Dass Aurelius wie Einstein eine klare Antwort auf die Frage schuldig blieben, mag einen einfachen Grund haben: Zeit gibt es vermutlich gar nicht - jedenfalls nicht so, wie wir sie uns vorstellen und ihren Ablauf empfinden. Nur langsam gewinnt diese Erkenntnis in der Wissenschaft an Boden. Als Erster versuchte sich im 17. Jahrhundert der große englische Physiker Isaac Newton an einer physikalischen Definition der Zeit. Ihm galt sie als »absolute, wahre und mathematische Zeit, die an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand verfließt«. Wie ein unsichtbarer Fluss, so glaubte er, durchströme sie das Universum. Dazu aber muss der Raum unabhängig von der Zeit sein. Er bietet gleichsam die Bühne, auf der das zeitliche kosmische Geschehen abläuft.

Mit Albert Einstein änderte sich diese Sichtweise. Raum und Zeit waren keine voneinander unabhängigen, fundamentalen Größen mehr, sondern entstanden gemeinsam im Urknall. Von Beginn an waren sie zur vierdimensionalen Raumzeit verschweißt. Diese Zusammenhänge behandelt Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie. In seinem anderen großen Formelwerk, der Speziellen Relativitätstheorie, beschreibt er demgegenüber, wie sich der Verlauf der Zeit in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit eines Objekts ändert. In einem schnellen Raumschiff vergeht sie langsamer, sodass einer von zwei Zwillingen, der als Astronaut zu einem fernen Stern flog, taufrisch zur Erde zurückkehrt, während sein Bruder schon längst gestorben ist. Doch das Wesen der Zeit konnten beide Konzepte nicht erklären.

Dabei ist es bis heute geblieben. Niemand weiß, was Zeit physikalisch gesehen bedeutet. Ein elektrischer Strom beruht auf in einem Metall fließenden Elektronen, und wir sehen Dinge, weil Lichtteilchen auf unsere Augen treffen. Die damit verbundenen Größen wie Stromstärke und Photonenflussdichte lassen sich direkt messen. Doch mit unseren Uhren messen wir keine Zeit, sondern getaktete Bewegungen, sei es das gemächliche Auf und Ab eines Uhrpendels oder die rasenden Schwingungen von Cäsiumatomen in hochgenauen Atomuhren. Darauf zielte auch Einstein mit seiner Antwort auf die an ihn gestellte Frage über die Zeit ab.

Vielleicht liegt darin ja das Geheimnis: Zeit gibt es nicht, sondern sie entsteht aus Bewegung. Tatsächlich nähern sich einige Physiker dem Phänomen mit derartigen Überlegungen an. Das folgende Beispiel illustriert diesen Gedanken: Wird ein leerer Raum mit Gas gefüllt, fliegen die Moleküle darin frei umher. Dabei ändert sich die Konfiguration der Teilchen also ihre wechselseitigen Positionen - beständig. Physiker sprechen deshalb vom Konfigurationsraum.

Das System entwickelt sich mit der Zeit, dabei folgt jedes Teilchen einer Kurve durch den Raum. Sie beschreibt gleichsam seine »Geschichte«. Die Kurve folgt physikalischen Gesetzen, die sich mit bestimmten Formeln darstellen lassen. Doch bei der Lösung dieser Gleichungen fällt die Zeit heraus. Übrig bleibt eine Beschreibung des Systems, die nicht einzelne Momente in der Zeit darstellt, sondern die Bewegung durch den gesamten Zeitverlauf. Die Gegenwart, die nach unserer Erfahrung Vergangenheit von Zukunft trennt, geht dabei verloren. Dieses Problem tauchte bereits in der Allgemeinen Relativitätstheorie auf. Lösungen ihrer Gleichungen ergeben Teilchengeschichten in einer vierdimensionalen Raumzeit, aber keinen Anhaltspunkt für ein »Jetzt«. Die Realität in einem Konfigurationsraum könnte folglich »zeitlos« sein. Der größtmögliche derartige Raum ist naturgemäß das Universum. Die von uns empfundene Gegenwart wäre dann eine Illusion.

Diese Erkenntnis könnte auch ein Dilemma lösen, über das Philosophen schon lange streiten: »Geschehen Dinge, weil Zeit vergeht, oder vergeht Zeit, weil Dinge geschehen?« Die meisten Gelehrten sahen Ersteres als gegeben an. Mittlerweile aber sind viele vom Gegenteil überzeugt. Einer davon ist der Physiker Julian Barbour. »Nicht Zeit ist das Maß von Ereignissen, sondern Ereignisse sind das Maß der Zeit«, sagt er. Diese Überlegung führte ihn zu seiner Theorie der »Nows« (englisch »now« = jetzt). So bezeichnet er eine unendliche Abfolge von »Augenblicken der Zeit«.

Die Atome im All, so Barbours Idee, bewegen sich nicht in einem von Raum und Zeit aufgespannten Rahmen. Stattdessen verschmelzen Materie und Raum zu einer Abfolge einzigartiger Konfigurationen, die das gesamte Universum umfassen. Sie gelten dem Briten, der zur seltenen Spezies der Privatgelehrten zählt, als die fundamentalen Elemente des

Kosmos. Es gibt unendlich viele von ihnen, jede ein eingefrorener Moment der Zeit - also ein »Jetzt«, perfekt statisch und zeitlos.

Wie aber können derart starre und zeitlose Zustände ein dynamisches und evolvierendes Gebilde wie das Weltall hervorbringen? Legt man alle »Nows« eines sich entwickelnden Universums nebeneinander, erklärt Barbour, bilden sie eine Art Pfad, der den Kosmos durchzieht wie Steinplatten einen Garten. Jeder Punkt dieses Pfads entspricht einer anderen Anordnung von Materie. Ein Wesen, das diesen Pfad abschreitet, erlebt ein Universum, das kontinuierlich von einem Zustand in den nächsten wechselt. Weil jeder dieser Zustände mit vielen anderen korrespondiert, entsteht der Eindruck, jeder Punkt des Wanderweges habe eine klar definierte Vergangenheit und Zukunft. Dies erzeugt die Illusion von Zeit.

Barbour verdeutlicht diese Idee an einem Beispiel: In jedem Moment sehen wir Objekte in bestimmten Positionen. Wenn viele Menschen sie gleichzeitig aus ihrem jeweiligen Blickwinkel fotografieren und ihre zweidimensionalen Schnappschüsse vereinen, ergibt dies ein 3D-Bild der Welt. So wird Zeit konkret - ein »Jetzt« entsteht. Viele in eine Reihe gelegte 3D-Bilder würden wir als lineare Sequenz wahrnehmen. Daraus entstehe die Empfindung einer stetig dahinströmenden Zeit.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt die Schleifen-Quantengravitation. Der Raum, so besagt sie, setzt sich aus winzigen Quanten zusammen. Er ist somit nicht mehr glatt und kontinuierlich, sondern gekörnt wie ein fotografischer Film. Die von ihr beschriebenen Raumquanten sind unvorstellbar winzig, ihr Durchmesser beträgt gerade 10 ³³ (ein billionstel trilliardstel) Zentimeter, also eine Planck-Länge.

Diese Teilchen sitzen nicht im Raum, sondern sie erzeugen ihn, indem sie sich zu Netzwerken zusammenschließen - die

Welt gleicht gewissermaßen einem endlosen Kettenhemd. Materieteilchen sind Knoten im so entstandenen Raumzeit-Gewebe. Sie können darin frei umherwandern. Ihre Bewegung aber verläuft nicht glatt, sondern in Sprüngen von der Dauer einer Planck-Zeit. Sie beträgt 10⁴³ oder zehn trilliardstel trilliardstel Sekunden. In diesem Rhythmus lagern sich auch die Raumquanten in den Netzwerken fortwährend um. Diese Umlagerung, meint der Kosmologe Lee Smolin, der am Perimeter-Institut in der kanadischen Universitätsstadt Waterloo forscht, bringe die Zeit hervor. Sie bewirkt eine ständige Veränderung der Materie und lässt unter anderem die Körper der irdischen Lebewesen altern. Genau diese Veränderungen im Gefüge des Universums empfinden wir als Zeit. »Sie wird durch die Abfolge von Zügen definiert, die das Netzwerk umordnen«, erläutert Smolin. Die kosmische Uhr tickt sozusagen im Planck-Sekundentakt. Dies ist eine bemerkenswerte Konsequenz der Theorie: Neben dem Raum ist auch die Zeit gequantelt.

Die Schleifen-Quantengravitation könnte noch ein anderes Rätsel lösen - nämlich das der Richtung der Zeit. Sie verläuft nach unserer Erfahrung von der Vergangenheit in die Zukunft. Dabei ergibt sich aus den meisten physikalischen Gleichungen keine Richtung, sie könnte ebenso gut rückwärts verlaufen. Die mögliche Erklärung: Weil sich das Universum ausdehnt, müssen fortwährend neue Raumquanten entstehen. Sie drängen sich zwischen die schon bestehenden Quanten, die daher nicht mehr in frühere Konfigurationen zurückfallen können. Dies erlaubt dem Zeitpfeil nur eine Richtung, nämlich vorwärts.

Aufgrund ihrer Erklärungsmacht meinen viele Forscher, die Schleifen-Quantengravitation habe das Zeug zu einer »Weltformel«. Ein solches umfassendes Gleichungssystem, das alle Phänomene des Universums beschreibt, muss Relativitäts-

und Quantentheorie zur Quantengravitation vereinen. Ein Problem dabei ist, dass beide mit verschiedenen Begriffen von Zeit operieren. Die Relativitätstheorie betrachtet Raum und Zeit als Einheit, doch die Quantenmechanik teilt die Welt in die zu beobachtenden Quantensysteme und die klassische Welt außerhalb derselben ein. In den Quantensystemen aber ist die Zeit irrelevant. Deshalb, meinen viele Physiker, könne sie keine fundamentale Größe sein. Dann muss sie aber auch bei der Quantengravitation außen vor bleiben.

Gegenüber konkurrierenden Modellen, etwa der Stringtheorie, hat die Schleifen-Quantengravitation einen großen Vorzug. Sie kann überprüft werden. Denn sie sagt vorher, dass die Raumquanten Gammastrahlen beeinflussen, die aus den Tiefen des Alls zur Erde gelangen. Die nächste Satellitengeneration sollte in der Lage sein, die feinen Abweichungen im Gamma-Spektrum zu messen. So könnten wir vielleicht im nächsten Jahrzehnt endgültig wissen, was die Welt im Innersten zusammenhält.

In gleicher Weise argumentiert der Kosmologe Carlo Rovelli von der Universität Marseille. »Jede Theorie zur Quantengravitation, die das ganze Universum beschreibt, kann die Zeit nicht enthalten«, sagt er. »Das bedeutet, dass es sie auf der fundamentalen Ebene des Kosmos nicht gibt.« Was wir als Zeit wahrnehmen, sei nichts als eine große Illusion. Wie diese entsteht, erklärt Rovelli in einem eigenen Modell, das etwa in der Mitte zwischen den »Nows« von Julian Barbour und dem Schleifen-Netzwerk Lee Smolins liegt. Würde das Universum anhand der präzisen Konfiguration aller darin vorhandenen Teilchen und Kraftfelder beschrieben, also mit ihrer präzisen Bahn, Geschwindigkeit und Energie, kämen die entsprechenden Zustandsgieichungen ohne Zeit aus. Doch weil wir diese Werte nicht kennen, können wir allenfalls Mittelwerte für größere Ensembles von Teilchen und Feldern bilden. Wird

deren Entwicklung beschrieben, erscheint unvermeidlich die Zeit. Rovelli: »Aufgrund unserer Unkenntnis der Mikrostruktur der Welt sieht es aus, als ob die makroskopischen Größen zeitlich variabel wären.«

Der französische Forscher vergleicht dies mit einem Gas in einem abgeschlossenen Raum. Prinzipiell könnten wir jedes Molekül darin samt seiner Bahn- und Energieänderungen verfolgen. Bei dieser Art der Betrachtung hätte keines der Teilchen eine Temperatur. Doch in der Praxis ist es nicht möglich, die Information über das sich stetig wandelnde Arrangement der Moleküle zu erhalten. Es lässt sich aber ein Mittelwert bilden, der in eine makroskopische Beschreibung des Systems mündet: Aus der durchschnittlichen Teilchenenergie ergibt sich als einziges Maß die Temperatur des Gases. Aus der Mittelung über alle Partikel im All resultiert in gleicher Weise die Zeit.

Behalten diese Forscher recht, müssen wir uns von einem vertrauten Begriff verabschieden: Zeit gibt es dann im physikalischen Sinn nicht. Ihr von uns subjektiv empfundener Ablauf und ihre Messung aber bleiben demgegenüber unverändert. Dann hätte Albert Einstein, wenngleich unwissentlich, recht behalten: Zeit ist tatsächlich nur, was die Uhr anzeigt - nämlich Bewegung.

Können Menschen durch die Zeit reisen?

Dass Zeitreisen möglich sind, will eine Gruppe von deutschen und australischen Ingenieuren demnächst beweisen. Am 12. Dezember 2012, so prophezeien die Herren, werde an einem bestimmten Ort in der australischen Stadt Brisbane eine Zeitmaschine mit »Temponauten« aus der Zukunft eintreffen. Damit fände ein »Jahrtausendexperiment«, das sie eingefädelt haben, ein sensationelles Ende.

Die dahinterstehende Idee ist ebenso einfach wie bestechend: Die Gruppe sammelte 90 000 Euro als Startkapital für den Erwerb einer Zeitmaschine. Das Geld wird von Generation zu Generation an zuverlässige Partner weitergegeben, die es anlegen und so vermehren. Zugleich erhält jeder neue Partner beim Generationswechsel die genaue Instruktion über Landeort und Landezeit auf der Erde, die er dann seinerseits an seine in der nächsten Generation neu gewonnenen Nachfolger weiterreicht.

Sollte es irgendwann in der Zukunft - zum Beispiel im Jahr 2500 - gelingen, ein solches Gerät tatsächlich zu bauen, wird es der zu dieser Zeit lebende Projektpartner mit dem angehäuften Geld erwerben und zurückreisen ins Jahr 2012, wo er am verabredeten Ort auf die Ideen- und Geldgeber trifft. Damit wäre der Beweis erbracht, dass eine Reise durch die Zeit möglich ist.

Es ist ein amüsanter neuer Ansatz zu einem alten Thema, das viele Menschen schon lange beschäftigt. Physiker sind ebenso darunter wie Science-Fiction-Fans. Cineasten wird die Verfilmung von H. G. Wells' Roman »Die Zeitmaschine« unvergessen sein. Darin setzt sich der Held in ein schlittenartiges Gefährt mit blinkenden Lichtern, das ihn in eine ferne Zukunft katapultiert.

Betrachtet man Zeitreisen jedoch physikalisch, ist die Geschichte nicht so einfach. Denn bis heute weiß niemand, wie sie funktionieren könnten. Immerhin ersannen Wissenschaftler einige theoretische Möglichkeiten. Unter ihnen ist Stephen Hawking. Zunächst schloss er Zeitreisen kategorisch aus. Sonst, argumentierte er, hätten wir schon längst Besuch aus der Zukunft erhalten. Später aber revidierte er seine Meinung. Die Wahrscheinlichkeit, dass makroskopische Objekte durch die Zeit reisen können, sei gegeben, sagte er nun, aber »sie ist meinen Berechnungen zufolge extrem gering«.

Einen Weg in die Vergangenheit könnten Wurmlöcher eröffnen. Durchfliegt ein Raumschiff einen solchen Tunnel durch die Raumzeit, kommt es an einem völlig anderen Ort im All zum Vorschein - und vielleicht in einer anderen Zeit. Doch zur Erzeugung eines Wurmlochs ist negative Energie erforderlich. Diese ist zwar als rechnerische Größe bekannt, doch ob es sie in der Natur gibt, ist völlig unklar. Aber selbst wenn, weiß niemand, wie sie zu beherrschen wäre. Manche Typen von Zeitmaschinen, die sich negativer Energie bedienen, würden nach Hawkings Berechnungen beim Versuch, sie zu betreten, explodieren. »Offenbar wirken die physikalischen Gesetze so zusammen, dass Reisen in die Vergangenheit verhindert werden«, glaubt der prominente Roll Stuhlfahrer. »Die Natur schuf damit eine Art Chronologie schütz.«

Ein weiterer hochrangiger Physiker, der sich mit dem Thema beschäftigt, ist der Kalifornier Kip Thorne. Schon 1988 präsentierte er Überlegungen, wie ein Wurmloch beschaffen sein müsste, das Reisen in die Vergangenheit gestattet: Das eine Ende dieses Wurmlochs sollte mit annähernd Lichtgeschwindigkeit umherschnellen, während das andere an einem Punkt im Raum fixiert ist. Das im All herumrasende Ende altert wegen seiner relativistischen Geschwindigkeit langsamer, sodass ein Zeitreisender, der das Wurmloch von dessen ruhendem Eingang aus durchquert, in die Vergangenheit reist.

Diese Gedanken zeigen, dass Zeitreisen - wenn überhaupt - höchstens unter völlig exotischen Rahmenbedingungen denkbar sind. So verhält es sich auch mit dem Modell, das der österreichische Mathematiker Kurt Gödel entwickelte. Er war mit Albert Einstein befreundet und forschte wie dieser nach seiner Emigration während der Nazi-Herrschaft in den USA an der Princeton-Universität. Zum besseren Verständnis dient aber zunächst ein Blick auf die unterschiedlichen Vorstellungen von Zeit, die in der Wissenschaftsgeschichte galten.

Im 18. Jahrhundert glaubte der britische Physiker Isaac Newton, die Zeit gleiche einem Pfeil, der - einmal abgeschossen - auf einer geraden und unveränderbaren Linie fliegt. Die Zeit galt ihm als unveränderliche, grundlegende Eigenschaft, die dem Universum innewohnt. Uhren müssten an jedem Ort darin mit demselben Tempo ticken.

Einstein machte im frühen 20. Jahrhundert mit seiner Relativitätstheorie dieses Weltbild zunichte. Ihr zufolge ändert sich der Fluss der Zeit mit der Geschwindigkeit, mit der ein Objekt durch das All fliegt. Je mehr es sich der Lichtgeschwindigkeit annähert, desto langsamer vergeht seine Eigenzeit. Daraus resultiert auch das bekannte Zwillingsparadox: Ein Zwilling, der sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit durch das All bewegt, altert weniger als sein auf der Erde zurückgebliebener Bruder. Fliegt der Raumfahrer beispielsweise mit 75 Prozent der Lichtgeschwindigkeit zu einem nahen Fixstern und landet nach 60 Jahren wieder auf der Erde, ist er durch die Zeitdehnung um 40 Jahre gealtert - 20 Jahre weniger als sein Bruder.

Das entspricht einer Zeitreise in die Zukunft, doch diese Möglichkeit sei als »unechte Zeitreise« bei den weiteren Betrachtungen ausgeklammert.

Als Kurt Gödel sich mit der Relativitätstheorie befasste, entdeckte er eine neue Lösung für ihre Gleichungen, die unversehens eine Möglichkeit von Zeitreisen eröffnete. Er konnte zeigen, dass große, rotierende Massen die Raumzeit gewissermaßen mitreißen können, sodass darin geschlossene »zeitartige
Schleifen« entstehen. Es ist, als ob sich im »Fluss der Zeit«
Strudel bilden, in denen sich die Zeit zu einem Kreis schließt.
Gödel sprach von »geschlossenen zeitartigen Weltlinien«.
Würde ein Raumschiffeine Rundfahrt in einer genügend großen Kurve entlang einer solchen Weltlinie machen, dann
könnte es laut Gödel in eine beliebige Zeit der Vergangenheit
zurückreisen.

Eine solche »große Kurve« kann nur das Universum selbst liefern. Dazu aber müsste es sich um sich selbst drehen, und zwar mit einer Rotationsfrequenz von 70 Millionen Jahren. Daraus errechnete der begnadete Logiker Gödel weiter, dass die Länge der zeitartig geschlossenen Bahn rund 100 Milliarden Lichtjahre betragen müsse. Das ist mehr als der Durchmesser des beobachtbaren Universums. Weiter müsse das Raumschiff mit mindestens 70 Prozent der Lichtgeschwindigkeit fliegen. Bewegt es sich in Richtung der Rotation, erreicht es irgendwann wieder den Startpunkt, jedoch in der Zeit zurückversetzt. Daraus folgt, dass der Kosmos eine zyklische Zeit besitzt, in der sich der Weltenlauf endlos wiederholt.

Einstein war dieser Gedanke ein Graus. Es beunruhige ihn, schrieb er einmal, dass seine Gleichungen Lösungen für Zeitreisen beinhalten. Später jedoch erkannte er, dass dies nur dann zutrifft, wenn das All statisch ist, also seine Größe nicht verändert. Der US-Astronom Edwin Hubble hatte 1929 jedoch herausgefunden, dass der Kosmos aufgrund der

Urknall-Explosion expandiert. Ein sich ausdehnender Raum aber kann nicht rotieren - Gödels Lösungen hatten somit keinen Bestand mehr.

Gleichwohl konstruierten andere Forscher hypothetische Zeitmaschinen, die auf ähnlichen Prinzipien beruhten. So fand der neuseeländische Mathematiker Roy Kerr 1963 eine Lösung für Einsteins Gleichungen, die auf die Existenz rotierender Schwarzer Löcher mit ungewöhnlichen Eigenschaften hinwiesen. Normalerweise, so die Lehrmeinung, schnurrt ein am Ende seines Lebens kollabierender Riesenstern zu einem unendlich kleinen Punkt zusammen. Ein Kerr'sches Schwarzes Loch verhält sich dagegen anders: Im Moment seiner Entstehung würde es nicht in sich zusammenstürzen, sondern einen Ring aus Neutronen bilden. Die Schwerkraft darin wäre ebenso stark wie in einem normalen Schwarzen Loch. Unter ihrer Einwirkung sollte der Neutronenring jedoch kollabieren. Um dies zu verhindern, müsste er rasend schnell rotieren, die Zentrifugalkraft wirkt dann dem Kollaps entgegen. Auf diese Weise aber entstünde ein Sternentor: Ein Astronaut, der durch diesen Ring fliegt, würde in ein fremdes Universum gelangen. Solche Systeme sind heute als Kerr-Tunnel bekannt.

Der Physiker Paul Harpern von der State University of New York prüfte, ob sich Kerr-Tunnel wirklich durchqueren lassen. Dazu erfand er die Figur des Unfall-Dummys Floyd G. Nevish, dessen Abenteuer Harpern in seinem Buch »Löcher im Kosmos« beschreibt. Bei der ersten Testfahrt will Nevish mit seinem Raumschiff in ein rund 700 Sonnenmassen schweres Schwarzes Loch eintauchen. Doch die darin herrschende Gravitationskraft zermalmt den tollkühnen Testpiloten. Mit einem rotierenden Schwarzen Loch von zehn Millionen Sonnenmassen hat Floyd zunächst scheinbar mehr Glück: Unbeschadet kann er in die Ringsingularität fliegen, doch dann

stirbt er. Denn Kerr-Tunnel - auch das zeigen die Formeln - sind instabil und werden schon durch kleinste Störungen wie das Eindringen eines Raumschiffs vernichtet, also sind sie keine realistischen Zeitmaschinen.

Den nächsten Bauplan entwarf 1974 der US-Physikprofessor Frank Tipler. Kernstück seiner Zeitmaschine ist ein extrem dünner Zylinder aus Materie, der so viel Masse wie unsere ganze Milchstraße enthält. Der Zylinder wird in hyperschnelle, relativistische Rotation versetzt, und schon ist Tiplers Zeitmaschine fertig: Sie soll Reisen in die Zukunft und in die Vergangenheit erlauben. Je nachdem, ob sich ein »Temponaut« am Zylinder entlang mit oder gegen die Rotationsrichtung bewegt, gelangt er in der Zeit vor oder zurück. Tipler fand Lösungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, die eine zeitartige Schleife um den Zylinder beschreiben, durch die sich Teilchen in der Zeit bewegen können. Allerdings müsste der Zylinder fast unendlich lang sein, was eine praktische Umsetzung wohl ausschließt.

Alternativ lassen sich auch etwa 200 Neutronensterne in einer Reihe anordnen. Sie bilden einen Zylinder von rund 20 Kilometern Durchmesser und mindestens 4000 Kilometern Länge. Nun müssen sie derart beschleunigt werden, dass sie sich synchron mit wenigstens der halben Lichtgeschwindigkeit bewegen, sonst könnte der Neutronenstern-Zylinder kollabieren. Laut Tipler muss sich ein Raumschiff auf einer ausgeklügelten spiralförmigen Bahn der Mitte des Zylinders nähern. Je nach Ort und Geschwindigkeit der Annäherung wird es in der Zeit vorwärts- oder zurückgeschleudert. Es könnte sogar in einer entfernten Galaxie landen.

In ähnlicher Weise könnten sogenannte kosmische Strings Gegenstände in der Zeit hin- und herschleudern. Solche Strings - nicht zu verwechseln mit den Elementarteilchen der Stringtheorie - sind »Defekte« in der Raumzeit, die kurz nach dem Urknall entstanden, als sich in einer Folge von Phasenübergängen die Urkraft des Kosmos in die vier heute bekannten Naturkräfte aufspaltete. Sie gleichen Rissen in Eis, die entstehen, wenn Wasser gefriert. Ein String ist ein extrem dünner Faden, der wellenförmig durch das Universum peitscht. Er kann viele Lichtjahre lang sein (oder sogar kosmologische Dimensionen erreichen), mit einem Durchmesser, der kleiner ist als ein Wasserstoffatom. Ein Abschnitt von sechs Kilometern Länge hätte so viel Masse wie die gesamte Erde.

Zwei Strings, die annähernd mit Lichtgeschwindigkeit umeinander rotieren, würden das Raumzeit-Gefüge derart verzerren, dass ein Raumschiff beim Flug um das Bündel im richtigen Abstand in die Vergangenheit katapultiert würde. In diesem Fall aber müssten die Strings unendlich lang sein, sonst würden sie zu Schwarzen Löchern kollabieren. Wiederum weiß aber niemand, ob es kosmische Strings überhaupt gibt.

Darüber hinaus werden unter Physikern und in der Science-Fiction-Literatur weitere Ideen von Zeitreisen diskutiert. Eine Möglichkeit könnten die sogenannten Tachyonen bieten. Das sind hypothetische Teilchen, die stets mit Uberlichtgeschwindigkeit umher schwirren. Damit aber fliegen sie in der Zeit rückwärts. Gelänge es, sie technisch nutzbar zu machen, ließe sich mit ihrer Hilfe theoretisch eine Zeitmaschine bauen. Auch »superluminares Tunneln« könnte für Photonen eine Zeitumkehr erreichen. Den Effekt demonstrierte vor einigen Jahren der Kölner Physikprofessor Günter Nimtz. Er schickte Mikrowellen durch einen Hohlleiter. Sie schienen ohne Zeithindurchzufliegen, bei manchen Experimenten kamen sie scheinbar sogar heraus, bevor sie eingestrahlt wurden. Diese Versuche und ihre Interpretation sind jedoch sehr umstritten.

Ein Problem aber besteht mit Reisen in die Vergangenheit grundsätzlich: Sie können die Kausalität verletzen. Um das zu verdeutlichen, ersannen die Physiker einige Paradoxa. Vielleicht am bekanntesten ist das Großvaterparadox: Ein Zeitreisender fliegt in die Vergangenheit und ermordet seinen eigenen Großvater. Wird er dann überhaupt geboren? Oder der Mann ohne Vergangenheit: Ein junger Erfinder versucht vergeblich, eine Zeitmaschine zu bauen. Plötzlich taucht aus dem Nichts ein älterer Mann auf und überreicht dem Jüngeren die Baupläne. Daraufhin baut dieser die Maschine. Als alter Mann reist er dann in die Vergangenheit, um seinem jungen Selbst zu erklären, wie sich die Barrieren der Zeit überwinden lassen. Wo kommt dann die Idee für den Bau der Zeitmaschine her?

Eine Antwort könnte die sogenannte Everetfsche Vielwelten-Theorie geben. Danach spielt sich die Vergangenheit, in die der Mann reist, in einem Paralleluniversum ab. Diese Idee hat aber ihre eigenen Tücken: So wäre es dem Reisenden unmöglich, in seine ursprüngliche Gegenwart zurückzukehren. Wird es also je Zeitreisen geben? Wie es aussieht, hat die Natur die Hürden dafür viel zu hoch gelegt. Doch am 12. Dezember 2012 werden wir es vielleicht genauer wissen.

Überlichtgeschwindigkeit

Sind Reisen mit Überlichtgeschwindigkeit möglich?

In jeder »Star Trek«-Folge zeigen die Weltraum-Helden um Captain Kirk, wie Überlichtgeschwindigkeit funktioniert. Erst beschleunigt ihr Raumschiff »Enterprise« auf Impulsgeschwindigkeit, die etwa ein Viertel der Lichtgeschwindigkeit beträgt. Dann zündet Scotty im Maschinenraum die Warp-Reaktoren. Sie bestehen aus Spulen in den Triebwerksgondeln, die nacheinander unter Strom gesetzt werden und dabei Energiefelder erzeugen. Diese werden abgestrahlt, wodurch sich das Schiff beschleunigt.

Die Energie der Kraftfelder bewirkt schließlich eine Transition in den Subraum. Er verbirgt sich sozusagen unter dem realen Kosmos, denn - so die Idee der "Star Trek«-Autoren - jeder Punkt der normalen Raumzeit ist mit Subraum "unterlegt«. Eigentlich stellt er somit eine zusätzliche Dimension dar. Im Subraum verringert sich die Masse des Raumschiffs. Erst dadurch können es die Warp-Felder auf Überlichtgeschwindigkeit treiben. Zugleich krümmen sie die Raumzeit, sodass sich die Abstände zwischen zwei Punkten im All verkürzen. Das Tempo bemisst sich nach "Warp-Faktoren«, wobei Faktor 10 als unendliche Geschwindigkeit definiert ist. Das Raumschiff befindet sich im Warp-10-Flug an jedem Punkt des Universums gleichzeitig. So schildert die "Star Trek«-Literatur die Antriebstechnik künftiger Raumflotten.

In der »Star Trek«-Serie wird die Uberlichtgeschwindigkeit aus dramaturgischen Gründen benötigt. Nur so können die Protagonisten eine Vielzahl ferner Welten in vernünftigen Zeiträumen besuchen. In unterlichtschnellen Raumschiffen müssten die Besatzungen die riesigen Abgründe des Alls im Tiefschlafüberwinden, oder sie fliegen in riesigen Generationenschiffen, in denen sie sich fortpflanzen. Somit kommen erst die Enkel oder Urenkel ans Ziel.

Zum Glück für die Science-Fiction-Autoren gibt es ein paar physikalische Phänomene, die helfen können, jene Grenze zu überwinden, die uns die Relativitätstheorie setzt. Ihr zufolge kann sich kein Körper - oder allgemeiner gesagt, kein Medium, das Information überträgt - schneller durch das All bewegen als das Licht, das 299 792 Kilometer pro Sekunde schnell fliegt. Seit einiger Zeit diskutieren auch seriöse Wissenschaftler, wie sich Uberlichtgeschwindigkeit technisch erreichen ließe. Der Warp-Antrieb (englisch »warp« = Verwerfung) der »Enterprise« etwa bezieht sich auf die Krümmung des Raums, die laut Relativitätstheorie von großen Massen oder starken Kraftfeldern hervorgerufen wird. Eine weitere Möglichkeit sind die Wurmlöcher. Sie ergeben sich aus bestimmten Lösungen der Relativitäts-Gleichungen. Erstmals wurden sie 1935 von Albert Einstein und seinem Kollegen Nathan Rosen beschrieben und hießen deshalb ursprünglich Einstein-Rosen-Brücken.

Der Begriff »Wurmloch« entstammt der Analogie mit einem Wurm, der sich durch einen Apfel frisst, anstatt an der Oberfläche entlangzukriechen. Er nimmt eine Abkürzung quer durch die Frucht. In gleicher Weise könnte ein Raumschiff durch einen Tunnel fliegen, der zwei Punkte im Universum verbindet. Voraussetzung dazu ist, dass der Raum zwischen den Punkten so stark gekrümmt ist, dass sich tatsächlich eine Abkürzung gegenüber dem flachen Raum

ergibt. Im Wurmloch selbst könnte ein Raumkreuzer nur unterlichtschnell fliegen, doch in Bezug auf die Start- und Zielpunkte hätte die Reise mit Uberlichtgeschwindigkeit stattgefunden.

Mit dieser Art des Transports gibt es jedoch einige Probleme. Um den Raum so stark zu krümmen, dass ein Wurmloch entsteht, bedarf es einer gewaltigen Masse. Zudem kann es keine makroskopischen Dimensionen annehmen, Raumschiffe kämen also nicht hindurch, sondern allenfalls Elementarteilchen. Um ein Loch auf Raumschiff-Größe zu dehnen und stabil zu halten, ist zudem negative Energie erforderlich. Das Raumschiff müsste in einem Triebwerksring ebenfalls negative Energie erzeugen. Dadurch entsteht eine Art Antigravitation. Obwohl die Quantenphysik diese exotische Energieform zulässt, weiß niemand, ob es sie tatsächlich gibt oder ob sie sich technisch erzeugen lässt.

Einen Ausweg ersann der mexikanische Physiker Miguel Alcubierre. In seiner 1994 erschienenen Studie »The Warp Drive: Hyper-fast travel within general relativity« beschreibt er einen modifizierten Warp-Antrieb, der die Raumzeit um ein Raumschiff herum verändert. Vor dessen Bug wird der Raum gestaucht und dafür hinter dem Heck ausgedehnt. In der entstehenden Blase mit verzerrter Raumzeit kann ein Raumschiff mit beliebig hoher Geschwindigkeit fliegen. Der Antrieb verschiebt den Ausgangspunkt der Reise gewissermaßen nach hinten und holt das Ziel näher heran.

Ganz anders funktioniert der sogenannte Tachyonen-Antrieb, um den es in esoterischen Kreisen viel Geraune gibt. Tachyonen sind hypothetische überlichtschnelle Teilchen mit höchst befremdlichen Eigenschaften. Sie fliegen in der Zeit zurück und werden schneller, wenn man sie abbremst. So wie für normale Teilchen die Lichtgeschwindigkeit eine Obergrenze darstellt, ist sie für die Tachyonen die Untergrenze, die

sie nicht unterschreiten können. Sie müssten zudem eine imaginäre Ruhemasse haben. Solange sie sich mit Uberlichtgeschwindigkeit bewegen, haben Tachyonen jedoch eine reale Masse. Damit besitzen sie wie normale Photonen einen Impuls, der Schub für ein Raumschiffliefern kann. So lassen gerade ihre absurd erscheinenden Eigenschaften die Tachyonen als geeignet für einen Uberlichtgeschwindigkeits-Antrieb erscheinen.

Wie ein Raumkreuzer auf dieses Tempo beschleunigt werden könnte, ist allerdings unklar, denn dies widerspräche der Relativitätstheorie. Ebenso ist keine Technik in Sicht, mit der sich diese Geisterteilchen bändigen lassen - sofern sie überhaupt existieren. Das aber weiß niemand.

Es gibt noch ein Konzept, das eines fernen Tages Menschen zu den Sternen führen könnte: der Flug durch den Hyperraum das heißt durch höhere Dimensionen. Eine theoretische Grundlage dafür schuf der 2001 verstorbene deutsche Physiker Burkhard Heim. Er erlitt ein tragisches persönliches Schicksal: Durch einen Unfall verlor er beide Hände und wurde fast völlig blind und taub. Deshalb verließ er 1954 das damalige Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen und forschte privat weiter. Dabei entwarf er eine »einheitliche strukturelle Quantenfeldtheorie der Materie und Gravitation«, die als Erweiterung der Relativitätstheorie gelten kann. Sie enthielt in der ursprünglichen Fassung sechs Dimensionen (spätere Versionen arbeiteten mit anderen Dirnensionszahlen). Darin entwickelte Heim eine Formel, die für alle Partikel die korrekten Massen liefert. Im Jahr 1959 schlug er ein neues Antriebssystem für die Raumfahrt vor. Die dabei vorgetragenen physikalischen Ideen machten den behinderten Forscher international bekannt.

Der Antrieb beruht auf einem Generator, der ein extrem starkes Magnetfeld erzeugt. Dieses wiederum baut ein Gravitationsfeld auf, das den Schub liefert. Werden bestimmte Feldstärken überschritten, schlüpft das Raumschiff in eine höhere Dimension, in der das kosmische Tempolimit nicht gilt, es kann also weit überlichtschnell fliegen. Wird das Magnetfeld abgeschaltet, fällt das Schiff in unser normales Raumzeit-Kontinuum zurück. Ein Flug zum Mars mit diesem Hyperantrieb soll drei Stunden dauern, ein elf Lichtjahre entfernter Stern würde in 80 Tagen erreicht.

Schon 1996 wurde Heims Antriebsprinzip in die Liste der möglichen Kandidaten für außergewöhnliche Raumschiffantriebe in das "Breakthrough Propulsion Physics Program« der US-Raumfahrtbehörde NASA aufgenommen. Daneben bastelten andere Institute an einer Realisierung des Magnetfeldantriebs. Jüngst griffen die Forscher Walter Dröscher und Jochem Häuser vom Institut für Grenzgebiete der Wissenschaft der Universität Innsbruck das Konzept auf. Nach ihrer Meinung ließe sich ein Prototyp in wenigen Jahren bauen. Im Sandia National Laboratory der USA in New Mexico gibt es einen Apparat (die sogenannte Z-Maschine), der Magnetfelder der geforderten Stärke erzeugen kann. Die Wissenschaftler dort erklärten sich zu Tests bereit, wenn sich die Theorie weiter erhärten lässt.

Andere Forscher sind skeptischer. Denn der Heiirische Hyperantrieb basiert auf völlig neuen physikalischen Gesetzen. Grundlage ist die Vorstellung, dass die Gravitation eine Spielart der Elektromagnetischen Kraft ist, auf der die gesamte Elektrotechnik beruht. Träfe Heims Idee zu, könnte sich auch die Gravitation technisch beherrschen lassen, entsprechende Antriebsmaschinen könnten eine Antigravitation erzeugen. Die Beschleunigung auch von großen Massen auf hohe Geschwindigkeiten würde zum Kinderspiel. Mit der Idee spielt auch der US-Astronom Carl Sagan in seinem Roman »Contact«. Dort erzeugen ineinander wirbelnde Magnetschei-

ben ein komplexes Feld, das einen Raumzeit-Tunnel zu einem anderen Sternensystem öffnet.

Werden wir also jemals überlichtschnell zu den Sternen fliegen? Nach heutigem Ermessen ist es unwahrscheinlich. Einige Physiker wollen es aber nicht ausschließen, denn die erforderliche Technik sei »fantastisch, aber zumindest nicht unmöglich«. Auch der US-Physiker Lawrence Krauss, der die Plausibilität der »Star Trek«-Technologie analysierte, spricht von einer »Nicht-Unmöglichkeit«. Zumindest aber wird es noch sehr lange dauern, bis Scotty im Maschinenraum den Warp-Antrieb zündet.

Wie die Natur ihr kosmisches Tempolimit überschreitet

Alles ist relativ - selbst die kosmische Höchstgeschwindigkeit. Aus den Gleichungen der Relativitätstheorie Albert Einsteins ergibt sich, dass die Geschwindigkeit des Lichts (physikalisches Kürzel: c) eine der fundamentalen Konstanten des Universums ist. Sie beträgt exakt 299 792 Kilometer pro Sekunde. Das gilt jedoch nur für Teilchen ohne Ruhemasse, wie das Photon, die sich im Vakuum bewegen. Andere Teilchen, die eine Ruhemasse besitzen - wie Protonen, Neutronen oder Elektronen, aus denen die Atome bestehen -, können diese Geschwindigkeit niemals erreichen. Um sie auf exakt c zu beschleunigen, bedürfte es unendlicher Energie. Deshalb bleiben Partikel in Teilchenbeschleunigern stets um ein paar Prozent unter dieser größtmöglichen Geschwindigkeit im All.

Allerdings lässt sich die Natur ein Hintertürchen offen, denn das kosmische Tempolimit gilt nur für Prozesse, bei denen innerhalb des Universums Information übertragen wird. Doch möglicherweise gibt es Ausnahmen, die trotzdem eine überlichtschnelle Signalübertragung erlauben. Darauf weisen einige Experimente hin, die in den 1990er-Jahren Furore machten. Im Extremfall schien das Signal sogar den Empfänger zu erreichen, noch bevor es vom Sender losgeschickt worden war.

Hätte dieses Ergebnis Bestand, würde es unser gesamtes Weltbild auf den Kopf stellen. Denn dann wäre die Kausalität aufgehoben. Sie besagt, dass die Ursache eines Vorgangs grund-

sätzlich der Wirkung vorausgeht. So muss ein Gewehrschütze erst den Finger am Abzug krümmen, bevor die Kugel den Lauf verlässt. Die Umkehrung dieser Abfolge erscheint uns unmöglich. In der Tat wäre eine Welt mit aufgehobener oder vertauschter Kausalität für uns voller Absurditäten.

Durchgeführt hat die erwähnten Experimente der Physikprofessor Günter Nimtz von der Universität Köln. In seinem Versuchsaufbau sandte er Mikrowellen von einem Generator zu einem Detektor, und zwar auf zwei verschiedenen Wegen. Einmal leitete er die Strahlen über einen Hohlleiter zum Empfänger. Den zweiten Strahl sandte Nimtz über die gleiche Distanz durch die Luft.

Eigentlich stellt ein enger Hohlleiter für Mikrowellen eine undurchdringliche Barriere dar. Ein spezielles Phänomen befördert einen Teil der Strahlung aber doch ans Ziel. Es handelt sich um den sogenannten Tunneleffekt. Folgender Vergleich verdeutlicht, wie er funktioniert: Schießt man einen Fußball einen Hügel hoch, kann er diesen nur überwinden und auf der anderen Seite herabrollen, wenn er genug Energie mitbekommt. Sonst stoppt er vor der Hügelkuppe und rollt zurück. Könnte er jedoch quer durch den Hügel rollen, käme er mit weit weniger Schusskraft ans Ziel.

In unserer Alltagswelt gibt es so etwas natürlich nicht. Doch in der mysteriösen Welt der Quanten kann ein Teilchen einen Potenzialwall (unseren Hügel) tatsächlich durchtunneln. Es taucht dann auf der gegenüberliegenden Seite wieder auf. Die Wahrscheinlichkeit, mit der es die Barriere durchdringt, hängt von deren Stärke, der Teilchenenergie und weiteren Faktoren ab. Der seit 1928 bekannte Tunneleffekt spielt bei der Supraleitung (also der widerstandsfreien Leitung von elektrischem Strom, der somit fast ohne Energieverlust über weite Strecken transportiert werden kann) sowie der Radioaktivität eine Rolle, ebenso bei der Kernfusion, die unsere Sonne leuchten lässt.

Bei seinem Versuch kam Nimtz mit seiner Arbeitsgruppe zu einem überraschenden Ergebnis: Die Signale liefen durch den Hohlleiter nicht nur schneller als durch die Luft. Sie erreichten sogar annähernd die doppelte, bei längerem Tunnel sogar die 4,7-fache Lichtgeschwindigkeit. Der Kölner Forscher beobachtete zudem, dass das Signal vor der Barriere kurz innehält - wie ein Springpferd, das vor dem Hindernis scheut - und dann blitzschnell am anderen Ende auftaucht.

In einem abgewandelten Experiment konnte Nimtz dann zeigen, dass sich auch Information überlichtschnell versenden lässt: Er modulierte seine Mikrowellen mit den Klängen von Mozarts Symphonie Nr. 40 in g-Moll. Leicht verrauscht waren die Akkorde im Empfänger wahrnehmbar.

Kurz daraufkamen ähnliche Nachrichten aus den USA. Dort, an der *University of California* in Berkeley, hatte der Quanten-optik-Professor Raymond Chiao es nach eigenen Angaben geschafft, einzelne Photonen im sichtbaren Bereich des Spektrums mit Überlichtgeschwindigkeit zu tunneln.

Spektakulärer noch verlief das im Juli 2000 durchgeführte Experiment einer Arbeitsgruppe um den Physiker Lijun Wang vom NEC Research Institute in Princeton. Die Forscher sandten Laserpulse durch eine sechs Zentimeter lange Glaszelle, die mit Cäsiumdampf gefüllt war. Das Intensitätsmaximum jedes Pulses wäre im Vakuum 0,2 NanoSekunden unterwegs gewesen. Beim Durchgang durch das Cäsium aber trat das Licht 62 Nano Sekunden früher aus der Kammer aus. Dies bedeutete laut Wang, dass die Information die Kammer verließ, bevor sie überhaupt in sie eingedrungen war. Das Laserlicht schien mit dem 310-Fachen der Vakuum Lichtgeschwindigkeit durch die Teststrecke zu rasen.

Seit den ersten Veröffentlichungen über die Überschreitung des kosmischen Tempolimits streiten die Forscher um die richtige Interpretation der Experimente. Eine wichtige Frage lautet: Welche Bedeutung hat »Information« in der Welt der Quanten? Würde keine Information übertragen, wäre der Disput gegenstandslos. Doch mit der Mozart-Symphonie als Demonstrationsobjekt wollte Günter Nimtz ja zeigen, dass doch ein Informationssignal übertragen wird. Nach seiner Meinung sind quantenphysikalische Tunnel »Räume ohne Zeit«, in denen sich Information unendlich schnell bewegt. Sein Experiment verletze keinesfalls die allgemeine Kausalität, nach der die Ursache zeitlich vor der Wirkung liegt, wohl aber die »Einstein-Kausalität«, welche die überlichtschnelle Ausbreitung von Energie und Information verbietet.

Andere Forscher haben eine trivialere Erklärung für das Phänomen zur Hand. Durch den Tunneleffekt, argumentieren sie, werde die Form der Lichtwellenpakete aufgrund von Quanteneffekten verändert. Beim Aussenden steigt ihre Energie an, erreicht ein Maximum und fällt symmetrisch dazu wieder ab. Dieser Gipfel liegt in der Mitte des davonfliegenden Wellenzugs. Im Tunnel wird er nach vorn verschoben. Da sowohl Sender als auch Empfänger jeweils die Maximalenergie registrieren, taucht das Signal im Empfänger relativ zum Sender nun früher auf, was eine überlichtschnelle Bewegung nur vortäuscht. Der Vorgang lässt sich mit dem Ausrollen eines Teigs vergleichen: An manchen Stellen hat er Luftblasen, die vom Nudelholz auseinandergedrückt werden und weiter vorne neu entstehen.

Wieder andere Physiker sagen, wegen der Heisenberg'sehen UnSchärferelation könne man nicht entscheiden, wo sich das Photon im Tunnel genau befinde. Und damit habe es keinen Sinn, überhaupt eine Geschwindigkeit zu messen. Einig sind sich die Wissenschaftler nur darin, dass die Überlichtgeschwindigkeit keinen Widerspruch zur Kausalität darstellt. Auch die Relativitätstheorie werde nicht verletzt, da sie sich nur auf die Geschwindigkeit von Informationen im jeweils

eigenen System bezieht, nicht aber in Tunneln. Albert Einstein wäre damit aus dem Schneider.

Es gibt noch ein anderes überlichtschnelles Phänomen, nämlich den »Einstein-Podolsky-Rosen-Effekt«. Ursprünglich wurde er von Einstein und seinen Mitstreitern Boris Podolsky und Nathan Rosen als Gedankenexperiment erfunden. Das Forschertrio wollte damit die Quantentheorie zu Fall bringen, die Einstein zutiefst suspekt war (»Gott würfelt nicht«). Werden zwei Teilchen miteinander in Berührung gebracht, dann sind sie anschließend »verschränkt«, wie die Physiker sagen. Damit sind ihre quantenphysikalischen Eigenschaften gekoppelt.

Die Folgen erscheinen absurd: Wird eines der verschränkten Teilchen von einem Detektor nachgewiesen und auf seine Eigenschaften hin analysiert, so stehen augenblicklich auch die Eigenschaften des anderen Teilchens fest - selbst wenn es Lichtjahre von seinem Partner entfernt ist. Vor der Messung sind die Quantengrößen des verschränkten Systems indes unbestimmt. Die Information über den gemessenen Quantenzustand des ersten Teilchens müsste »instantan«, also ohne Zeitverzögerung und somit überlichtschnell an das zweite Teilchen übermittelt werden, damit dieses seinen korrelierten Anti-Zustand einnehmen kann. Spöttisch sprachen die drei Quanten-Skeptiker von der »spukhaften Fernwirkung«.

Seit einiger Zeit steht aber fest, dass es diesen geheimnisvollen Effekt tatsächlich gibt. Dies zeigten Experimente zur sogenannten Quantenteleportation, die zuerst von österreichischen Physikern durchgeführt wurden. Dabei schießt ein Paar verschränkter Photonen durch Lichtleiter in verschiedenen Richtungen davon. Wird der Quantenzustand eines der Lichtteilchen gemessen, »erfährt« der Partner auf rätselhafte Weise davon und nimmt augenblicklich, ohne Zeitverzug, den entgegengesetzten Zustand ein - ganz wie es Einsteins Gedankenexperiment beschreibt. Dies bestätigt die Quantentheorie,

in diesem Fall hatte Einstein unrecht. Wie die »spukhafte Fernwirkung« funktioniert, blieb bis heute eines der großen Geheimnisse der Natur, auch wenn sich Quantenphysiker einige komplizierte Erklärungen ausgedacht haben.

Letztendlich verdankt auch unser Universum seine heutige Form einem überlichtschnellen Prozess. Unmittelbar nach dem Urknall dehnte es sich in den ersten Sekundenbruchteilen seiner Existenz um den ungeheuren Faktor von bis zu 10^{50} aus. »Inflation« nennen die Kosmologen diesen Vorgang. Als er endete, war der Raumbereich, der dem heute sichtbaren Universum entspricht, je nach Rechenmodell etwa 15 Zentimeter (was einer Grapefruit entspricht) bis zu einen Meter groß (andere Modelle bringen Räume hervor, die größer sind als das beobachtbare Universum). Angestoßen wurde die rasende Ausdehnung von einem Feld - dem sogenannten »Inflaton« -, das eine abstoßende Kraft ausübt.

Dessen titanische Kraft trieb das Universum weit überlichtschnell auseinander. Deshalb enthält es Gebiete, von denen wir bislang keine Signale (Lichtwellen) empfangen konnten. Sie liegen von uns aus gesehen hinter dem kosmischen Horizont. Diese Theorie wird von einigen astronomischen Beobachtungen gestützt, vor allem durch die Messung der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung. Abermals wird das Einsteirische Postulat nicht verletzt, denn es legt die Obergrenze von c nur für die Signalübertragung innerhalb des Kosmos fest, nicht jedoch für dessen Bewegung als Ganzes. Nach dem Ende der Inflationsphase, als die Kraft des Inflatons erschöpft war, setzte sich die Expansion des Alls mit Unterlichtgeschwindigkeit fort. Diese »normale« Ausdehnung beobachten wir noch heute.

Der Natur geht es offenbar wie uns Menschen. Sie hat sich zwar ein Tempolimit gesetzt, doch mit der Einhaltung desselben nimmt sie es nicht immer allzu genau.

Vakuumenergie und kalte Fusion

Lässt sich aus dem Vakuum Energie gewinnen?

Jber das Vakuum, also den materiefreien Raum, machte sich schon Aristoteles Gedanken. Ihm wird die Hypothese zugeschrieben, dass die Natur vor leeren Räumen zurückschrecke, sie habe einen **horror vacut**. Er bestritt, dass es ein Vakuum - also einen absolut leeren Raum - geben könne, da dies ein **Zustand ohne Wiederkehr** sei. Nach seiner Logik wäre es zwar möglich, alle Teilchen aus einem Raum zu schaffen, doch dann könnten sie nie mehr an ihren Platz zurückkehren. Um dieses absolute Nichts zu vermeiden, würden leere Räume Gase oder Flüssigkeiten ansaugen.

Seine Ideen untermauerte der griechische Philosoph mit einigen Gedankenexperimenten. So überlegte er, dass ein Stein im absoluten Vakuum nicht existieren könne, da er nicht wisse, wohin er fallen müsse, weil die Schwerkraft mit der Materie ja ebenfalls beseitigt wird. Im leeren Raum gebe es keine Orientierungsmöglichkeit, weder Oben noch Unten, deshalb sei die Entstehung des Vakuums unmöglich, denn es würde nach seiner Entstehung für immer existieren, dafür würde die Welt der Teilchen - und damit auch wir - für immer verschwinden.

Mit diesen aus heutiger Sicht eher abstrusen Postulaten beeinflusste Aristoteles die Entwicklung der Wissenschaft bis weit in die Zeit der Aufklärung hinein. So gebot der Herzog von Alba in den spanischen Niederlanden im 16. Jahrhundert den

Wissenschaftlern seines Landes, jeden Gedanken an ein Vakuum fallen zu lassen. Doch schon im 17. Jahrhundert versuchten einige Naturforscher, ein solches künstlich zu erzeugen. Führend dabei waren der Italiener Evangelista Torelli und der Franzose Blaise Pascal mit ihren Experimenten zur Messung des Luftdrucks.

Nur in einer Hinsicht hatte Aristoteles recht: Die Natur schreckt tatsächlich vor der Leere zurück, aber in ganz anderer Weise, als der antike Denker meinte. Selbst das Hochvakuum im intergalaktischen Raum, in dem es kaum Materieteilchen gibt, ist nicht wirklich leer. Infolge quantenmechanischer Gesetze springen Partikel für winzige Sekundenbruchteile in die Existenz und verschwinden sofort wieder. In diesem Prozess entstehen zugleich Teilchen und ihre Antiteilchen - etwa Elektronen und Positronen -, doch diese zerstrahlen sich unverzüglich gegenseitig. Dabei hinterlassen sie Spuren in Form elektromagnetischer Felder, die das ganze Universum erfüllen. Physiker sprechen deshalb vom Quantenvakuum. Es ist, bildlich gesprochen, ein brodelnder See aus Teilchen und Antiteilchen, die ständig entstehen und vergehen.

Dieser Prozess ist eine Konsequenz der Heisenberg'schen UnSchärferelation. Sie besagt in diesem Fall, dass sich dem Vakuum für sehr kurze Zeit Energie entziehen lässt, die sich in die virtuellen Teilchenpaare umwandelt. Dies geschieht auch, wenn die Temperatur in der Umgebung beim absoluten Nullpunkt liegt, also bei minus 273,15 Grad Celsius (oder 0 Kelvin), an dem bei normaler Materie alle energetischen Prozesse zum Stillstand kommen. Daher rührt auch die Bezeichnung »Nullpunktsenergie«. Das Nichts ist in Wahrheit ein komplexes, reich strukturiertes Gebilde. Wie Aristoteles vermutete, ist es prinzipiell unmöglich, einen Raumbereich völlig von Teilchen zu entleeren.

Zunächst waren das Quantenvakuum und die daraus resultierende Nullpunktsenergie nur theoretische Konzepte. Doch 1947 konnte der US-Physiker und Nobelpreisträger Willis Eugene Lamb experimentell zeigen, dass es die Quantenfluktuationen des Vakuums tatsächlich gibt. Er hatte eine Verschiebung bestimmter Energieniveaus in der Elektronenhülle von Wasser Stoffatomen entdeckt. Die Ursache dafür ist, dass das Elektron, das die Hülle des Wasserstoffatoms bildet, mit den Feldern des Quantenvakuums in Wechselwirkung tritt. Seither ist der Effekt als Lamb-Verschiebung bekannt. Ein Jahr später sagte der niederländische Physiker Hendrik Casimir einen weiteren Effekt der Vakuumenergie vorher. Dieser wurde 1958 von Marcus Spaarnay, einem Kollegen Casimirs, im Experiment nachgewiesen. Der Casimir-Effekt besagt, dass durch das Quantenvakuum eine Kraft auf zwei sehr eng beieinanderliegende, parallele Metallplatten wirkt. Sie werden dadurch aufeinander zu gedrückt.

Der Grund dafür ist, dass zwischen den Platten nur virtuelle Teilchen mit ganz bestimmten Energien entstehen können. Teilchen lassen sich auch als Wellen beschreiben. Im Zwischenraum zwischen den Platten können sich aber keine Teilchen aufhalten, deren Wellenlänge größer als der Plattenabstand ist. Außerhalb der Platten können indes Teilchen aller Wellenlängen entstehen. Davon gibt es aber viel mehr als die kurzwelligen Teilchen zwischen den Platten. In der Summe erzeugen sie einen von außen wirkenden Druck, der die Platten zusammenschiebt. Das Phänomen wurde von mehreren Forschergruppen mittels ausgeklügelter Versuchsanordnungen glänzend bestätigt.

Schon früh spekulierten einige Physiker, ob sich das Vakuum nicht als unerschöpfliche Energiequelle anzapfen ließe. Das erscheint jedoch unmöglich. Denn das Werden und Vergehen der virtuellen Teilchen ist ein Nullsummenspiel. Die zu ihrer Entstehung aus dem Vakuum entnommene Energie wird gewissermaßen nur geborgt: Sobald sich die Partikel zerstrahlen, fließt sie an den Raum zurück.

Energetischer Gewinn ließe sich allenfalls erzielen, wenn es gelänge, die paarweise auftretenden Teilchen ohne Energieaufwand zu trennen und separat weiter zu nutzen. Wie das funktionieren könnte, weiß aber niemand. Außerdem ist die Energiedichte des Vakuums sehr gering, sodass man für eine Nutzung sehr viele Teilchen separieren und einfangen müsste. Auch der Casimir-Effekt ist nicht unmittelbar nutzbar. Zwar ließe sich theoretisch durchaus Energie aus der Bewegung von Platten ziehen, die vom Quantenvakuum zusammengeschoben werden, etwa mittels eines Hebelgestänges. Doch um die Platten wieder zu trennen, muss die gleiche Energiemenge in das System gesteckt werden.

Einige Forscher aber geben die Hoffnung nicht auf. So entwickelte der US-Physiker Robert Forward in einem Gedankenexperiment eine »Quantenfluktuations-Batterie«. Sie besteht aus einem Stapel elektrisch leitfähiger Platten. Werden sie alle mit gleichnamigen elektrischen Ladungen geladen, so stoßen sie sich gegenseitig ab (bekanntlich stoßen sich gleichnamige Ladungen ab, ungleichnamige aber ziehen sich an. Zwei jeweils positiv geladene Platten stoßen sich also ab). Diese Bewegung ist der Casimir-Kraft entgegengerichtet, die ja die Platten zusammenschieben will. Wird die Abstoßungskraft so justiert, dass sie ein wenig schwächer ist als die Schubkraft des Quantenvakuums, erhöht sich die Energie des elektrischen Felds zwischen den Platten. Nullpunktsenergie würde somit in elektrische Energie umgewandelt.

Zudem veröffentlichten zwei US-Physiker 1993 eine Studie, in der sie zeigten, dass die Energiegewinnung aus dem Quantenvakuum prinzipiell funktionieren könnte, ohne die Gesetze der Thermodynamik zu verletzen. Das machen sich nun Forscher der Harvard Universität in Cambridge im US-Staat Massachusetts zunutze. Sie wollen die Balance zwischen Casimir-Anziehung und elektrostatischer Abstoßung nutzen, um kleine Bewegungssensoren und Schalter zu bauen. Bis aber Strom aus unseren Steckdosen kommt, der dem Quantenvakuum entnommen wird, dürfte es noch sehr lange dauern - sofern es überhaupt jemals gelingt, das Nichts als ewige Energiequelle anzuzapfen.

Gibt es freie Energie?

Von nichts kommt nichts«, das ließ schon der Großdichter William Shakespeare seinen König Lear sagen. Doch manche Leute glauben, sie könnten dem Nichts doch etwas abtrotzen, nämlich Energie - genauer: die mysteriöse »freie Energie«. Sie soll mithilfe geheimnisvoller Maschinen gewonnen werden, von denen ihre Erfinder behaupten, sie würden mehr Energie abgeben, als für ihren Betrieb hineingesteckt werden muss. Energiequellen sind wahlweise die Gravitation, der Magnetismus, Tachyonen oder der leere Raum (deshalb sprechen manche Leute auch von »Raumenergie«).

Entsprechend haben diese Geräte auch klangvolle Bezeichnungen wie Gravitations- oder Tachyonenkonverter, Raumenergiewandler, Plasmatron, Magnetmotor, Magnet-Puls-Motor und dergleichen mehr. Regelmäßig veranstalten die oft in der Esoterik-Szene angesiedelten Adepten dieser Technologien Kongresse über freie Energie. Dort gibt es dann viel Geraune um neue Wundermaschinen oder Fortschritte bei älteren Konzepten, die bald vor der Marktreife stehen, diesmal aber wirklich.

Einer der Stars dieser Szene ist ein gewisser Professor Leslie Szabo. Der gebürtige Ungar, der in Kanada als Kraftwerksexperte gearbeitet haben soll, arbeitet an einer »EBM« (von »Energy by Motion«) getauften Energiemaschine. Sie soll, nachdem sie erst einmal durch einen Startermotor in Gang gesetzt wurde, deutlich mehr Energie erzeugen, als ihr Betrieb erfordert. Der Effekt, sagt Szabo, trete erst im Megawatt-

bereich auf, darunter gehe es nicht. Es handle sich um einen auf Elektromagneten beruhenden Motor mit einem »geometrisch-magnetisch asymmetrischen Stator«. Dessen komplexe Geometrie, so der Erfinder, bringe »Drehfelder für Wechselstrom hervor, es entsteht ein rotierendes Magnetfeld. Es erfasst den Motor, die Energie wird zurückgeführt, es entsteht Autonomie.« Nur maximal zehn Prozent der erzeugten Energie müsse man zurückführen, dann laufe die Maschine von selbst weiter. Ein Prototyp soll es auf 100 000 Betriebs stunden gebracht haben. Mitarbeiter Szabos nannten bereits Preise für EBM-Maschinen. So soll ein Zehn-Megawatt-Aggregat 16 Millionen US-Dollar kosten.

Daneben machte im Jahr 2006 die irische Firma Steorn Schlagzeilen. Ihre Mitarbeiter wollen ein Perpetuum mobile erfunden haben, das mit der »Orbo-Technologie« funktioniert. Das Basisprinzip beruht ebenfalls auf »variierenden elektromechanischen Interaktionen«, die wiederum von wechselnden Magnetfeldern herrühren. Der Motor treibt eine durchsichtige Plastikscheibe an, einen äußeren Energieanschluss gibt es angeblich nicht. Orbo-Generatoren sollen in allen Größenordnungen funktionieren, sodass sich zahllose Endgeräte damit betreiben lassen, vom Handy bis zum Auto. Den Beweis, dass ihre Technik funktioniert, wollten die Iren öffentlich erbringen: Sie installierten im Sommer 2007 ihre Maschine im Londoner Kinetica-Museum, wo sie rund um die Uhr von Videokameras beobachtet wurde. Die Bilder sollten auf einer eigens eingerichteten Internetseite zu sehen sein. Doch die Vorführung wurde wegen technischer Schwierigkeiten abgesagt, die Welt wartet auf das Wunder bisher vergebens.

Weitere Apparate sind auf der Basis von Permanentmagneten aufgebaut. Das angeblich älteste Beispiel ist der Magnetmotor des Petrus Peregrinus aus dem Jahre 1269. Neuzeitliche Gerä-

wTheoryOfMagnetic Instab üity«). Meist beruhen sie auf komplexen Anordnungen von Magneten. In einigen Fällen sind diese gegeneinander versetzt auf gegenläufigen Rädern angebracht. Die wechselseitige Anziehung und Abstoßung der Magneten soll dann eine unablässige Drehung der Räder bewirken, ohne weitere Energiezufuhr von außen.

Das wohl einfachste Gerät dieser Art ist das von dem Australier Greg Watson erfundene SMOT (für »Simple Magnet Overunity Toy«). Es besteht aus zwei Magneten, die am oberen Ende einer leicht ansteigenden, nicht magnetischen Rampe angebracht sind. Setzt man eine Eisenkugel auf das untere Ende der Rampe, wird sie von den Magneten hinaufgezogen. Am oberen Rampenende fällt sie herunter und rollt weg. Gelänge es nun, die Kugel zum Ausgangspunkt zurückrollen zu lassen, würde sie wieder hinaufgezogen, hinabfallen und so weiter. Theoretisch könnte sich der Prozess endlos fortsetzen, denn der Magnet schwächt sich nicht ab, und die Bewegung resultiert aus dem Wechselspiel von Magnet- und Gravitationsenergie. Doch an der Vollendung des Konzepts arbeitet Watson noch.

Die Jünger der freien Energie berufen sich regelmäßig auf den Pionier der Wechselstromtechnik, den serbischen Elektroingenieur und Erfinder Nikola Tesla. Er soll selbst an Apparaten gebastelt haben, die freie Energie erzeugen können. Angeblich führte er 1930 ein Auto mit einem solchen Antrieb vor. Dafür gibt es jedoch keinerlei verlässliche Quellen, was auch nicht verwunderlich ist. Denn unter den von Tesla hinterlassenen Schriften und Patenten findet sich nirgendwo die Beschreibung eines solchen Generators. Einige seiner Experimente lassen aber darauf schließen, dass er in dieser Richtung geforscht hat. Einen Hinweis darauf gibt auch seine Bemerkung in einem Vortrag, den er 1891 vor US-Elektroingenieu-

ren hielt. Dabei sagte er, eines Tages könne es gelingen, »sich auf das tatsächliche Uhrwerk des Universums selbst abzustimmen«.

Neben Magnetgeneratoren wurden auch zahlreiche »freie Energie «Geräte erdacht, die sich der Gravitationsenergie bedienen. Es handelt sich meist um komplexe Anordnungen von Hebelgestängen und verschiebbaren Gewichten, die abwechselnd durch die Schwerkraft nach unten fallen und durch Trägheits- und Fliehkräfte wieder angehoben werden. Als ein Prototyp gilt ein Rad des deutschen Tüftlers Johann Bessler von 1714, das sich angeblich fortwährend drehte und dabei auch noch Arbeit verrichtete, ohne erkennbaren äußeren Antrieb.

Unlängst sorgten noch die Tachyonen-Antriebe für viel Geraune. Sie wurden aber rasch als Humbug entlarvt. Ihre Energie sollten sie aus sogenannten Tachyonen gewinnen. Das sind Teilchen, die spiegelbildlich zu den Photonen nur mit Überlichtgeschwindigkeit durch das All rasen können. Sie tauchen aber nur als hypothetische Konstrukte in einigen physikalischen Theorien auf. Ob es sie wirklich gibt, weiß niemand.

Was aber ist von all diesen Apparaturen zu halten? Sie laufen auf das Perpetuum mobile hinaus, das bedeutet übersetzt »ein sich ständig Bewegendes«, also eine Konstruktion, die, einmal in Gang gesetzt, ewig in Bewegung bleibt und dabei gegebenenfalls noch Arbeit verrichtet. In der Physik steht der Begriff »freie Energie« für die aus einem thermodynamischen System gewinnbare Energie, die sich in Arbeit umsetzen lässt. In dieser Definition wird bereits das Dilemma mit den oben beschriebenen Generatoren sichtbar. Denn sie stehen im Widerspruch zum zweiten thermodynamischen Hauptsatz. Er besagt vereinfacht ausgedrückt, dass Energie nicht in beliebigem Maß in andere Energiearten umwandelbar ist. Denn

bei jedem Umwandlungsprozess geht Wärmeenergie verloren, die nicht wieder »eingefangen« und weiter genutzt werden kann.

Das aber bedeutet, dass die fantastischen Apparate, die endlos Energie herbeizaubern sollen, prinzipiell nicht funktionieren können. Tatsächlich gibt es kein Gerät, bei dem je ein Energieüberschuss zweifelsfrei nachgewiesen worden wäre. Für »freie Energie «Adepten sind diese Ergebnisse sicherlich enttäuschend. Doch davon haben sie sich noch nie entmutigen lassen. Es wäre auch schade. Denn vielleicht gelingt es einem genialen Tüftler eines Tages ja wirklich, den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu überlisten. Angesichts der Klimaproblematik wäre ein System, das - entgegen Shakespeares Diktum - doch etwas aus dem Nichts schafft und dabei emissionsfrei Energie erzeugt, für die Menschheit ein wahrer Segen.

Liefert die kalte Fusion wirklich unendliche Energie?

Kaum ein Phänomen in der Wissenschaft ist so umstritten wie die »kalte Fusion«. Ihre Geschichte gleicht einer Achterbahnfahrt. Sie begann im März 1989. Damals berichteten die Elektro Chemiker Martin Fleischmann und Stanley Pons bei einer inzwischen legendären Pressekonferenz, sie hätten in ihrem Labor eine »kalte Kernfusion« beobachtet. Bei ihrem Experiment hatten sie schweres Wasser in ein Reagenzgefäß gegeben. Dessen Moleküle enthalten statt normaler Wasserstoffatome den »schweren« Wasserstoff Deuterium. Sein Atomkern besteht nicht nur aus einem Proton, sondern enthält zusätzlich noch ein Neutron.

Über zwei eingetauchte Elektroden aus dem Metall Palladium leiteten Fleischmann und Pons Strom. Wie auch normales Wasser zersetzte sich das schwere Wasser durch Elektrolyse in seine Bestandteile Wasser- und Sauerstoff. Doch das Forscherduo behauptete, bei dem Versuch sei mehr Energie freigesetzt worden, als sie zu Beginn hineingesteckt hatten. Ebenso hätten sie typische Nebenprodukte der Kernfusion wie freie Neutronen und Helium entdeckt. Folglich müssten in dem Reagenzbecher Fusionsreaktionen stattgefunden haben.

Die Kernverschmelzung erklärten beide wie folgt: Im Normalfall stoßen sich Atome, die sich einander nähern, gegenseitig ab. Der Grund dafür ist, dass ihre Kerne elektrisch gleichnamig geladen sind, und bekanntlich stoßen sich gleichnamige Ladungen ab, ungleichnamige ziehen sich an. Das Palladium kann sehr viel Wasserstoff bzw. Deuterium in

sein Metallgitter einlagern, dabei werden die Deuteriumatome jedoch stark deformiert. Solche Atome können unter Umständen die wechselseitige Abstoßung überwinden und unter Freisetzung von Energie zu Ileliumatomen verschmelzen.

Die Pressekonferenz provozierte in der Fachwelt einen Sturm der Entrüstung. Fleischmann und Pons hatten an den Fundamenten der konventionellen Physik gerüttelt. Denn Fusionsreaktionen setzen wegen der heftigen Abstoßung der Atome normalerweise bei Temperaturen von mehreren Millionen Grad Celsius ein. Erst dann haben sie genug Energie, um die Barriere der abstoßenden elektrischen Felder zu überwinden. Die beiden US-Forscher wollten die Kernverschmelzung aber bei Zimmertemperatur beobachtet haben. Wie sollte ihr kleiner Versuchsaufbau mit den zu erwartenden Energiemengen fertig werden? Zudem konnten andere Forschergruppen das Experiment nicht wiederholen. Fachkollegen bezichtigten Fleischmann und Pons schließlich des wissenschaftlichen Betrugs. Da sie auf ihrer Darstellung beharrten, wurden sie von der Universität von Utah, wo sie bis dahin forschten, entlassen. Der japanische Autokonzern Toyota finanzierte ihnen daraufhin ein Labor in Frankreich, in dem sie noch einige Jahre experimentierten, jedoch ohne Erfolg.

Hinter den Kulissen führten andere Arbeitsgruppen die Forschung an der kalten Fusion jedoch fort. Einige davon beobachteten die gleichen Effekte wie die unglücklichen Erstentdecker, andere jedoch nicht. Deshalb ist bis heute unklar, ob die Fusion im Reagenzglas funktioniert und ob sie als Energiequelle taugt.

Ein weiteres Experiment, das der Physiker Rusi Taleyarkhan von der Purdue Universität in West Lafayette (US-Staat Indiana) im Jahr 2002 in der Wissenschaftszeitschrift »Science« vorstellte, fachte den Streit erneut an. Im Auftrag des

US-Verteidigungsministeriums arbeitete Taleyarkhan - damals noch am *Oak Ridge National Laboratory* - an der Bläschenfusion, einer besonderen Spielart der kalten Fusion. Er füllte einen Zylinder mit Aceton (der Stoff ist als Nagellackentferner bekannt), das er mit starken Ultraschallwellen sowie mit Neutronen bestrahlte. In der Flüssigkeit bildeten sich dadurch sehr viele kleine Gasbläschen von etwa 50 Nanometer Größe, die sich auf etwa ein bis sechs Millimeter ausdehnten und dann innerhalb von NanoSekunden wieder zusammenfielen. Dieser Effekt wird »Kavitation« genannt, er erzeugt Lichtblitze und kann sogar Löcher in Schiffsschrauben reißen.

Taleyarkhan gab an, aufgrund der zusätzlichen Neutronen würden sich energiereichere größere Bläschen bilden, die bei der Implosion Temperaturen von einer bis zehn Millionen Grad Celsius erreichen. Für sein Experiment nutzte er Aceton, in dem der normale Wasserstoff durch Deuterium ersetzt wurde. In seiner Publikation gab der Physiker an, den »überschweren« Wasserstoff Tritium (ein Proton, zwei Neutronen) sowie freie Neutronen mit der passenden Energie gemessen zu haben - beides Anzeichen für eine erfolgte Kernfusion.

Auch diese Experimente haben einen Haken: Forscher an anderen Laboratorien konnten sie zunächst nicht wiederholen. Deshalb sah sich auch Taleyarkhan mit Betrugsvorwürfen konfrontiert. Zuerst setzte die Purdue Universität einen Untersuchungsausschuss ein, dessen Arbeit aber von Experten als undurchsichtig kritisiert wurde. Deshalb gab der Ausschuss für Wissenschaft und Technologie des US-Repräsentantenhauses im Frühjahr 2007 eine eigene Untersuchung in Auftrag; Ergebnisse lagen bei Drucklegung dieses Buchs noch nicht vor. Allerdings gelang es zwei Forschergruppen eine davon bestand aus Taleyarkhans Studenten -, das Experimenten -, das Experimenten davon bestand aus Taleyarkhans Studenten -, das Experimenten -, das Exp

riment 2004 und 2005 in Teilen zu wiederholen, was der Gescholtene als Bestätigung seiner Theorie ansah. Im November 2005 meldeten auch Physiker der TU Berlin, experimentelle Belege für die kalte Fusion gefunden zu haben.

Vielleicht bringt ein neues Experiment nun Licht in das Dunkel. Durchgeführt hat es eine Forschergruppe um Stanislaus Szpak vom *Space and Naval Warfare Systems Center* der US-Marine im kalifornischen San Diego (nicht zufällig betreiben insbesondere militärische Forschungseinrichtungen die Arbeit an einem »Hosentaschen«-Reaktor weiter). Der Versuch baut auf dem von Fleischmann und Pons entwickelten Ansatz auf, mit einem Unterschied: Die negative Elektrode besteht aus Nickel, das Palladium liegt im schweren Wasser in gelöster Form (als Palladiumchlorid) vor. Fließt Strom, schlägt sich das Metall auf dem Nickel nieder und nimmt dabei Deuterium auf.

In ihrer Studie, veröffentlicht im März 2007 in der renommierten deutschen Zeitschrift »Naturwissenschaften«, berichten Szpak und seine Mitstreiter ebenfalls, eindeutige Zeichen einer Fusionsreaktion entdeckt zu haben. Als Detektor diente ihnen eine spezielle Plastikfolie, die über das Nickelsubstrat gespannt war. Darin fanden sich unter dem Mikroskop winzige Krater. Sie können laut Szpaks Mitarbeiterin Pamela Mossier-Boss nur von einem Bombardement mit Fusionsprodukten stammen, nicht aber von chemischen Reaktionen.

Warum finden die einen Forscher Signale von Kernfusionen, andere aber nicht? Der Versuchsaufbau, so einfach er anmutet, ist keineswegs trivial. Das Palladium etwa muss metallurgisch aufbereitet und von höchster Reinheit sein. Zudem darf es keine Kontaminationen enthalten, etwa durch Helium aus der Raumluft. Auch dadurch wird es für die Forschergruppen schwierig, jeweils identische Versuchsbedingungen zu schaffen.

Kernphysikalisch spricht eigentlich nichts gegen die von Metallen katalysierte Fusion bei Zimmertemperatur. Doch weshalb versuchen dann so viele Wissenschaftler, die positiven Versuchsergebnisse zu negieren und ihre Urheber zu diskreditieren? Viele Forscher, vor allem die älteren, wollen einfach nicht wahrhaben, dass eine kalte Fusion möglich ist. Sie würde die bisherigen physikalischen Dogmen umstürzen, an die sie ihr Leben lang geglaubt haben.

Warum aber mischt sich manchmal - wie im Fall von Fleischmann und Pons und zuletzt auch Taleyarkhan - die Politik ein? Hier schlägt die Stunde der Verschwörungstheoretiker. Sie sehen die großen Energiekonzerne am Werk, deren Bosse sich der Politiker bedienen, um unliebsame Konkurrenz in Form von billigen Kleinreaktoren fernzuhalten und damit ihre Profite aus Kohle- und Atomkraftwerken zu sichern. Auch die Entwicklung milliardenteurer »heißer« Fusionsreaktoren würde dadurch obsolet - und entsprechend viele Wissenschaftler wären arbeitslos.

Dabei ist noch völlig unklar, ob die kalte Fusion als Energiequelle taugt und nicht bloß ein kurioses physikalisches Phänomen darstellt. Manche Physiker bezweifeln, dass ihr Energieüberschuss ausreicht, um sie technisch zu nutzen. Zunächst muss es aber darum gehen, die Realität der Fusionsreaktionen im Wasserbecher endgültig zu bestätigen. Das könnte bald gelingen. Das US-Energieministerium, so verlautbaren einige der beteiligten Forscher, ist bereit, Folgeexperimente zu finanzieren.

Dunkle Energie und Dunkle Materie

Dunkle Energie - die treibende Kraft des Universums

Dass sich das Universum ausdehnt, wissen die Astronomen seit 1929. Damals bemerkte der US-Astronome Edwin Hubble, dass sich andere Galaxien von unserer heimatlichen Milchstraße entfernen - und zwar umso schneller, je weiter sie entfernt sind. Bald hatten die Himmelsforscher auch die Ursache dieser damals so genannten Nebelflucht erkannt: Sie war eine direkte Konsequenz des Urknalls. In diesem Punkt Null der Schöpfung war alle Materie in einem winzigen Raumpunkt konzentriert und flog infolge der Urexplosion in alle Richtungen auseinander.

Die wabernden Schwaden der neu entstandenen Materie, die hauptsächlich aus den Gasen Wasserstoff und Helium bestand (ein winziger Anteil des Metalls Lithium war auch noch dabei), flogen aber nicht in einen bereits existierenden Raum hinein, wie das bei Splittern einer detonierenden Bombe auf der Erde der Fall ist. Raum und Zeit entstanden nämlich nach heutigen Vorstellungen mit der Materie zusammen. Deshalb expandiert der Raum selbst und reißt die Materie dabei mit. Dies lässt sich mit Rosinen in einem Hefeteig vergleichen. Wenn der Teig aufgeht, trägt er die Rosinen mit sich, sodass sie sich voneinander entfernen. Je weiter zwei Rosinen in der ursprünglichen Masse voneinander entfernt sind, desto mehr Teig kann sich zwischen ihnen aufblähen. Die Distanz zwischen ihnen vergrößert sich also schneller als zwischen zwei einander näheren Rosinen.

Genau dieses Phänomen beobachteten Hubble und andere Astronomen auch bei den Galaxien und Galaxienhaufen im Universum, die sich schon bald nach dem Urknall aus dem Urgas gebildet hatten. Doch weil die im All verteilten Massen einander anziehen, sollte die Expansion abgebremst werden. Einige kosmologische Modelle prognostizierten sogar, dass die Ausdehnung in ferner Zukunft zum Stillstand kommen würde. Dann sollten die Galaxien, getrieben von der eigenen Anziehungskraft, wieder aufeinander zu fliegen, bis alle Materie in einem feurigen »Endknall« verschmilzt.

Entsprechend groß war die Überraschung, als 1997 gleich zwei Forschergruppen herausfanden, dass sich die kosmische Expansion nicht verlangsamt, sondern im Gegenteil sogar noch beschleunigt. Sie hatten Detonationen von Supernovae beobachtet, die dem »Typ la« zugehören. Diese Explosionen erfolgen in der Regel in engen Doppelsternsystemen. Einer der Sterne darin ist ein sogenannter Weißer Zwerg. Weiße Zwerge sind ausgebrannte Sterne, die nur noch leise vor sich hin glimmen. Doch mit ihrer starken Schwerkraft können sie Gas von ihrem Partnerstern zu sich herüberziehen. Es sammelt sich auf ihrer Oberfläche an. Erreicht die aufgesammelte Gasmenge einen bestimmten Schwellenwert, setzen schlagartig Kernfusionsreaktionen ein. Der Weiße Zwerg fliegt vollständig auseinander, wobei die Explosionswolke stets die gleiche Leuchtkraft erreicht. Aus dem Unterschied zwischen dieser absoluten Helligkeit, die am Ort der Detonation herrscht, und der scheinbaren Helligkeit, die sie von der Erde aus gesehen aufweist, können die Astronomen ihre Entfernung errechnen. Sie nutzen die la-Supernovae daher als »Standardkerzen« zur Messung kosmischer Distanzen.

Das Licht dieser titanischen Detonationen kann nahezu das gesamte Universum durchwandern. Wir sehen sie deshalb noch in vielen Milliarden Lichtjahren Entfernung leuchten.

Zugleich lässt sich über die kosmische Rotverschiebung des Lichts die Expansionsgeschwindigkeit des Universums zum Zeitpunkt der Explosion ermitteln. Dabei zeigte sich, dass die aus den Messdaten vieler Supernovae abgeleitete Ausdehnungskurve nicht linear verläuft, sondern gekrümmt ist. Offenbar muss es im Universum eine unsichtbare Masse geben, die den gesamten Raum durchdringt und gravitativ abstoßend wirkt. Da Masse und Energie bekanntlich einander äquivalent sind, nannten die Forscher diese geisterhafte Substanz »Dunkle Energie«. Ihre Existenz wurde später durch die Daten der Raumsonde WMAP bestätigt. Sie misst die kosmische Mikrowellenstrahlung, die aus allen Raumrichtungen zur Erde gelangt und als Nachleuchten des Urknalls gilt. Die Dunkle Energie, so zeigte sich, macht 75 Prozent des Massen-/Energiegehalts des Universums aus. Nur: Was diese exotische Energieform genau ist und wie sie entstand, weiß niemand. Einige Ideen haben die Kosmologen aber doch. So könnte es sich um jene Kraft handeln, die Albert Einstein unter der Bezeichnung »Kosmologische Konstante« in die Gleichungen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie einfügte. Diese Theorie, die ihn weltberühmt machte, hatte er bereits 1916 entwickelt, also lange vor Hubbles Entdeckung der Nebelflucht. Damals galt das Universum noch als »statisch«, also als stillstehend und im großen Ganzen unveränderlich. Doch diesem Modell zufolge müssten die Massen unter dem Einfluss ihrer Gravitation aufeinander zu stürzen. Das taten sie jedoch nicht, wie die astronomischen Beobachtungen zeigten. Deshalb postulierte Einstein in der Folge eine abstoßende Kraft, welche die Anziehungskräfte der kosmischen Massen gerade ausgleichen sollte. Allerdings konnte er sie physikalisch nicht begründen. Das holte später der belgische Physiker Georges Lemaitre nach. Er nahm an, dass der leere Raum (das Vakuum), wie er sich zwischen Sternen und Galaxien aufspannt, in

Wahrheit nicht absolut leer ist, sondern eine feststehende Menge an Energie (und somit an Masse) besitzt.

Dieser Energiegehalt des Vakuums wird von der Quantentheorie bestimmt. Im Vakuum laufen permanent sogenannte Quantenfluktuationen ab. In diesen wilden Energie Schwankungen entstehen Teilchen, die sich aber sofort gegenseitig wieder vernichten. Das geschieht so schnell, dass diese Prozesse mit heutigen Mitteln nicht messbar sind. Die daraus resultierende Vakuumenergie wirkt repulsiv, also abstoßend. Doch als Edwin Hubble dann über zehn Jahre später die kosmische Expansion fand, widerrief Einstein seine Kosmologische Konstante, die ja nun überflüssig geworden war, und nannte sie die »größte Eselei« seines Lebens. Der Entdeckung der Vakuumenergie verdankt sie jedoch eine grandiose Auferstehung.

Einige Forscher ersannen jedoch ein alternatives Modell. Ihre Version der Dunklen Energie nannten sie »Quintessenz«. So hieß bei den antiken Griechen ein mysteriöser feiner Urstoff, der sich als unfassbares fünftes Element zu den substanziellen Elementen Erde, Wasser, Luft und Feuer gesellte. Die Alchimisten des Mittelalters versuchten, die Quintessenz als reinstes Elixier zu destillieren. In der Kosmologie ist sie als ein dynamisches Quantenfeld definiert. Anders als die unveränderliche Kosmologische Konstante verändert sich der Wert der Quintessenz mit der Zeit. Ihre heutige Stärke erreichte sie im Wechselspiel mit den anderen Materieformen im All, der sichtbaren und der Dunklen Materie, deren Existenz indirekt zwar nachgewiesen wurde, doch deren Natur noch immer unklar ist. Wäre die Dunkle Energie wirklich eine veränderliche Größe, wie es das Quintessenz-Modell besagt, hätte dies möglicherweise gewaltige Konsequenzen für das Universum. Dann könnte sich das Feld, das sie hervorbringt, nämlich wieder abschwächen und sogar ganz verschwinden. In diesem Fall gewänne in ferner Zukunft die Gravitation wieder die Oberhand. Die im All enthaltenen Galaxien und Galaxienhaufen stürzten dann, wie ursprünglich beim statischen Universum gedacht, aufeinander zu, und es käme zum Endknall. Im umgekehrten Fall droht dem Kosmos ein schreckliches Ende: Wächst die abstoßende Kraft der Dunklen Energie extrem an, kann sie eines fernen Tages das Gefüge der Raumzeit regelrecht zerreißen.

Ein solches Szenarium entwarf der Physiker Robert Caldwell vom Dartmouth-Co liege im US-Staat New Hampshire. Seine Superkraft taufte er »Phantom-Energie«. Ihre volle Wirkung entfaltet sie, je nach den zugrunde gelegten Parametern, in 22 bis 50 Milliarden Jahren. Bis dahin beschleunigt sich die Ausdehnung des Alls zunehmend. Die Sterneninseln darin entfernen sich unaufhaltsam voneinander. Dann nähert sich die Entwicklung ihrem Höhepunkt. Gäbe es in unserer Milchstraße noch Astronomen, könnten sie die Struktur des Universums nicht mehr erkennen. Denn unsere Nachbargalaxien wie der Andromedanebel werden auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, verschwinden hinter dem kosmischen Horizont und sind von der Erde aus nicht mehr sichtbar. Rund 60 Millionen Jahre vor dem sich nun abzeichnenden Ende bricht unsere Heimatgalaxis auseinander, die Sterne darin werden einfach fortgerissen. Dann, 30 Minuten vor dem »Big Rip« (dem von Caldwell so genannten »Großen Reißen«), explodiert die Erde.

Im letzten Sekundenbruchteil vor dem Ende aller Dinge würden die Atome in ihre einzelnen Bestandteile zerrissen. Was dann genau geschieht, ist unklar. Manche Forscher glauben, die vom expandierenden Kosmos auseinandergerissenen Partikel verschwänden einfach. Andere meinen, das ganze Universum verwandle sich in ein riesiges Schwarzes Loch. Die wohl bizarrste Möglichkeit ersannen die Kosmologen Lauris

Baum und Paul Frampton von der *University of North Carolina*. Ihrem Modell zufolge zerfällt die Raumzeit im letzten Sekundenbruchteil in »Scherben«, die sich mit Uberlichtgeschwindigkeit voneinander entfernen. An diesem Punkt soll das Große Reißen aber plötzlich stoppen, da die Dichte der Phantom-Energie gleich der Energiedichte des gesamten Universums wird.

Nun fällt jede einzelne Scherbe in sich selbst zusammen. Dabei bringt sie jeweils ein eigenes neues Universum hervor: Der Kollaps einer Scherbe, die einen extrem hohen Energiegehalt aufweist, wird zum Urknall eines neuen Kosmos. Natürlich ist dieses atemberaubende Szenarium nur hypothetisch. Neueste Beobachtungen von Weltraumteleskopen und andere Messungen legen nahe, dass es nicht eintritt. Sie zeigen, dass die kosmische Expansion im frühen Kosmos tatsächlich abgebremst wurde, weil die Galaxien damals noch enger beieinanderstanden und die wechselseitige Anziehung entsprechend stärker war. Erst vor etwa fünf Milliarden Jahren begann die Abstoßungskraft der Dunklen Energie zu überwiegen - das Universum schaltete um vom Bremsen auf Beschleunigen.

Weiter trat zutage, dass die Dunkle Energie auf den betrachteten kosmologischen Distanzen kaum variiert. Offenbar gibt es, wenn überhaupt, eine nur sehr langsame zeitliche Variation. Dies stimmt am ehesten mit der Idee der Kosmologischen Konstante überein. Doch auch einige Quintessenz-Varianten sind damit noch nicht ausgeschlossen. In den kommenden Jahren werden neue Satelliten sowie detaillierte Himmelsdurchmusterungen mit leistungsstarken Teleskopen eine große Flut neuer Daten liefern. Dann können die Astronomen wohl endlich entscheiden, welches Modell zutrifft und woraus die geheimnisvolle Kraft, die unseren Kosmos beherrscht, wirklich besteht.

Woraus besteht die Dunkle Materie?

ass es dort draußen im All etwas gibt, das wir nicht sehen können, wissen die Astronomen seit den frühen 1930er-Jahren. Zuerst entdeckte damals der niederländische Astronom Jan Oort, dass die Scheibe der Milchstraße dünner ist, als sie aufgrund ihrer Masse und deren Schwerkraftwirkung sein sollte. So ähnlich wäre es, wenn die Erdatmosphäre durch die Schwerkraft der Erde stärker angezogen würde und daher weniger ausgedehnt wäre als erwartet. Wenig später analysierte der Schweizer Himmelsforscher Fritz Zwicky die Bewegungen der Galaxien im Coma-Galaxienhaufen. Er bemerkte, dass die Sterneninseln unerklärlich schnell darin umherschwirren. So viel Bewegungsenergie konnten sie von der Schwerkraft der im Haufen beobachteten Masse nicht mitbekommen haben, dazu hätte sie 400-mal größer sein müssen. Er befand, dass diese fehlende Masse in Form einer unsichtbaren Materie vorliegen müsse. Seine Fachkollegen lehnten diese Theorie vehement ab.

Doch um 1960 tauchte das Problem erneut auf. Die US-Astronomin Vera Rubin hatte die Umlaufgeschwindigkeiten von Sternen in Spiralgalaxien gemessen. In den Außenbereichen der Sterneninseln flogen die Himmelskörper unverhältnismäßig schnell. Dabei sollte sich ihr Tempo mit zunehmendem Abstand zum Zentrum der Galaxien reduzieren. Offenbar gibt es in diesen Regionen mehr Materie, als in den Teleskopen sichtbar ist. Erst jetzt nahmen die Forscher die Idee von der Dunklen Materie ernst.

Seither häuften sich Beobachtungen, die sich nur mit der unsichtbaren Masse erklären lassen. So enthalten Galaxienhaufen heißes Gas, das Röntgenstrahlung aussendet. Doch die Gasmassen sind so groß, dass die sichtbare Materie des Haufens sie nicht zusammenhalten kann. Auch die sogenannten Gravitationslinsen, bei denen die Schwerkraft einer Galaxie oder eines Galaxienhaufens das Licht eines in direkter Linie dahinterliegenden Sternsystems bündelt, lassen sich nur mithilfe der unsichtbaren Materie erklären. Unlängst entdeckten Astronomen auf Bildern, die das auf Hawaii errichtete Canada-France-Hawaii Teleskop geliefert hatte, gewaltige Strukturen aus Dunkler Materie, die das Universum netzartig durchziehen. Das größte dieser Filamente ist 270 Millionen Lichtjahre lang. Knoten dieses Netzes liegen möglicherweise in den sogenannten Polarring-Galaxien. Sie haben eine normale Scheibe, wie sie auch unsere Milchstraße besitzt. Zusätzlich besitzen sie aber einen Materiering, der senkrecht auf der Scheibe steht. Offenbar treffen hier zwei Ströme der Geistermaterie zusammen.

Den gängigen kosmologischen Modellen zufolge bildeten sich derartige Netze schon bald nach dem Urknall. Mit ihrer starken Gravitation zogen sie die normale Materie an, die sich um die Filamente aus Dunkler Materie herum klumpte. Aus diesen Massenansammlungen bildeten sich Galaxien, Galaxienhaufen und Sterne. Dank der Raumsonde WMAP, die den Hintergrund der kosmischen Mikrowellenstrahlung im Universum misst, ist auch bekannt, dass die Materie im Universum zu 23 Prozent dunkel ist, vier Prozent sind normale sichtbare Materie, 73 Prozent Dunkle Energie.

Nur eines ist trotz all dieser Daten noch immer unklar: Woraus besteht die Dunkle Materie? Einige Ideen dazu gibt es. Manche Forscher glauben, dass Schwarze Löcher, leuchtschwache oder erloschene Sterne wie Rote und Weiße Zwerge

oder sogar Planeten, die in großer Zahl unerkannt um die Galaxien herumfliegen, die Geistermaterie bilden könnten. Die Mehrheit der Physiker aber setzt auf eine oder mehrere Arten von Elementarteilchen. Zu diesen zählen die Neutrinos, die im Urknall in großer Zahl entstanden. Sie werden auch bei den energieliefernden Fusionsreaktionen gebildet, die im Inneren der Sterne ablaufen, und erst recht bei Supernova-Explosionen. Zunächst galten sie als masselos, doch nach neueren Erkenntnissen der Kernphysiker besitzen sie doch eine - wenngleich winzige - Masse.

Auch das Axion kommt als Konstituent der Dunklen Materie in Betracht. So heißt ein Teilchen, das zwar noch nicht nachgewiesen wurde, dessen Existenz sich aber aus theoretischen Erwägungen ergibt. Favoriten der Forscher sind indes die ebenfalls noch nicht aufgefundenen WIMPs. Das Kürzel steht für »Weakly InteractingMassive Particles«, zu Deutsch: massive Teilchen, die nur schwach mit normaler Materie wechselwirken. Dass es sie gibt, sagt eine Theorie namens »Supersymmetrie« (SuSy) vorher. Genauer handelt es sich dabei um die sogenannte supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells der Materie. Dieses beschreibt die bekannten Teilchen, die zwischen ihnen möglichen Wechselwirkungen sowie die vier Naturkräfte.

Das SuSy-Modell ordnet jedem bekannten Teilchen ein massereicheres Partnerteilchen zu, seinen sogenannten Superpartner. Die Zahl der Partikel im Kosmos würde sich damit verdoppeln. Zu ihrer Benennung wird jedem Namen bekannter Teilchen ein »S« vorangestellt, das ergibt dann so lustige Bezeichnungen wie »Selektron« oder »Squark«. Die Dunkle Materie könnte aus dem leichtesten SuSy-Teilchen bestehen. Da es nicht in noch leichtere Partikel zerfallen kann, muss es zwangsläufig stabil sein. Diese Teilchen müssten zusammen mit der normalen Materie im Urknall entstanden sein und

seither im Universum überdauern. Sie sind 100-mal massereicher als das Proton, treten mit bekannten Materieteilchen aber so gut wie nicht in Wechselwirkung (daher die Bezeichnung »WIMP«). Sie senden also kein Licht aus, sondern machen sich nur durch ihre Schwerkraft bemerkbar. Billiarden von ihnen jagen in jeder Sekunde durch die Erde, ohne dass wir etwas davon bemerken.

Jetzt haben die Forscher zur Jagd auf die unsichtbaren Partikel geblasen. Große Hoffnungen setzen sie auf den Teilchenbeschleuniger LHC des Kernforschungszentrums Cern bei Genf. In seinen Detektoren treffen mit fast Lichtgeschwindigkeit umlaufende Materie strahlen aufeinander. In jeder Sekunde kollidieren fast eine Milliarde Teilchen. In diesen energiereichen Zusammenstößen werden mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die gesuchten WIMPs erzeugt - sofern es sie gibt. Anhand der Signatur, die sie in den Detektoren hinterlassen, wären sie dann zu identifizieren.

Daneben wurden in jüngster Zeit in mehreren Ländern weitere Detektoren gebaut. Mit ihrer Hilfe wollen die Forscher Teilchen der Dunklen Materie, die aus dem All heranrauschen, dingfest machen. In Südkorea etwa gibt es in einem einst für ein Wasserkraftwerk gebohrten Stollen eine solche Anlage, deren Herzstück ein 100 Kilogramm schwerer Kristall aus Cäsiumjodid ist. Sie ging im Sommer 2007 in Betrieb. Einoder zweimal im Jahr, so hoffen die Koreaner, kommt ein WIMP nahe genug an eines der Moleküle im Kristall heran, um einen kurzen Lichtblitz zu erzeugen. Dieser wird von mächtigen Lichtverstärkern registriert. Europäische Physiker sind im Untergrundlabor Gran Sasso, das sie tief unter dem gleichnamigen Berg in den italienischen Abruzzen einrichteten, mit von der WIMP-Partie. Sie fahnden mittels eines Detektors aus dem Edelgas Xenon nach den flüchtigen Teilchen. Bei gelegentlichen Kollisionen mit Gasatomen erzeugen

sie schwache Lichtblitze, und weil sie auch Elektronen freisetzen können, entsteht ein messbarer Strom. Die Forscher rechnen mit einem bis zehn Treffern pro Jahr. In der Soudan-Mine in den USA erfolgt die WIMP-Jagd mit ultrakalten Germanium- und Silizium-Kristallen.

Schließlich will die US-Raumfahrtbehörde NASA mit ihrem Satelliten GLAST im All nach den Geisterteilchen suchen. Er führt ein Gammastrahlen-Teleskop mit. Denn WIMPs reagieren zwar nicht mit normaler Materie, untereinander aber schon. Bei Zusammenstößen zerstrahlen sie sich gegenseitig, dabei leuchtet ein kurzer Gammablitz auf. Weil sich die Strahlung vieler solcher Blitze überlagert, sollte es bei der für diese Ereignisse charakteristischen Frequenz einen starken Anstieg der Gammastrahlen im All geben, der dann in den GLAST-Daten zu finden ist.

Trotz dieser Forschungsanstrengungen ist offen, ob es gelingt, der Dunklen Materie ihre Geheimnisse zu entreißen. Möglicherweise besteht sie aus mehreren der genannten Teilchen, etwa Neutrinos und SuSy-Partikeln. Findet sich aber keines davon, bedarf es radikalerer Lösungen. So müssen die Gesetze der Gravitation auf den Prüfstand. Einige Physiker glauben schon heute, dass sich die Gravitation in kosmischen Entfernungen ändert und dass dieser Effekt uns die Existenz der Dunklen Materie nur vorgaukelt.

Eine fantastische neue Idee entwickelten demgegenüber Physiker der Technischen Universität im schwedischen Lulea. Vielleicht, sagen sie, besteht Dunkle Materie aus sogenannten Präonensternen. Präonen sind hypothetische Teilchen, aus denen sich die Quarks zusammensetzen. Diese wiederum bilden Protonen und Neutronen, aus denen die Atome bestehen. Präonen wären damit die fundamentalen Bausteine der normalen Materie (wenn man die Strings ausklammert, die noch um viele Größenordnungen kleiner sein sollten).

Möglicherweise, vermuten die schwedischen Forscher, bildeten sich im Universum unmittelbar nach dem Urknall Klumpen aus Präonen, noch bevor diese Teilchen sich zu Quarks zusammenfinden konnten. Solche Präonensterne würden durch ihre Schwerkraft zusammengehalten und könnten bis heute bestehen. Sie wären das fremdartigste Material im Kosmos. Ihre Materie wäre viel dichter gepackt als in allen anderen Objekten mit hoher Dichte wie den Weißen Zwergen oder den Neutronen Sternen. Entsprechend sind Präonensterne bei gleicher Masse viel kleiner als die genannten Objekte. Neutronen Sterne mit ihrer typischen Masse von 1,4 bis drei Sonnenmassen haben einen Durchmesser von etwa 20 Kilometer, ihre Dichte liegt bei 10¹⁵ Gramm pro Kubikzentimeter. Sterne aus Quarks wären bei gleicher Masse nur halb so groß, ihre Dichte beträgt 10^{17} Gramm pro Kubikzentimeter. Ein Präonenstern misst demgegenüber gerade zehn Zentimeter, also etwa so viel wie ein Tennisball, bei 10²⁷ Gramm pro Kubikzentimeter. Der kleinste stabile Präonenstern müsste die Masse der Erde besitzen. Gäbe es einen mit der Masse eines Asteroiden, wäre dieser gerade so groß wie eine rote Blutzelle.

Niemand weiß, ob es solche exotischen Gebilde gibt. Würden sie aber wirklich existieren, müssten sie in großer Zahl durch das All flitzen und könnten die Dunkle Materie erklären. Jetzt hoffen die Forscher, in den LHC-Daten Hinweise auf die Existenz der Präonen zu finden. Präonensterne wären übrigens auch ein Risiko für die Erde: Flöge einer auf unseren Heimatplaneten zu, könnten wir ihn vor der potenziell desaströsen Kollision nicht entdecken.

Raumfahrt

Können Raumschiffe interstellare Distanzen überbrücken?

Darüber zerbrach sich bereits der italienische Kernphysiker Enrico Fermi den Kopf. Er wurde Mitte des vergangenen Jahrhunderts weltberühmt, denn er setzte im Dezember 1942 in Chicago die erste kontrollierte nukleare Kettenreaktion in Gang und arbeitete später am »Manhattan-Projekt« mit. Unter diesem Decknamen entwickelten US-Wissenschaftler im Los Alamos National Laboratory die Atombombe.

Fermi beschäftigte sich mit einer grundlegenden Frage der Menschheit: »Sind wir die einzige technische Zivilisation im Universum?« Dazu überlegte er Folgendes: Gäbe es in der Milchstraße auch nur eine einzige Rasse, welche die interstellare Raumfahrt beherrscht, dann könnte sie die gesamte Galaxis innerhalb von 20 bis 40 Millionen Jahren durchfliegen und dabei alle bewohnbaren Planeten ansteuern und kolonisieren (dies würde mit Unterlichtgeschwindigkeit geschehen). Folglich sollte es außerirdische Zivilisationen in unserer galaktischen Nachbarschaft in großer Zahl geben. Doch bisher fand sich noch kein Hinweis auf ihre Existenz. Wo sind sie also?

Darauf gibt es mehrere Antworten: Entweder es gibt technische Zivilisationen, die aber nicht weiter entwickelt sind als wir und die Raumfahrt nicht beherrschen. Sie könnten auch Nachbarwelten besiedelt, die Erde jedoch ausgenommen

haben. Oder es gibt sie ganz einfach nicht, und wir sind in der Milchstraße die einzige technische Zivilisation. Dies ging als »Fermi-Paradox« in die Wissenschaftsgeschichte ein. Paradox erscheint der Widerspruch zwischen der begründeten Erwartung, es müsse in unserem Universum viele technologisch fortgeschrittene Zivilisationen geben, und unseren Beobachtungen, die das Gegenteil nahelegen. Dies deutet darauf hin, dass entweder unser Verständnis oder unsere Beobachtungen fehlerhaft oder unvollständig sind.

In jüngerer Zeit knüpften andere Forscher an das Fermi-Paradox an, doch sie kommen zu ganz anderen Schlüssen: Die Außerirdischen, meinen sie, seien durchaus hier, nur würden wir dies nicht erkennen. In einer 2005 veröffentlichten Studie erläutern die US-Physiker James Deardorff, Bernhard Haisch, Bruce Maccabee und Harald Puthoff diesen Gedanken. Ausgangspunkt ist ihre Uberzeugung, dass interstellare Raumfahrt - sogar die überlichtschnelle - entgegen früherer Auffassungen doch möglich ist.

Tatsächlich hielten es die meisten Physiker und Astronomen bislang für unmöglich, dass Raumschiffe die riesigen Abgründe zwischen den Sternen überwinden können. Doch für eine weit fortgeschrittene technische Zivilisation, die uns um Hunderttausende von Jahren voraus ist, argumentiert das Forscherquartett, könnte ein Raumflug auch über viele Hundert Lichtjahre hinweg so einfach zu bewerkstelligen sein wie für uns eine Reise von Frankfurt nach New York.

So könnten die Fremden Wurmlöcher als Tunnel durch Raum und Zeit nutzen und Weltraumreisen damit drastisch abkürzen. Oder sie haben einen »Aleubierre-Antrieb« entwickelt, der den Raum so manipuliert, dass sich ein Raumschiff darin quasi zeitlos fortbewegen kann. In beiden Fällen würde das »kosmische Tempolimit«, das uns die endliche Lichtgeschwindigkeit setzt - sie kann nach Einsteins Relativitäts-

theorie von klassischen Objekten wie Raumschiffen bekanntlich nicht überschritten werden überwunden.

Weiter ist laut Deardorff und Co. eine Reise durch höhere Dimensionen denkbar. Der Stringtheorie zufolge ist unser Kosmos nur einer von vielen, die in einen höherdimensionalen Raum eingebettet sind. Bewohnbare Universen könnten darin nur eine Handbreit entfernt von unserem eigenen liegen. Vielleicht fanden die anderen ja eine Möglichkeit, die Dimensionsbarriere zu durchbrechen? Das aber verstärkt das Paradoxon nur noch, denn dadurch hätten ja viel mehr Zivilisationen die Möglichkeit, die Milchstraße zu kolonisieren und dabei die Erde zu finden. Schließlich legt die große Zahl neu entdeckter Planeten in fernen Sonnensystemen nahe, dass Leben und damit auch Intelligenz häufiger entstehen als zuvor gedacht. Wir sollten also längst außerirdische Besucher gehabt haben. Abermals: Warum sind sie dann nicht hier?

Die Antwort, sagen die vier US-Forscher, liegt in den UFOs. Zwar gestehen auch sie zu, dass die meisten Sichtungen durch optische Täuschungen oder irdische Objekte wie Flugzeuge, Ballons und Scheinwerfer erklärbar sind, oder es handelt sich um Fälschungen. Ein kleiner Rest an Beobachtungen aber bleibt unerklärlich.

Wenn die vielen unidentifizierten Flugobjekte aber tatsächlich Raumschiffe sind, die von Angehörigen einer fremden Zivilisation gesteuert werden - warum geben sich diese bei ihren Besuchen dann nicht zu erkennen? Dafür führen die US-Physiker ein paar ältere Thesen ins Feld. Etwa die »Zoo-Hypothese«: Die Fremden wollen uns studieren, ohne ihre Studienobjekte durch ihre Anwesenheit zu beeinflussen - so, wie wir das manchmal bei Zootieren tun. Sie könnten auch den Kontakt scheuen, weil wir dafür noch nicht reif genug sind oder weil durch eine offene Begegnung mit ET eine welt-

weite Panik ausbrechen könnte, die ganze Regierungen hinwegfegt. Oder durch den Schock bricht gesellschaftliches Chaos aus, das die Weiterentwicklung unserer Zivilisation unterbindet. Deshalb würden sie klugerweise warten, bis unser Wissen und kosmisches Verständnis weit genug gediehen sind, um einen Kontakt zu verkraften. Dann könnten wir die Fremden verstehen und kämen auch mit ihrer technischen Überlegenheit besser zurecht.

Doch wieso lassen sie dann ihre Flugapparate von Zeit zu Zeit durch die Luft zischen und sich dabei auch noch filmen? Das, so das Forscherquartett, diene dazu, uns langsam auf die Enthüllung ihrer Existenz vorzubereiten. Das langsame Lüften des Geheimnisses sei eine Art Erziehungsprogramm. Deshalb lenken die Fremden die Aufmerksamkeit kleiner Gruppen von Menschen auf Phänomene, die natürliche Erklärungen ausschließen. Wenn ein Auto im elektromagnetischen Feld eines UFOs stehen bleibt, wie es einige Betroffene berichteten, lässt sich dies nicht durch einen Partyballon oder die Landescheinwerfer eines Flugzeugs wegerklären. Damit bedeuten die Außerirdischen den Zeugen - und damit der Menschheit -, dass sie um unsere Existenz wissen. Die bewusst gewählte kleine Zahl der Beteiligten schließt aus, dass die Sichtungen die gesamte Gesellschaft beeinflussen. Aus dem gleichen Grund tun oder hinterlassen sie nichts, was eine klare Entdeckung oder Identifizierung der UFOs ermöglichen würde.

Dieses behutsame Vorgehen, vermuten die US-Physiker, lasse auf hohe ethische Standards der Besucher schließen. Vielleicht folgen sie einem »Codex galactica«, der den Kontakt mit neu entdeckten Zivilisationen regelt. Möglicherweise existiert sogar ein Netzwerk unterschiedlicher Zivilisationen quer durch die Milchstraße, deren Späher uns durch ihre nur halbherzig verheimlichten Besuche auf die Aufnahme in den galaktischen Klub vorbereiten sollen.

Es gibt noch eine andere Möglichkeit: Vielleicht sind UFOs auch unbemannte »Von-Neumann-Sonden«. Benannt sind sie nach dem ungarischstämmigen US-Physiker und Computerpionier John von Neumann. Es handelt sich um autarke Maschinen, die exakte Kopien ihrer selbst herstellen können. Mit ihrer Hilfe könnte die Menschheit (oder eben eine andere Intelligenz) die Galaxis erforschen. Anstatt zu jedem entdeckten Sonnensystem eine eigene Sonde zu schicken, startet man lediglich eine Von-Neumann-Sonde zum nächsten System, wo sie mindestens zwei Kopien ihrer selbst anfertigt und diese zu weiteren Sternen schickt. Von dort sendet jede einen Forschungsbericht zurück zur Erde.

Natürlich wird es lange dauern, bis die Signale der Sondenflotte eintreffen, aber mit der Zeit wächst die Menge der zurückgesandten Informationen exponentiell an - und damit auch das Wissen über Zahl und Art besiedelbarer oder gar bewohnter Sonnensysteme in der Milchstraße. Da die Informationsübertragung durch die Lichtgeschwindigkeit begrenzt ist, muss ein solches Projekt jedoch über viele Generationen laufen. Womöglich zischen solche Sonden, ausgesandt von einer fernen Zivilisation, als UFOs durch die Erdatmosphäre und übermitteln ihre Reiseeindrücke zurück an den Absender.

Sind UFOs aber doch bemannte Raumschiffe, ist es ein Glück, dass ihre Insassen gütig und weise sind und keine bösartigen Eroberer. Sonst gäbe es womöglich längst keine Menschen mehr, und über die Erde würden, wie es manche Filme darstellen, Armeen von intelligenten Heuschrecken stapfen. Oder ET würde von der Erde Besitz ergreifen und die Menschheit (oder ihre traurigen Reste) in Reservate stecken - so, wie dies Europäer und andere Eroberer früher bei der Aneignung fremder Gebiete mit deren Einwohnern taten und zum Teil auch heute noch tun. Nicht nur aus diesem Grund ist es noch

ein langer Weg, bis wir zu einem würdigen Mitglied im galaktischen Klub werden.

Diese Interpretation des UFO-Phänomens ist natürlich höchst kontrovers, sie lässt sich zudem durch nichts belegen. Deshalb scheint die einfachste Lösung des Fermi-Paradox doch die richtige zu sein: In der Milchstraße (oder zumindest in unserem Quadranten) gibt es keine fremde Intelligenz, die über eine interstellare Raumfahrt verfügt. Dann ist es womöglich der Menschheit vorbehalten, als erste galaktische Rasse Raumschiffe zu entwickeln, die ferne Sterne erreichen können. Da sich keine Möglichkeit abzeichnet, Überlichtgeschwindigkeit zu erreichen, müssten sie unterhalb des Einstein'schen Tempolimits durch das All zuckeln.

Dies könnte mit Generationenraumschiffen gelingen, auf denen mithilfe entsprechender Lebenserhaltungssysteme Menschen leben und sich fortpflanzen. Nach Reisen von einigen Tausend Jahren Dauer würden sie die jeweiligen Zielsterne und ihre Planeten erreichen. Von dort aus könnte dann die nächste Welle von Raumkreuzern starten. Träfen die Abgesandten der Erde auf einer dieser fernen Welten auf eine fremde Intelligenz, fände zumindest für diese das Fermi-Paradox eine Lösung. ET wüsste dann: Hier sind sie.

Was will der Mensch im All?

Pläne, Astronauten zu Mond und Mars zu entsenden, gibt es neuerdings in vielen Nationen. Die USA, Europa und Russland sind bei dem neuen Aufbruch ins All mit von der Partie, ebenso die Weltraum-Neulinge Japan, Indien und China. Für die kommenden Dekaden verfolgen sie ehrgeizige Programme. Neue Raumfähren und Landegeräte sollen ebenso entwickelt werden wie Technologien zur Montage von Raumfahrzeugen im All. Eine Neuauflage des historischen Wettlaufs zum Mond, den sich die USA und die damalige Sowjetunion während des Kalten Krieges lieferten, zeichnet sich schon heute ab.

Den Startschuss dafür gab die Direktive der US-Regierung an die Raumfahrtbehörde NASA von 2004, die Rückkehr des Menschen zum Mond und eine bemannte Mars-Expedition vorzubereiten. Auf dem Erdtrabanten sollen im Jahr 2018 wieder US-Astronauten landen. In Russland gab der staatliche Raumfahrtkonzern Roskosmos bekannt, das Land wolle ab 2015 eine ständig bemannte Mondstation betreiben. China plant für 2017 einen bemannten Mondflug. Als vierte Raumfahrtnation will Indien in den nächsten Jahren Menschen ins All entsenden. Zunächst in den erdnahen Raum, dann aber ebenfalls zum Mond sowie zum Roten Planeten. Allerdings weiß die Regierung des Landes, dass sie diese Kraftakte nicht allein stemmen kann, deshalb strebt sie internationale Kooperationen an.

Auch Japan hat große Weltraumpläne. Die ersten Astronauten sollen das Banner der aufgehenden Sonne im Jahr 2025 in den

Mondboden rammen. Daneben stehen eigene Trägerraketen, Satelliten und Raumsonden auf dem Programm. In den kommenden zwei Jahrzehnten soll zudem ein bemannter Raumgleiter entwickelt werden, der auch in der Lage sein soll, den Mond zu erreichen. Allerdings ist aufgrund unklarer Finanzierung offen, ob alle Projekte realisiert werden.

Am weitesten gediehen sind die Mondpläne in den USA. Dabei setzt die NASA auf ein Raumtransportsystem, das sie im Rahmen des 2006 auf die Schiene gesetzten »Constellation«-Programms entwickelt. Kernkomponente ist das »Raumschiff Orion« (die Älteren erinnern sich an die längst Kult gewordene gleichnamige Schwarz-Weiß-Serie im deutschen Fernsehen von 1966 mit Dietmar Schönherr in der Hauptrolle).

Die Orion-Transportkapsei bietet vier Astronauten Platz. Konstruiert wird sie von der NASA und dem Technologie-konzern Lockheed Martin. Sie soll die Flotte der alternden Raumfähren ablösen und die Versorgung der Internationalen Raumstation *ISS* übernehmen. Bis 2020 wollen die Amerikaner den Radius ihres Orion-Systems ausdehnen. Dann sollen Astronauten damit zum Mond fliegen, zudem ist es als Transportmittel für die späteren Marsflüge gedacht.

Die US-Ingenieure knüpfen mit der Orion an die früher für Mondflüge genutzten Apollo-Kapsein an. Diese Miniatur-Raumschiffe, die drei Besatzungsmitglieder befördern konnten, wurden mit der gewaltigen Saturn-V-Rakete auf den Weg zum Erdtrabanten gebracht. Beim Constellation-System kommen indes zwei Raketen zum Einsatz: die Ares I sowie die Ares V, letztere wird mit 110 Metern fast ebenso hoch sein wie die Saturn V.

Für künftige Mondmissionen wird zuerst eine Ares-V-Rakete starten. Sie trägt das Landegerät ins All, das eine eigene Antriebsrakete besitzt. Sobald das Vehikel seinen Orbit in 300 Kilometern Höhe erreicht hat, hievt eine Ares I eine Orion-Kapsel mit vier Astronauten an Bord in die gleiche Umlaufbahn, wo sie an das Landegerät ankoppelt. Dann wird dessen Antriebsrakete gezündet. Sie schiebt das Gefährt aus dem Schwerefeld der Erde auf die Flugbahn zum Mond. Nach Brennschluss wird sie abgeworfen, Landegerät und Orionkapsel fliegen selbstständig zu dem bleichen Himmelsgesellen weiter. Dort angekommen, steigen die Astronauten in das Landegerät um, mit dem sie zur Oberfläche des Trabanten hinabsinken. Die Kapsel bleibt unbemannt in einer Mondumlaufbahn zurück.

Nach Beendigung der Mission fliegt eine Aufstiegsstufe mit den Mondfliegern an Bord zurück zur Orion, an die sie ankoppelt. Die untere Stufe des Landegeräts bleibt auf dem Mond zurück, und auch die Aufstiegsstufe wird nach dem Umsteigen der Astronauten in ihr Raumschiff Orion abgeworfen und stürzt auf die Mondoberfläche. Die Mannschaftskapsel fliegt mit einem eigenen Triebwerk zur Erde, wo sie mittels Fallschirmen auf festem Boden landen soll.

Ab 2018 will die NASA zwei bemannte Kapseln pro Jahr zum Erdtrabanten entsenden. Beabsichtigt ist auch der Bau einer Station an einem seiner Pole. Sie soll ab 2024 als Basis für eine bemannte Marsmission dienen. Zum Roten Planeten wollen auch die Konkurrenten der Amerikaner vorstoßen. So sieht Russlands Raumfahrtprogramm bis 2015 eine unbemannte Mission zum Marsmond Phobos vor. Unter dem Namen »Phobos-Grünt« (russisch »grünt« ~ Boden) soll eine Sonde auf dem kleinen Trabanten landen und Bodenproben in einer Rückkehrkapsel zur Erde schaffen. Im Jahr 2009 soll die Mission mit einer Fregat-Rakete starten. Bemannte Marsflüge könnten laut Roskosmos sogar schon 2017/2018 beginnen. Experten glauben aber nicht an einen so frühen Aufbruch. Technische und Finanzierungsprobleme machen einen deut-

lieh späteren Start des anspruchsvollen Unternehmens wahrscheinlich.

In Indien bot 2004 der damalige Präsident Abdul Kalam den USA an, bis 2050 eine indisch-amerikanische Raumschiffbesatzung zum Mars zu entsenden. Aus China sind bislang keine entsprechenden Pläne bekannt. Dafür plant das Reich der Mitte angeblich, ab dem Jahr 2010 eine eigene Raumstation zu bauen.

Wo aber bleibt Europa? Zwar verkündete Jean-Jacques Dordain, Direktor der europäischen Raumfahrtagentur ESA, im Januar 2007, Beiträge zur Erkundung des Mars durch unbemannte Robot-Sonden sollten Priorität erhalten. Doch langfristig denkt auch die ESA an bemannte Expeditionen. So könnten 2024 im Rahmen des »Aurora-Programms« zur Erforschung des Sonnensystems europäische Astronauten zum Erdtrabanten aufbrechen. Ein Flug zum Roten Planeten unter dem Sternenkranz der EU könnte dann 2033 folgen, nachdem unbemannte Raumschiffe Bauelemente für eine Unterkunft der Pioniere auf dem Marsboden abgesetzt haben. Zudem legte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) der Bundesregierung ein Konzept für eine unbemannte deutsche Mondsonde vor.

Unvermeidlich lösten diese Pläne in den beteiligten Ländern Diskussionen über den Sinn der extrem teuren und aufwendigen bemannten Raumfahrt aus. Neben dem Erkenntnisstreben als spezifischer Eigenschaft des *Homo sapiens* erscheint vor allem ein Argument schlüssig, Menschen ins All zu entsenden: Die Knappheit vieler Rohstoffe könnte uns schon bald zwingen, neue Quellen dafür zu erschließen. Das am nächsten gelegene außerirdische Rohstoffreservoir ist der Mond. Entsprechend begründet Russland seine Pläne, um 2020 mit dem Bau einer Mondstation zu beginnen, unter anderem mit der Vorbereitung eines industriellen Abbaues

von Helium-3. Diese Form des Edelgases eignet sich zum Einsatz in künftigen Fusionsreaktoren, kommt aber auf der Erde so gut wie gar nicht vor. Es gibt aber auch Ideen, metallreiche Asteroiden anzuzapfen, um seltene Elemente zu gewinnen. Derart komplexe Aufgaben werden Roboter in absehbarer Zeit nicht wahrnehmen können, dazu sind nur Menschen in der Lage.

Doch insbesondere die Planetenforscher wehren sich gegen die neue Priorität für die bemannte Raumfahrt, weil diese, wie sie fürchten, zu viele Mittel von anderen wichtigen Missionen abziehen könnte. In einem Memorandum definiert der Nationale Forschungsrat der USA deshalb fünf wichtige Ziele für die unbemannte Raumfahrt.

An erster Stelle steht dort die Erderkundung. Aus gutem Grund: Ab dem Jahr 2002 schichtete die NASA 600 Millionen Dollar von geowissenschaftlichen Programmen zur *ISS* und zur Raumfährenflotte um. Deshalb blieb kaum mehr Geld, um Ersatz für die zwei Dutzend Satelliten des US-Erdbeobachtungssystems zu schaffen, die sich dem Ende ihrer technischen Lebensdauer nähern. Dabei, argumentieren die Planetenkundler im Verein mit Klimatologen, seien weltweite Messdaten, die Auskunft über die globale Erwärmung, die Ausdehnung der polaren Eisbedeckung, über Veränderungen in den Ozeanen sowie bei der Vegetationsdecke der Erde geben, unverzichtbar.

Die Abwehr gefährlicher Asteroiden, die bei einem Einschlag schlimmstenfalls die Menschheit auslöschen könnten, ist eine weitere Aufgabe für künftige Robot-Missionen. Zu diesem Zweck plant die NASA, ein 500 Millionen US-Dollar teures Infrarot-Weltraumteleskop zu bauen, das erdnahe Asteroiden ausfindig machen und helfen soll, ihre Bahnen und Massen zu bestimmen. Weitere Sonden, wie die Doppelmission »Don Quijote« der ESA, sollen dann herausfinden, wie sich solche

Boliden ablenken lassen, sobald sie auf Kollisionskurs mit der Erde geraten.

Leben auf anderen Himmelskörpern im Sonnensystem aufzuspüren gilt als weiteres, besonders lohnendes Ziel der Raumfahrt. Auf dem Mars, aber auch auf den Monden Europa und Titan, die um die Riesenplaneten Jupiter respektive Saturn kreisen, könnte es möglicherweise Mikroben geben, die den unwirtlichen Bedingungen auf diesen Himmelskörpern trotzen. Während die Einzeller auf dem Roten Planeten und auf Titan in Oberflächennähe existieren könnten, vermuten Exobiologen, dass sie auf Europa in einem Ozean aus flüssigem Wasser leben, der unter einem dicken Eispanzer liegt.

Zunächst müssten Sonden durch magnetische und Radarmessungen feststellen, ob es dieses mondumspannende Meer wirklich gibt. Dann könnten sich spezielle Roboter durch das kilometerdicke Eis bohren, um die exotischen Lebensformen ausfindig zu machen. Auf Titan könnte ein Heißluftballon durch die dichte Atmosphäre fliegen und in regelmäßigen Abständen landen. Am Boden soll er jeweils mit bordeigenen Analysegeräten nach Lebensspuren suchen.

Auf der Agenda der Planetenforscher findet sich als weiteres Ziel die Erforschung der Entstehung des Sonnensystems samt der Planeten. In fernerer Zukunft sollen Raumsonden überdies Technologien erproben, die über die Grenzen unseres Sonnensystems hinausführen könnten. Was von diesen Ideen in die Tat umgesetzt wird, ist indes völlig unklar. Schon die jeweils nächste Regierung in den Raumfahrtnationen könnte die Prioritäten in den Weltraumprogrammen schon wieder völlig anders setzen.

Sind fremde Planeten für Menschen dauerhaft bewohnbar?

Angesichts der drohenden Klimakatastrophe, der noch immer nicht gebannten Gefahr eines Atomkriegs und anderer Fährnisse könnte es für Menschen schon sinnvoll erscheinen, auf einen anderen Planeten auszuwandern. Die Frage ist nur: auf welchen? Da wir die interstellare Raumfahrt nicht beherrschen und draußen in der Galaxis auch noch keine bewohnbare Welt entdeckt haben, kommen nur unsere Planetennachbarn im Sonnensystem infrage. Doch hier sieht es düster aus. Auf der Venus herrschen Höllentemperaturen sowie eine giftige, durch ihre hohe Dichte erdrückende Atmosphäre. Der Mars dagegen ist zu kalt, seine Lufthülle ist sehr dünn und für Menschen nicht atembar. Weiter außen gelegene Himmelskörper sind noch kälter, weiter weg und aus vielen anderen Gründen ungeeignet.

Dennoch überlegten nicht nur Science-Fiction-Autoren, sondern auch seriöse Wissenschaftler schon früh, ob es nicht gelingen könne, eine unserer Nachbarwelten bewohnbar zu machen, also nach dem Vorbild der Erde zu gestalten. »Terraforming« nannten sie diesen Prozess, und der einzige Planet, der dafür in Betracht kommt, ist der Mars. Ende 1997 veranstaltete die US-Weltraumbehörde NASA eigens eine Terraforming-Konferenz. Dabei kamen die teilnehmenden Forscher zu dem Schluss, dass es tatsächlich gelingen könnte, den kalten, trockenen Wüstenplaneten in eine etwas gefälligere Welt zu verwandeln.

Es wäre jedoch eine herkulische Aufgabe. Zunächst müssten die irdischen Migranten die Oberflächentemperatur im Durchschnitt um etwa 60 Grad erhöhen, um flüssiges Wasser zu erhalten. Die Voraussetzungen dafür sind erfüllt, denn Satellitendaten zeigen, dass der Rote Planet große Wasservorräte besitzt. Weiter gilt es, eine atembare Atmosphäre mit genügend Sauerstoff zu erzeugen. Damit diese nicht durch die geringe Schwerkraft ins All entweicht, müsste zugleich die Masse des Planeten erhöht werden. Sodann fehlt noch die Ozonschicht, die das Leben auf der Erde vor der UV-Strahlung der Sonne schützt. Ist erst einmal freier Sauerstoff vorhanden, baut sie sich zum Glück von selbst auf.

Um diese Aufgaben zu vollbringen, müssten die Pioniere in großer Zahl zum Roten Planeten fliegen, Siedlungen errichten und Tausende von Fabriken aufbauen. Diese hätten zunächst nur den Zweck, Treibhausgase in riesigen Mengen zu erzeugen und in die Luft zu blasen, um die Temperatur zu erhöhen und den Luftdruck zu steigern. Dafür kommen mehrere Substanzen in Betracht: in erster Linie Kohlendioxid (C0₂), das natürlicher Hauptbestandteil der Mars-Atmosphäre ist, aber auch Methan und Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe. Erreicht der Luftdruck etwa ein Drittel des irdischen Werts (was dem Druck auf den Gipfeln der irdischen Achttausender entspricht), entfällt für die Siedler die Notwendigkeit, einen Druckanzug zu tragen.

Bei steigender Temperatur verdampft auch Wasser. Als potentes Treibhausgas beschleunigt der entstehende Wasserdampf den Erwärmungsprozess. Schließlich schmelzen die hauptsächlich aus Wassereis bestehenden Polkappen. Nun können sich Gewässer bilden. Überdies ließen sich gewaltige Reflektoren im Mars-Orbit positionieren, die Sonnenlicht zur Planetenoberfläche reflektieren und so die Erwärmung verstärken. Eine Brachialmethode zur Beschleunigung des Planeten-

umbaus wäre, Kometen oder Asteroiden im All so abzulenken, dass sie auf den Mars stürzen. Sie würden Wasser und Treibhausgase liefern und zugleich die Planetenmasse erhöhen. Die US-Planetenforscher Christopher McKay und Robert Zubrin entwarfen vor einiger Zeit ein diesbezügliches Szenario. Nach ihren Berechnungen müsste ein Asteroid von einigen Kilometern Durchmesser mit einem nuklearen Raketenantrieb zum Roten Planeten gelenkt werden. Bei seinem Einschlag würde die Energie von 70 000 Wasserstoffbomben freigesetzt, was die Oberflächentemperatur des Planeten um drei Grad erhöht. Zugleich würde etwa eine Billion Tonnen Wasser schmelzen, das einen See von der Größe der Schweiz füllen könnte. Um eine Atmosphäre mit ausreichendem Luftdruck zu schaffen, müssten jedoch eine Million Kometen mit einem Durchmesser von einem Kilometer auf den Mars stürzen.

Nun wäre es an der Zeit, Sauerstoff zu produzieren. Das könnten Maschinen übernehmen, die den Prozess der Fotosynthese imitieren. Gleichzeitig müsste der Anbau von Pflanzen beginnen, zunächst mit einfachen Arten wie Algen und Flechten. Auch Bakterien, die unter niedrigem Druck, mit wenig Sonnenlicht und ohne Sauerstoff existieren können, sollten nun angesiedelt werden. Höhere Pflanzen könnten später folgen.

Am Ende dieses Prozesses wäre der Rote Planet wärmer, feuchter, grün und von einer dichten Atmosphäre umgeben. Diesen Zustand hatte es vor 3,5 bis 4 Milliarden Jahren vermutlich schon einmal gegeben. Über die für das Terraforming benötigten Zeiträume gehen die Meinungen der Forscher jedoch weit auseinander. Eine Modellrechnung erbrachte folgendes Resultat: Die rein chemische Initialphase mit der Freisetzung von Treibhausgasen könnte in einigen Hundert Jahren abgeschlossen sein. Dann wären die Voraussetzungen für Pflanzenwachstum gegeben, und Menschen könnten sich

mit Sauerstoffmaske im Freien aufhalten. Doch die anschließende Phase des biologischen Umbaus dauert ungleich länger. Weil Pflanzen die eingestrahlte Energie nur recht ineffizient nutzen, könnte es mehr als 100 000 Jahre dauern, bis eine Sauerstoffatmosphäre entstanden ist.

Könnte eine solche Utopie jemals Realität werden? Aus heutiger Perspektive wohl kaum. Es müssten titanische Stoffmengen umgesetzt werden. Außerdem dürfte noch für lange Zeit die Raumfahrttechnologie fehlen, die Transporte zum Mars ermöglicht. Viele Experten führen zudem ethische und ökologische Gründe gegen ein solches Mammutprojekt ins Feld, da ein planetenweites Ökosystem umgestaltet oder gar zerstört wird.

Dessen ungeachtet spinnen wissenschaftliche Utopisten den Gedanken weiter. Dabei nehmen sie unseren sonnennäheren Nachbarn Venus ins Visier. Dort ist der Akt, den Höllenplaneten in eine laue, grüne Welt zu verwandeln, ungleich schwieriger. Die Oberflächentemperatur der Venus liegt bei 485 Grad Celsius, der Luftdruck ist über 90-mal höher als auf der Erde, die Wolken bestehen zum Teil aus Schwefelsäure, die Atmosphäre zu 95 Prozent aus CO₂. Kein irdisches Lebewesen könnte in dieser extremen Umgebung existieren. Um den Morgen- und Abendstern bewohnbar zu machen, müsste die Temperatur stark gesenkt und das CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden. Gelänge dies, würde das heiße Gestein am Boden noch für viele Jahrhunderte nachglühen.

Beginnen könnten die Planetenumformer mit dem Einbringen von Grünalgen in die Hochatmosphäre der Venus. Dort erzeugen sie Sauerstoff aus CO₂, was zugleich den Treibhauseffekt senkt. Das dafür benötigte Wasser müsste aus der Zersetzung von Schwefelsäure oder von eingefangenen Kometen stammen. Später könnten schwebende Pflanzen folgen, die eine Art Luftplankton bilden. Die technischen Operationen

könnten die Planetenkonstrukteure von luftschiffähnlichen Schwebeplattformen aus durchführen, womöglich gelingt auch die Zucht schwebender ballonähnlicher Pflanzen als Nahrungsmittel.

Fernziel bleibt indes die Besiedlung unserer Milchstraße. Der italienische Kernphysiker Enrico Fermi rechnete 1950 vor, wie das gelingen könnte. Lichtschnelle oder gar überlichtschnelle Raumfahrt schloss er aus. Stattdessen sollen Generationenraumschiffe, in denen Menschengruppen leben und sich fortpflanzen können, mit dem gemächlichen Tempo von einem Prozent der Lichtgeschwindigkeit die Milchstraße durchqueren. Statistisch gesehen könnten sie alle zehn Lichtjahre einen besiedelbaren Planeten finden. Dort verweilen die Siedler und ihre Nachkommen 500 Jahre, bevor sie zur nächsten Etappe aufbrechen. Mit dieser Methode könnte die Menschheit unseren heimatlichen Spiralnebel in 15 Millionen Jahren komplett kolonisieren. Für einzelne Menschen ist dieser Zeitraum gigantisch. Nicht aber für die Evolution und das Universum. Eine Zivilisation, die beim Aussterben der Saurier unseren heutigen technologischen Stand aufwies, hätte inzwischen die Milchstraße komplett besiedelt.

Wie die ISS Einschläge kosmischer Geschosse übersteht

Im All lebt es sich gefährlich. Raumfahrzeuge wie die *Space Shuttles* der US-Raumfahrtbehörde NASA oder die Internationale Raumstation *ISS* sind permanent von kosmischen Geschossen bedroht. Das können Mikrometeoriten sein oder eher noch Trümmerteile - sogenannter Weltraummüll die von irdischen Objekten stammen.

Seit dem Start von Sputnik 1 am 4. Oktober 1957, dem Beginn des Raumfahrtzeitalters, gelangten weit über 5500 Raumflugkörper ins All. Annähernd 700 funktionieren noch. Der Rest verwandelte sich nach Ende der technischen Lebensdauer oder durch Pannen in Schrott. Diese großen Objekte sind jedoch nicht das Problem. Ihre Umlaufbahnen sind bekannt, und sie lassen sich überwachen.

Gefährlich ist vielmehr die riesige Trümmerwolke, die unsere Erde bis in etwa 2000 Kilometern Höhe umgibt. Darin kreisen über 14 000 Objekte ab etwa Tischtennisballgröße. Hinzu kommen 600 000 Teile zwischen einem und zehn Zentimetern Durchmesser. Die Anzahl der Trümmer, die weniger als einen Zentimeter messen, beziffert die NASA mit über zehn Millionen. Mit einer Flughöhe zwischen 320 und 410 Kilometern pflügt die *ISS* mitten durch diese Wolke hindurch.

Die Bahnen der größeren Teilchen sind mehrheitlich bekannt. Sie werden mit Teleskopen oder speziellen Radaranlagen routinemäßig überwacht. Das Radar des *U.S. Space Surveillance Network* etwa kann Partikel bis hinab zur Größe von drei Millimetern erfassen. Die Zahl der kleineren Teilchen,

die nicht beobachtbar sind, wird von den Experten der NASA und der europäischen Raumfahrtagentur ESA hochgerechnet.

Grundlage der Extrapolation sind beobachtete Einschläge von Trümmern in Bauteile von Raumfahrzeugen, die zur Erde zurückgeholt werden. Dazu zählt ein ausgewechseltes Sonnensegel des Hubble-Weltraumteleskops, das Astronauten nach einer Reparaturmission im März 2002 mit zurückbrachten. Insgesamt fanden sich auf 41 Quadratmetern Fläche 174 komplette »Durchschüsse«. Der größte Einschlagskrater maß acht Millimeter. Mittels einer chemischen Analyse konnten NASA-Forscher sogar zwischen Treffern von natürlichen Mikrometeoriten und künstlichen Objekten unterscheiden. Aus den Daten ermitteln Computerprogramme wie »Master-2005« der ESA die Dichte und Verteilung der Schrottteilchen im erdnahen Raum.

Quellen für den Weltraumschrott gibt es viele. So erzeugen Explosionen von Satelliten oder Raketen-Oberstufen haufenweise kleine Trümmer. Manche Raumfahrzeuge werden absichtlich gesprengt, bei anderen detoniert unbeabsichtigt an Bord verbliebener Resttreibstoff. Den Zündfunken können Entladungen von Batterien der Satelliten liefern. Fachleute vermuten, dass es seit Beginn der Raumfahrt etwa 200 Explosionen im Orbit gab. Weiter emittieren Feststofftriebwerke beim Abbrennen mikrometergroße Partikel aus Aluminiumoxid. Radioaktiven Weltraumschrott hinterließen 16 sowjetische Spionage Satelliten vom Typ RORSAT. Sie hatten zur Energieversorgung kleine Atomreaktoren an Bord. Nach Ende ihrer Mission sprengten die Sowjet-Militärs die Reaktorkerne ab, wobei das Kühlmittel - eine Natrium-Verbindung - freigesetzt wurde und große Tropfen bildete. Von manchen Satelliten platzt Farbe ab, manchmal auch andere, größere Teile.

Aus Kollisionen von Raumfahrzeugen resultieren ebenfalls Bruchstücke. So prallte vor einigen Jahren ein Fragment der explodierten Oberstufe einer *Ariane*-Rakete auf einen Mast des französischen Aufklärungssatelliten *Cerise*. Durch solche Karambolagen vermehrt sich der Müll ab einer gewissen Menge fortlaufend selbst. Unklar ist, welche Schrottmengen von Killersatelliten stammen, die während des Kalten Krieges (und vielleicht auch noch heute) gegnerische Spionagesatelliten »neutralisierten«, sie also einfach rammten. Derlei Aktionen unterliegen strengster Geheimhaltung.

Ganz offen agierten US-Militärs jedoch, als sie im Februar 2008 einen eigenen Spionage Satelliten abschössen. Er war außer Kontrolle geraten und drohte zur Erde zu stürzen. Da seine Tanks noch mit dem giftigen Treibstoff Hydrazin gefüllt waren, sollte der Abschuss zumindest nach offizieller Lesart verhindern, dass Menschen am Boden zu Schaden kommen. Beim Einschlag der Abfangrakete zerbarst der in etwa 240 Kilometer Höhe über dem Nordpazifik getroffene Himmelsspion von der Größe eines Schulbusses in zahlreiche kleine Teile. »Kein Stück ist größer als ein Football«, versicherte das Pentagon. Viele davon traten rasch in die Erdatmosphäre ein, doch eine unbekannte Anzahl verblieb im All und vergrößerte die ohnehin schon beträchtliche Weltraumschrott-Wolke.

Auch von bemannten Missionen gibt es Hinterlassenschaften, etwa Sprengbolzen und Abdeckungen. Überdies entglitt unachtsamen Astronauten Werkzeug. So rasen bis heute ein Arbeitshandschuh und ein Schraubenzieher mit hohem Tempo um die Erde.

Die NASA benannte 2007 als bislang schlimmstes Trümmerjahr: Nach ihren Angaben gab es im Jahresverlauf insgesamt zehn »Fragmentierungen« von Raumflugkörpern. So zerbrach eine russische Rakete, die einen Nachrichtensatelliten

aussetzen sollte, in einer Explosion. Und China testete als All-Macht-Demonstration eine Weltraumwaffe: Mit einer Rakete zerstörten die Militärs der Volksrepublik in 600 Kilometern Höhe einen ausgedienten Wettersatelliten.

Im Mittel fliegen die Schrottteilchen mit etwa 28 000 Kilometern pro Stunde, im Extremfall können es aber auch bis 36 000 Stundenkilometer sein. Bei diesem Tempo hat ein nur einen Zentimeter großes Objekt so viel kinetische Energie wie eine detonierende Handgranate. Trifft ein solches Geschoss ein Raumfahrzeug, kann es dieses völlig zerstören. Die Wahrscheinlichkeit für eine solche Kollision liegt für große Objekte wie die *ISS* oder die NASA-Raumfähren bei 1 zu 10 000. Einschläge kleinerer Partikel von nur wenigen Mikrometern Größe können Nutzlasten beschädigen, elektrische Entladungen auslösen oder das Leben von Astronauten bei Außenbordeinsätzen gefährden.

Dass die Bedrohung real ist, zeigen Treffer auf der 2001 aufgegebenen russischen Raumstation *Mir*. Später beschädigte der Einschlag eines 0,3 Millimeter großen Farbpartikels, der 14 400 Kilometer pro Stunde schnell flog, das Fenster eines *Space Shuttle*. Dass größere Unfälle bislang ausblieben, ist neben viel Glück auch dem Umstand zu danken, dass *ISS*, Raumfähren und größere Satelliten heranrasenden größeren Teilchen mittels ihrer Bordtriebwerke ausweichen können. Im Jahr 2004 musste der ErdbeobachtungsSatellit *Envisat* zwei solcher Manöver ausführen, die NASA-Raumfähren insgesamt sechs.

Die Raumstation fliegt im Durchschnitt pro Jahr mindestens ein Ausweichmanöver. Im Juni 2006 - kurz bevor der deutsche Astronaut Thomas Reiter als neues Besatzungsmitglied an Bord kam - raste ein 79 Kilogramm schweres Stück US-Weltraumschrott aus den 60er-Jahren auf die *ISS* zu und passierte sie in einigen hundert Metern Distanz. Ein Jahr später pas-

sierte es dann: Ein Mini-Meteorit traf die Station und schlug ein Loch von der Größe einer Revolverkugel in eines ihrer Module. Die Astronauten an Bord gerieten dadurch jedoch nicht in Gefahr.

Um das Risiko zu minimieren, erhielten die bemannten ISS-Module doppelwandige Meteoritenschutzschilde aus Keramik- und Polymer Stoffen. Sie können Einschlägen von bis zu einem Zentimeter großen Trümmern widerstehen. Ein Teilchen kann die erste Schicht zwar durchschlagen, doch beim Aufprall verliert es den größten Teil seiner kinetischen Energie und wird zu kleineren Partikeln pulverisiert. Diese bleiben in der zweiten Schutzschicht hängen. Besonders gut geschützt ist das europäische Raumlabor Columbus, das im Februar 2008 an die ISS angedockt wurde. Durch die exponierte Position an der Vorderseite der Station ist für Columbus das Risiko besonders groß, von Schrottteilchen durchlöchert zu werden. Spezielle Kacheln auf der Außenhaut sowie eine darunterliegende Schicht aus dem Spezialkunststoff Kevlar sollen das Modul schützen. Beschädigte Kacheln können ausgetauscht werden.

Gegen Treffer größerer Trümmer sind die Schutzschilde indes machtlos und auch bei bestimmten Arten von Pannen nutzen sie nichts. So fielen im Juni 2007 gleich drei wichtige Computer an Bord der *ISS* gleichzeitig aus. Sie steuern auch die Düsen, mit denen die Raumstation Weltraumschrott ausweicht oder in die richtige Position für ankommende Raumtransporter gebracht wird. Wäre in dieser Situation ein Teilchen auf Kollisionskurs gewesen, hätte es unvermeidlich einen Zusammenprall gegeben. Im schlimmsten Fall müsste der Außenposten der Menschheit im All dann evakuiert und aufgegeben werden.

Im April 2005 berieten Experten bei einer Konferenz im europäischen Weltraumkontrollzentrum ESOC in Darm-

Stadt - es übernimmt für die ESA die Bahnverfolgung der Trümmer - über Maßnahmen, die helfen können, Katastrophen im All zu vermeiden. Künftig, so forderten sie, müssten Raketentriebwerke vollständig ausbrennen, um Explosionen durch Treibstoffreste zu verhindern. Außerdem sollen Verfahren entwickelt werden, die bewirken, dass Weltraumschrott schneller in der Erdatmosphäre verglüht und nicht mehr jahrzehnte- bis jahrhundertelang in einer Umlaufbahn bleibt. Zudem sollen nicht mehr benötigte Satelliten obligatorisch auf sogenannte Friedhofsbahnen angehoben werden, wo sie lange Zeit verweilen können, ohne andere Raumfahrzeuge zu gefährden.

NASA und ESA stehen derartigen Projekten wohlwollend gegenüber. Aufstrebende Raumfahrtnationen wie China müssen aber erst noch von deren Nutzen überzeugt werden. Ihnen gilt die Vermeidung von Weltraumschrott zunächst nur als Kostenfaktor. Die »Selbstreinigungskräfte« des erdnahen Alls dürften also noch eine Weile überfordert sein: Es entsteht pro Jahr immer noch mehr Weltraumschrott, als in der Erdatmosphäre verglüht. Die Astronauten auf der *ISS* müssen somit weiterhin mit dem Risiko leben, durch ein rasendes Trümmerstück den Raumfahrertod zu sterben.

Außerirdische Zivilisationen

Können wir je erfahren, ob es Außerirdische gibt?

Weit voraus. Schon vor 400 Jahren glaubte er, das Universum sei unendlich und als Ganzes belebt. »Es ist töricht und gemein zu glauben, es gäbe keine anderen Lebewesen, keine anderen Intelligenzen, als sie unseren Sinnesorganen erscheinen«, verkündet er in seiner Schrift »De immenso« (» Vom Unermesslichen«). Die Himmelskörper galten ihm als Organismen mit kosmischem Bewusstsein, die ihrerseits Leben tragen. Diese Erkenntnis öffentlich zu äußern erwies sich indes als voreilig, denn sie richtete sich gegen die Lehrmeinung der katholischen Kirche von der Einzigartigkeit des Menschen als Ebenbild Gottes. Seinen Mut bezahlte Bruno mit dem Leben. Er wurde wegen Ketzerei zum Tod auf dem Scheiterhaufen verurteilt und im Februar 1600 verbrannt. Erst im Jahr 2000 erklärten der päpstliche Kulturrat und eine theologische Kommission die Hinrichtung Giordano Brunos für Unrecht. Seine Thesen tragen aber späte Früchte. Heute glauben die meisten Astronomen, dass es außerhalb der Erde Intelligenzwesen gibt. Bislang wurden rund 300 Planeten in fremden Sonnensystemen entdeckt. Zwar sind die meisten davon unbewohnbare Gasriesen. Das liegt jedoch an den verfügbaren Suchtechniken: Sie sind noch nicht empfindlich genug, um erdähnliche Trabanten aufzuspüren. Es ist aber nur eine Frage der Zeit, bis dies gelingt.

er italienische Philosoph Giordano Bruno war seiner Zeit

Die Frage nach den Außerirdischen ist grundlegend für die Menschheit. Damit verbinden sich tiefe philosophische und theologische Gedanken. Ist unsere Existenz ein unglaublicher Zufall? Kann Leben nach den Regeln der Naturgesetze entstehen? Oder ist es nicht doch ein Gott, der dem Staub einer oder vieler Welten den Lebensodem einhauchte? Sind wir einzigartig im All? Viele Menschen wünschen sich die Existenz Außerirdischer, um die kosmische Einsamkeit zu überwinden, die wir bis jetzt erfahren haben.

Bislang kann es nur theoretische Antworten auf diese Fragen geben, und sie erscheinen zunächst durchaus ermutigend. Viele Astrobiologen glauben, dass die stetige Höherentwicklung von Arten, wie sie auf der Erde stattfand, gewissermaßen naturgesetzlich erfolgen könnte. Dann müsste es auf Welten, auf denen eine biologische Evolution über primitive Einzeller hinausführte, früher oder später auch intelligente Geschöpfe geben. Angesichts der unzähligen Planetensysteme sollte es also in unserer Milchstraße von Leben nur so wimmeln. Auf vielen Welten sollte es dann auch Zivilisationen geben, die sich der gleichen technischen Mittel bedienen wie wir.

Als Erster machte sich der US-Astronom Frank Drake daran, unsere Nachbarn im All zu finden. Schon vor über 40 Jahren suchte er den Himmel mit einem Radioteleskop nach Signalen der Außerirdischen ab - es war der Beginn des mittlerweile weltbekannten Projekts SETI (Suche nach extraterrestrischer Intelligenz). Die daran beteiligten Forscher arbeiten heute im SETI-Institut im kalifornischen Ort Mountain View. Ihr bisher größtes Suchprogramm war das Projekt Phönix, das 2004 endete. In dessen Verlauf horchten sie den Himmel mit einigen der größten Radioteleskope der Welt nach Funksignalen der Extraterrestrier ab. Darunter war auch das 300-Meter-Teleskop von Arecibo auf Puerto Rico.

Im Oktober 2007 fiel der Startschuss für ein neues Suchprogramm. In Nordkalifornien gingen die ersten 42 Schüsseln des »Allen Telescope Array« (ATA) in Betrieb, benannt nach dem Softwaremogul und Mitbegründer des Microsoft-Konzerns Paul Allen. Bis 2010 soll es 350 der kleinen Radioteleskope (Schüsseldurchmesser: 6,1 Meter) geben, die dann im Verbund den Himmel abhorchen. Dabei durchforsten sie pro Sekunde 100 Millionen Funkkanäle; Signale können sie noch aus 1000 Lichtjahren Entfernung empfangen. Mit dem ATA wollen die SETI-Mitarbeiter in den nächsten 24 Jahren mehr als eine Million Sterne anpeilen, gegenüber 750 beim Projekt Phönix. Andere Astronomen suchen den Himmel im Spektralbereich des infraroten und sichtbaren Lichts ab - schließlich könnte ET auch mittels mächtiger Laser funken.

Doch ob sich ET mit den heutigen Empfangstechniken aufspüren lässt, ist offen. Selbst mit den fortschrittlichsten Antennen können wir Radio Signale aus höchstens einigen Dutzend Lichtjahren Entfernung empfangen. Ist der Sender weiter entfernt, werden sie so schwach, dass sie im natürlichen Hintergrundrauschen untergehen. Die 1000 Lichtjahre Distanz des ATA gelten nur für den speziellen Fall, dass ET eine Botschaft gezielt mit einer Sendeantenne von der Größe des Arecibo-Radioteleskops ins All schickt. Zudem müssten die irdischen Empfänger in die richtige Richtung blicken. Dies wäre jedoch ein gewaltiger Zufall.

Wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, ET auf diese Weise zu entdecken, berechnete der Informatiker Marko Horvat von der Universität Zagreb. Gäbe es in Radioreichweite der Erde zehn Zivilisationen, von denen jede 250 000 Jahre Bestand hat, so liegt die Chance, eine davon zu finden, bei neun Prozent. Das klingt gut, gilt aber nur, wenn ein perfekt ausgeklügeltes Teleskopsystem den gesamten Himmel rund um die Uhr beobachtet. Davon sind wir aber noch weit entfernt.

Die Frage ist außerdem, wie lange solche Zivilisationen überhaupt mittels elektromagnetischer Wellen kommunizieren. Auf der Erde gab es die erste Funkverbindung vor etwas über 100 Jahren. Doch schon heute gibt es die Tendenz, Telekommunikation und Datenverkehr über schnelle Glasfaserkabel abzuwickeln. Entsprechend reduzieren sich die ins All abgestrahlten elektromagnetischen Wellen. Wäre dies auch bei anderen Zivilisationen so, ginge die Chance, sie aufzuspüren, gegen null.

Die Kommunikation per Funk ist indes nur eine von mehreren Größen, welche die Wahrscheinlichkeit bestimmen, mit der wir ET finden können. SETI-Gründer Drake fasste sie 1961 in einer mittlerweile berühmten Gleichung zusammen. Diese enthält sieben Faktoren, von der Zahl der Sterne in der Galaxis, der Zahl der Planeten, die in der »Lebenszone« ihrer Sonne liegen, und derjenigen aus dieser Zahl wiederum, die tatsächlich Leben hervorbringen, bis zur mittleren Dauer der Existenz einer fremden Rasse. Damit wollte Drake die Zahl bewohnter Planeten in der Milchstraße abschätzen. Seinen Berechnungen zufolge könnte es darin bis zu 10 000 Zivilisationen geben, die zu interstellarer Kommunikation fähig sind. Später übertrug der inzwischen verstorbene US Astronom Carl Sagan die Gleichung auf das gesamte Universum. Nach seiner Kalkulation sollte es in der Milchstraße über eine Million bewohnter Welten geben, im ganzen Kosmos er enthält grob geschätzt 100 Milliarden Galaxien - sogar 100 Billiarden.

Seither durchlitten die Astronomen eine Achterbahnfahrt. Zunächst gab die Entdeckung der Exoplaneten der These vom lebensprallen Universum Auftrieb. Dann ging es in die andere Richtung: Die Forscher bemerkten, dass es zur Entstehung von Leben und seiner Höherentwicklung sehr spezieller Bedingungen bedurfte. So braucht es den Mond, um die Erd-

achse zu stabilisieren. Ohne ihn würde unser Planet »herumeiern«, extreme Klimaschwankungen wären die Folge. Auch
stehen in unserem Sonnensystem die Riesenplaneten außen
und schirmen die inneren Planeten mit ihrer Schwerkraft vor
heranrasenden Kometen ab. Deren Einschläge hätten die Evolution sonst leicht ersticken können. In den meisten der neu
entdeckten fremden Sonnensysteme stehen die Trabanten der
Jupiter-Klasse dagegen innen, auch sind ihre Bahnen exzentrischer, was Chaos im gesamten System verursacht - wiederum ein lebensfeindlicher Aspekt.

Weiter ist auf einem Planeten das richtige Maß an Kohlenstoff erforderlich. Die Menge muss für die Entstehung von Organismen ausreichen. Zu viel davon verstärkt jedoch den Treibhauseffekt, der Himmelskörper würde sterilisiert wie in unserem Sonnensystem die Venus. Hinzu kommt die Plattentektonik. Sie bestimmt die Verteilung der Kontinente, was wiederum Meeresströmungen, Klima, Niederschläge und Verfügbarkeit von Nährstoffen durch Verwitterung beeinflusst - allesamt treibende Kräfte der Evolution. Angesichts dieser vielfältigen Einflüsse glaubten viele Wissenschaftler nun, dass die Entstehung des irdischen Lebens einer Serie schier unglaublicher Zufälle zu verdanken ist, die sich wohl kaum irgendwo im Universum wiederholt.

Diese Hypothese vertreten auch die US-Geologen Peter Ward und Donald Brownlee. Sie setzten diese zusätzlichen Größen als Faktoren in eine neu formulierte Drake-Gleichung ein. Nach ihren Berechnungen geht die Wahrscheinlichkeit, dass alle diese Voraussetzungen so zusammentreffen, dass intelligentes Leben entsteht, tatsächlich gegen null. »Das All wimmelt zwar von Leben«, argumentieren die beiden Forscher. »Doch die meisten Kreaturen sind Einzeller. Höhere Organismen sind die Ausnahme.« Entsprechend gebe es nur verschwindend wenige technische Zivilisationen. In unserem

Quadranten der Milchstraße sei die Menschheit gewiss die einzige - und vielleicht sogar im gesamten Universum.

Davon will der SETI-Veteran Frank Drake nichts wissen. Ward und Brownlee, klagt er, würden die Zähigkeit des Lebens unterschätzen. Drake: »Ihr Kardinalfehler ist, dass sie die opportunistische Natur des Lebendigen und seine Fähigkeit, sich an veränderte Umweltbedingungen anzupassen, nicht erkennen.«

Andere Forscher bekräftigen jedoch das Bild von der einsamen Erde. Dazu zählt der Münchner Astronomieprofessor Harald Lesch. »Leben ist eine der Materie innewohnende Eigenschaft«, sagt er. »Die Tendenz des Kohlenstoffs, Kettenmoleküle zu bilden, ist überall im Universum gleich.« Deshalb würden primitive Lebensformen entstehen, wo immer möglich. Die Entwicklung zu komplexeren Formen sei aber leicht zu unterbrechen, etwa durch heftiges Asteroiden-Bombardement oder eine Schlingerbahn von Planeten in Doppelsternsystemen, die zu heftigen Klimaschwankungen führt. Zudem benötigte zumindest das irdische Leben zur Ausbildung mehrzelliger Organismen immens viel Zeit. So geschah nach der Entstehung der ersten Einzeller dreieinhalb Milliarden Jahre lang nichts mehr, bis vor rund 500 Millionen Jahren die Evolution höherer Formen begann.

Derlei Zeiträume machen es laut Lesch unwahrscheinlich, dass Zivilisationen in bestimmten galaktischen Bereichen parallel existieren. Ihr Auftreten kann um viele Hundert Millionen Jahre differieren. Deshalb ist auch kein Kontakt möglich. Der Himmelsforscher nennt ein Beispiel: »Beim Auszug des Volkes Israel aus Ägypten war die Wüste Sinai auch eine Weile leer, weil die Israelis schon weg waren, die Ägypter aber noch nicht da.«

Der Physiker und Astronaut Ulrich Walter traut dem Leben hingegen mehr zu. Eine Intelligenz pro Galaxie, höchstens aber eine Handvoll könne es geben, glaubt er. Die Zahl erscheint gering. Doch sie führt zu einer verblüffenden Rechnung. Walter setzt in der Drake-Gleichung an die Stelle der Sterne in der Milchstraße die Zahl der Sonnen im ganzen Universum. Es sind geschätzte 10²² (10000 Milliarden Milliarden). »Diese riesige Zahl gleicht die geringe Wahrscheinlichkeit der Evolution von intelligentem Leben mehr als aus«, erklärt Walter. »Für den sichtbaren Teil des Kosmos sollten wir 100 Millionen Zivilisationen erwarten.« In unserem Quadranten der Milchstraße seien wir aber vermutlich allein.

Träfe die pessimistische Einschätzung von Lesch und Walter zu, bliebe es im All natürlich stumm, die SETI-Empfänger würden kein Signal empfangen. Dabei, meinen Forscher wie Sir Martin Rees, der britische *»Astronomer Royal«* (königlicher Astronom), sei die Entdeckung einer außerirdischen Intelligenz »philosophisch von außerordentlicher Bedeutung«. Sie würde uns helfen, unsere eigene Stellung im Universum zu erkennen und zugleich einiges über dessen Lebensfreundlichkeit lehren.

Womöglich gibt es aber doch intelligente Wesen in unserer galaktischen Nachbarschaft, nur haben sie nie komplexe Technologien entwickelt - vielleicht, weil sie es gar nicht konnten. Bei dem 41 Lichtjahre entfernten Stern HD 69830 im Sternbild Puppis entdeckten Astronomen drei Planeten. Ihre Massen entsprechen denen von Neptun in unserem Sonnensystem. Der äußerste umläuft seine Sonne in der Lebenszone, in der flüssiges Wasser existieren könnte. Zugleich ist HD 69830 von einem dichten Asteroidengürtel umgeben. Von dort, spekulieren einige Forscher, könnten Kometen auf diesen Planeten stürzen und so viel Wasser einbringen, dass er vollständig von einem Ozean bedeckt ist.

Entstünde dort eine Intelligenz - etwa Tintenfische mit einem großen Gehirn -, könnte sie keine auf elektrischem Strom basierende Technik entwickeln. Somit wäre es dieser Unterwasser-Zivilisation nicht möglich, zu funken, deshalb würden wir sie auch mit noch so großen Radioteleskopen nicht bemerken. Auf Gasplaneten könnte es demgegenüber Organismen geben, die wie Ballons in der dichten Atmosphäre schweben. Ohne festen Grund und Rohstoffe wie Holz oder Erz ist auch dort die Ausbildung einer technischen Zivilisation nur schwer denkbar. Vielleicht schweben diese Wesen in munterem Reigen, kommunizieren lebhaft und pflanzen sich fort. Aber sie wüssten nicht, was es außer ihrer Welt noch gibt, weil ihnen die technischen Mittel fehlen, um es zu ergründen.

Vielleicht haben die SETI-Forscher aber auch Glück und schnappen eine Botschaft der Fremden auf - so wie sie im August 1977 das berühmte »Wow-Signal« empfingen. Den erstaunten Ausruf schrieb der Astrophysiker Jerry R. Ehman an den Rand eines Ausdrucks eines Radioimpulses von 72 Sekunden Länge. Er kam aus dem interstellaren Raum, war aber keiner Quelle zuzuordnen und wiederholte sich auch nicht. Seine Natur ist bis heute unklar. Vielleicht aber haben die Forscher schon damals einen Schatten von ET erhascht. Es gibt übrigens noch ein philosophisches Argument für die Existenz der Außerirdischen: Womöglich ist unser Universum so beschaffen, dass es zwangsläufig intelligentes Leben hervorbringen musste. Diese Geschöpfe besitzen ein Bewusstsein und lernen, das Universum zu erforschen. Damit aber schafft sich der Kosmos ein Bewusstsein seiner selbst. Da wäre es höchst unweise von der Natur, nur auf eine Rasse zu setzen, die noch dazu unreif und selbstzerstörerisch ist. Sie muss vielmehr Redundanzen schaffen, um den Ausfall eines Bewusstseinsträgers kompensieren zu können.

Etwas flapsiger formuliert es im Film »Contact« (er beruht auf dem gleichnamigen Roman von Carl Sagan, der nicht nur

Astronom, sondern auch ein begnadeter Schriftsteller war) der Vater der kleinen Ellie Arroway, die später eine berühmte Astrophysikerin wird und Signale einer außerirdischen Zivilisation entdeckt. »Wenn wir die Einzigen im Universum sein sollten«, sagt er, »wäre das eine ziemliche Platzverschwendung.«

Die Drake-Gleichung (eingedeutschte Fassung)

$$N = S * P * E * B * I * F * L$$

Bedeutung der Faktoren:

N = Anzahl der möglichen technischen Zivilisationen in der Milchstraße.

S = Mittlere Sternentstehungsrate pro Jahr in unserer Galaxie.

P = Anteil dieser Sterne, die tatsächlich Planeten besitzen.

E = Durchschnittlicher Anteil von Planeten je Planetensystem, die in der »Lebenszone« kreisen, in der die Temperatur das Vorhandensein von flüssigem Wasser als Voraussetzung zur Entstehung von Leben erlaubt.

B = Anzahl der Planeten, auf denen biologisches Leben entsteht. Dieser Faktor weist wohl die größten Unsicherheiten auf.

I = Anteil der Planeten, auf denen sich intelligentes Leben entwickelt.

F = Anteil der Zivilisationen, die interstellare Kommunikation betreiben können und das auch tun.

L = Mittlere Lebensdauer einer technischen Zivilisation.

Wie Außerirdische aussehen würden

Tiemand hat bis jetzt nachprüfbar einen Außerirdischen gesehen (die Berichte von Menschen, die von UFO-Besatzungen - angeblich zwergenhaften Hominiden mit grauer Haut - entführt worden sein wollen, seien hier ausgeklammert). Dennoch haben Exobiologen versucht, den Körperbau und die Physiologie von Bewohnern ferner Planeten sozusagen am Reißbrett zu entwerfen.

Entscheidend für das Aussehen von ET ist in erster Linie die Evolution, die das Leben auf seinem Heimatplaneten durchlief. Diese wiederum wird von der Umwelt und den physikalischen Eigenschaften dieser Welt bestimmt. So verhält es sich auch im Fall des Planeten Gliese 581 c, den Schweizer Astronomen im April 2007 entdeckten. An seinem Beispiel versuchten NASA-Forscher, Lebewesen zu »konstruieren«, die auf diesem exotischen Himmelskörper leben könnten.

Gliese 581 c ist ein Trabant des 20,5 Lichtjahre von der Erde entfernten Sterns Gliese 581. Es handelt sich um einen Roten Zwergstern, in dessen System sich bislang drei Planeten fanden. Sterne dieses Typs leuchten 100-mal schwächer als unsere Sonne. Gliese 581 c kreist aber sehr nahe an seinem Mutterstern. Deshalb könnte es trotz dessen Leuchtschwäche auf der Oberfläche des Planeten im Mittel minus drei bis plus 40 Grad Celsius warm sein. Wasser wäre flüssig, und vermutlich besitzt er auch eine Atmosphäre. Er hat fünfmal so viel Masse wie die Erde und einen um 50 Prozent größeren Durchmesser. Entsprechend stark ist auch seine Schwerkraft:

Astronauten hätten dort das Doppelte ihres irdischen Gewichts.

Wegen seiner Nähe zum Zentralge stirn hat Gliese 581 c vermutlich eine »gebundene Rotation«: Er dreht sich während eines Umlaufs gerade einmal um seine Achse. Ein Tag dort hätte somit die Dauer eines Jahres. Deshalb wendet der Trabant seiner Sonne stets die gleiche Seite zu, wie auch der Mond der Erde. Ihre Strahlen erwärmen folglich nur die Tagseite. Die andauernd dem Weltall zugewandte Nachtseite ist demgegenüber eiskalt. Den Energieausgleich schaffen, wie auf der Erde, Luftbewegungen. Doch weil die Temperaturunterschiede auf Gliese 581 c sehr groß sind, tobt dort ein fortwährender planetenumfassender Sturm.

Die Gestalt von Lebewesen würde von dieser extremen Umwelt geprägt. Entscheidend für ihren Körperbau ist die starke Schwerkraft. Landtiere, die größer werden als eine Dogge, könnten sich nur auf muskelbepackten, stämmigen Säulenbeinen fortbewegen, sonst würde die Gravitation sie zu Boden zwingen. Damit würden sie wie Elefanten aussehen oder gar wie Brontosaurier.

Leichteres Spiel hätten delfinartige Wasserbewohner - sofern es auf dem Planeten Ozeane gibt. Durch die Gravitation verkleinert sich die bremsende Bugwelle, die solche Tiere vor sich herschieben. Sie könnten daher schneller durch das Wasser pflügen als irdische Delfine. Vögel würden sich dagegen schwertun. Um sich in der Luft zu halten, müssten sie viel mehr Energie aufbringen als auf der Erde. Deshalb dürften sie kaum größer werden als Kolibris.

Weil seine Sonne so leuchtschwach ist, herrscht auf Gliese 581 c nur Dämmerlicht. Dennoch könnte es dort eine Nahrungskette ähnlich der irdischen geben, denn trotz der schwachen Lichteinstrahlung ist Fotosynthese möglich, und damit pflanzliches Leben. Doch die Gewächse wären für uns kaum

als solche zu erkennen, wie Forscher des *Virtual Planetary Laboratory* der NASA herausfanden. Generell hängt die Farbe von Pflanzen auf fernen Welten vom Spektrum des Lichts ab, das ihre Sonnen aussenden. Irdisches Grünzeug nutzt vor allem rotes und blaues Licht zur Fotosynthese. Grünes Licht wird dagegen reflektiert, weshalb Blätter und Nadeln eben grün erscheinen. Heißere, blaue Sterne senden wenig rotes Licht aus, deshalb ist es für Pflanzen auf den Planeten dieser Sterne nicht von Nutzen und wird reflektiert. Daher dürfte ihre Farbe Rot oder Orange sein.

Auf Planeten, die wie Gliese 581 c nur wenig Sonnenlicht empfangen, könnte es sogar schwarze Pflanzen geben. Diese Farbe absorbiert am meisten Energie. Ähnlich wie die Landtiere wären Bäume dort von gedrungener Statur und hätten vermutlich keine Blätter, sondern am Stamm anliegende Schuppen - so können sie dem ewigen Sturm besser trotzen.

Auch die Geschöpfe, die eine Gruppe von Forschern aus England und Amerika um den Paläontologen Simon Conway Morris von der britischen Universität Cambridge ersann, beruhen auf wissen schaftlichen Erwägungen. Die Forscher siedelten ihre Kreaturen auf zwei hypothetischen erdähnlichen Planeten namens »Aurelia« und »Blue Moon« an. »Aurelia« umkreist, wie auch Gliese 581 c, einen Roten Zwergstern in gebundener Rotation. Er hat eine heiße und eine eiskalte Seite, doch in der dämmrigen Zwischenzone ist es lauschig warm. Zudem gibt es weder Jahres- noch Tageszeiten.

In einer solchen Extremwelt könnten »Stachelfächer« leben. Das sind riesige Tiere, die äußerlich Pflanzen ähneln und mit blütenähnlichen Tentakeln Sonnenlicht einfangen. Bei Gefahr kriechen sie zur Seite, wie irdische Seelilien, die räuberischen Seeigeln entfliehen wollen. In den Stachelfächer-Wäldern wieseln flinke »Schluckschweine«, fast fünf Meter hohe Raubtiere mit zwei Beinen, langem Hals und einem kleinen Kopf.

Sie jagen »Schlammbeutler«, rosige sechsbeinige Kreaturen mit Stielaugen, die in Höhlen leben und Dämme bauen.

»Blue Moon« dagegen ist ein Mond, der in einem Doppelsternsystem um einen Gasplaneten von der Größe Jupiters kreist. Dieser ist mit rund 143000 Kilometern Durchmesser und der 318-fachen Erdmasse der größte Planet unseres Sonnensystems. Der hypothetische »Blaue Mond« hat einen 240-Stunden-Tag und besitzt eine Atmosphäre aus Sauerstoff und Kohlendioxid, die dreimal so dicht ist wie die der Erde. Dies ermöglicht es großen Tieren, in der Luft von »Blue Moon« wie in Wasser zu schweben. »Himmelswale« nennt Conway Morris solche Geschöpfe. Sie rudern mit zehn Meter großen Flügeln langsam durch die Luft und verschlingen dabei Plankton, das ebenfalls in der Atmosphäre driftet.

Gejagt werden die Himmelswale von Rudeln adlerähnlicher Fleischfresser. Die Atmosphäre von »Blue Moon« enthält 30-mal mehr Kohlendioxid als die der Erde. Das Gas wirkt als Pflanzendünger, deshalb werden die Bäume dort drei Kilometer hoch. Den Himmelswalen ähnliche Geschöpfe, glauben manche Forscher, könnten wie Ballons auch frei in der Atmosphäre von Gasplaneten wie Jupiter oder Saturn schweben.

Lebewesen auf fremden Welten müssen nicht zwangsläufig aus Kohlenstoff und Wasser bestehen, die auf der Erde die Grundchemikalien des Lebens sind. Wasser ist ein universelles Lösemittel. Auf extrem heißen oder kalten Planeten könnten jedoch Organismen existieren, deren Biochemie auf anderen Flüssigkeiten beruht. Auf Himmelskörpern mit Oberflächentemperaturen zwischen minus 183 und minus 161 Grad Celsius könnte Methan diese Rolle spielen, das in diesem Temperaturbereich flüssig ist. Bei minus 77 bis minus 33 Grad wäre Ammoniak die Lebensflüssigkeit. Im heißen Bereich von 113 bis 445 Grad ist Schwefel flüssig, bei noch höheren Temperaturen wäre eine auf Silizium beruhende Chemie denkbar.

Auf diesem Element als Strukturbildner könnten auch exotische Lebensformen beruhen. Wie Kohlenstoffhat es vier Bindungselektronen, kann aber lange Ketten und Doppelbindungen viel schlechter bilden. Komplexe Biomoleküle aus Silizium sind daher nicht zu erwarten. Deshalb spekulieren manche Forscher über belebte Siliziumkristalle. Andere aber schließen alles Leben aus, das nicht auf Kohlenstoff basiert. »Das ist kein Mangel an Vorstellungskraft«, sagt der US-Astronom Seth Shostak, der am SETI-Institut in Kalifornien nach außerirdischen Zivilisationen fahndet. »Es ist eine Anwendung der physikalischen und chemischen Gesetze, die wir kennen, auf Welten, die wir nicht kennen.« Shostak glaubt, dass extraterrestrische Lebensformen höchstwahrscheinlich aus Wasser und Biomolekülen mit einem Kohlenstoffgerüst bestehen - wie wir.

Daraus ergibt sich eine zweite Schlussfolgerung, die von den meisten Exobiologen geteilt wird: Neben der Biochemie folgen auch Bau und Funktion der Körper außerirdischer Lebewesen den gleichen biologischen Regeln, die das irdische Leben prägten. Auch bei einer noch so bizarren Erscheinungsform wären uns manche ihrer Körperbestandteile vertraut. Sie atmen Sauerstoff, denn ein aerober Metabolismus liefert mehr Energie als eine auf Schwefel oder Kohlenstoff beruhende Atmung. Folglich müssen sie eine Art Lunge besitzen. Außerdem weisen sie einen Kreislauf auf, und sie bewegen sich auf Beinen fort. »Wie viele Möglichkeiten gibt es zu laufen, wie viele zu schwimmen? Überraschend wenige«, urteilt Conway Morris. »Deshalb verfielen die Tiere auf unserem Planeten immer wieder auf dieselben Lösungen. Und wenn es hier so ist, dann auch anderswo.«

Aus den gleichen Gründen müsse es auch fremde Intelligenzen geben, glaubt der britische Forscher. Jede Evolution werde unweigerlich auf die Entstehung von Intelligenz hinauslaufen, im Grunde sei der Mensch bereits im Bakterium angelegt. »Intelligenz ist eine universal anwendbare Lösung für häufige Umweltprobleme. Deshalb sollten wir annehmen, dass wir intelligente Gesellschaft im Kosmos haben«, bekräftigt auch SETI-Forscher Shostak.

Aus solchen Überlegungen heraus entwickelten NASA-Exobiologen einige Regeln für eine biologische Evolution, die im ganzen Universum gelten sollten. Demzufolge dürften fremde Intelligenzwesen, die erdähnliche Planeten bewohnen, zwischen zehn Pfund und zehn Tonnen wiegen. Dass ET Flossen hat, ist unwahrscheinlich, doch auf Planeten mit dichter Atmosphäre seien fliegende Intelligenzen vorstellbar. Höchstwahrscheinlich aber leben Angehörige fremder Zivilisationen auf trockenem Land. Weil Sinnesorgane nützlich sind und es Vorteile bringt, wenn diese oben am Körper und nahe am Gehirn angeordnet sind - beispielsweise ermöglicht dieser Körperbau kurze Reaktionszeiten -, dürften auch die Fremden Köpfe haben, mit einem Denkorgan darin.

Sie sollten auch genug Extremitäten besitzen, um Fortbewegung und gleichzeitig die Handhabung von Gegenständen zu erlauben - also mehr als zwei. Doch bei mehr als einem Dutzend individuell bewegbarer Arme und Beine könnte das Gehirn mit der Koordination überlastet sein. »Insekten, die häufigste Tierart auf Erden, besitzen sechs Beine. Mit sechs Extremitäten kommt die Natur also zurecht«, argumentiert Shostak. »Dass Menschen vier Extremitäten haben, ist eine zufällige Folge der Evolution der Wirbeltiere, die von einem vierflossigen Fisch abstammen.« Der *Homo sapiens* könnte also ebenso gut sechs Extremitäten aufweisen. Dies hätte Vorteile in vielen Lebensbereichen. »Zum Beispiel«, schmunzelt der SETI-Forscher, »könnte er besser Klavierduette oder Handball spielen.«

Gibt es den geheimnisvollen Planeten X wirklich?

Immer wieder ist in esoterischen Schriften, aber auch in manchen astronomischen Studien, von einem »Planeten X« die Rede. Die Astronomen gehen der Frage nach, ob es in den Außenbezirken des Sonnensystems einen weiteren großen »Transneptunier« geben kann. So nennen sie die Objekte, die weit außerhalb der Bahn des äußersten Riesenplaneten Neptun kreisen. Pluto, dem kürzlich der Planetenstatus aberkannt wurde (jetzt firmiert er als Zwergplanet), ist ein solches Objekt. Tatsächlich fanden die Himmelsforscher in diesen eisigen Weiten noch einige ähnliche Trabanten. Einer von ihnen, der Zwergplanet Eris, ist noch größer als Pluto.

Für Esoteriker hingegen hat es mit dem Planeten X eine anderen Bewandtnis: Ihnen gilt er als bewohnbare Welt, auf der intelligente Außerirdische leben: die sogenannten Annunaki. Sie berufen sich dabei auf antike Quellen. Darin ist ein solcher mysteriöser Himmelskörper tatsächlich erwähnt. In der Schöpfungsgeschichte der Sumerer gilt er als zehnter bzw. zwölfter Trabant der Sonne (es gibt unterschiedliche Zählweisen, da die Sumerer Sonne und Mond zu den Planeten rechneten). Das mesopotamische Kulturvolk nannte ihn Nibiru, was so viel bedeutet wie »der vorüberziehende Stern«.

In Sumer wurden die Annunaki als Schöpfer des Lebens auf der Erde betrachtet. In einer Tempelinschrift heißt es: Die Fremden kamen, und sie waren nicht wie wir. Anders, aber mit der Haut von Menschen, den Augen von Menschen, den Händen von Menschen. Für die neuzeitlichen Anhänger der

Nibiru-Legende steht außer Frage, dass diese Welt identisch mit dem Planeten X der Astronomen ist. Er soll dunkelrot gefärbt sein und eine extrem ausgedehnte Umlaufbahn haben, auf der er die Sonne in ca. 3600 Jahren einmal umkreist. Zum letzten Mal sei er im Jahr 1628 vor Christus in Erdnähe gekommen. In dieser Phase soll der Himmelskörper sogar bei Tageslicht sichtbar sein. Auf historischen Abbildungen wird er als Kreuz dargestellt.

Die Schriften der alten Sumerer besagen weiter, dass die Annunaki zur Erde niederstiegen und dass sie »Helfer« von menschenähnlicher Gestalt hatten. Diese verrichteten niedere Dienste für die hoch entwickelte Götterrasse, wie etwa deren Luftschiffe zu steuern. Angeblich berichteten die Sumerer, dass diese Helfer nicht wirklich lebendig gewesen seien, sondern nur so gewirkt hätten - als ob es sich um roboterhafte Androiden gehandelt habe. Es soll auch Statuen dieser Wesen gegeben haben, ebenso Inschriften in Steintafeln, die auch erzählen, was sich bei Begegnungen zwischen ihnen und den Menschen begab. Ob diese Quellen real sind, ist aber unsicher.

Flugs zogen findige UFO-Gläubige Parallelen zu einem Mythos der Neuzeit - nämlich den »Grauen«. So werden in der UFO-Szene die Insassen fliegender Untertassen genannt, die hier und da gelandet sein sollen. Bei Entführungen durch die UFO-Besatzungen, von denen zahlreiche Menschen berichteten, sollen die »Grauen« auch die Hände - oder was sie sonst an Greiforganen besitzen - im Spiel gehabt haben. Diese Androiden mit winzigem Mund und riesigen Augen sollen niemand anders sein als die Helfer der Annunaki, die von diesen künstlich - vielleicht durch gentechnische Verfahren - geschaffen wurden. Noch heute besuchen sie die Erde im Auftrag ihrer Herren, die auf Nibiru durch das äußere Sonnensystem schwirren.

Die Astronomie zeichnet vom Planeten X dagegen ein ganz anderes Bild. Bereits im 19. Jahrhundert gab es Spekulationen über einen Planeten, der außerhalb des Neptun, dem damals äußersten bekannten Trabanten im Sonnensystem, seine Bahn ziehen sollte. Die Existenz Neptuns sagten die Mathematiker John Couch Adams und Urbain Le Verrier anhand von Bahnstörungen vorher, die Astronomen bei Uranus beobachtet hatten. Der Himmelsforscher Johann Galle fand den großen Planeten dann im September 1846. Kurz darauf erklärte Le Verrier, es müsse dort draußen noch einen Planeten geben, denn die Bahnabweichungen von Uranus seien nur durch zwei Trabanten zu erklären.

Nun machten sich die Astronomen auf die Suche, und viele von ihnen wollten aus den Bahndaten des Uranus die Masse und den Himmelsort des hypothetischen Planeten herleiten. Sie schlugen schon Namen für ihn vor, wie »Hades« oder »Oceanus«. Nach ihren Berechnungen sollte es bis zu sieben transneptunische Planeten geben. Den Begriff »Planet X« prägte der Himmelsforscher Percival Lowell, der im frühen 20. Jahrhundert durch seine angeblichen Beobachtungen von Kanälen auf dem Mars weltberühmt wurde. Die Namensgebung erscheint indes etwas kryptisch, da damals nur acht Planeten bekannt waren. Alle diese Bemühungen blieben jedoch ohne Erfolg. Erst als der US-Astronom Clyde Tombaugh 1930 den neunten Planeten Pluto entdeckte, glaubten sich die Himmelsforscher am Ziel. Doch Pluto erwies sich als enttäuschend klein (später zeigte sich, dass er mit seinem Mond Charon nur ungefähr ein Vierhundertstel der Erdmasse besitzt). Der Planet X aber müsste deutlich größer sein, sollte er Abweichungen der Umlaufbahn des Uranus verursachen.

In den 1970er-Jahren schließlich berechnete der Astronom Tom van Flandern vom *US Naval Observatory* die Bahnstörungen von Uranus und Neptun neu. Dabei kam er zu dem Schluss, dass es einen zehnten Planeten geben müsse. Davon konnte er auch seinen Kollegen Robert Sutton Harrington überzeugen. Beide Forscher entwickelten die Theorie, dieser Planet X umkreise die Sonne mit einer Periode von 1019 Jahren auf einer hoch elliptischen Bahn, die ihn weit aus der Ebene der Ekliptik (das ist die gemeinsame Umlaufebene der großen Planeten) herausführt. Er sollte dreimal so weit von unserem Zentralgestirn entfernt sein wie Neptun. Der Astronom John Anderson vom *Jet Propulsion Laboratory* in Pasadena (Kalifornien) kam zu einem ähnlichen Resultat. Sein Planet X besaß die fünffache Erdmasse, eine Umlaufperiode von 700 bis 1000 Jahren und einen ebenfalls stark geneigten Orbit.

Diese Forschungsergebnisse griff der Schriftsteller Zecheria Sitchin auf, der an die Existenz des Planeten Nibiru samt der darauf lebenden Annunaki glaubte. In seinen Büchern beschreibt er sie als menschenähnlich, mit einer uns überlegenen technischen Zivilisation. Sie sollen vor 450 000 Jahren auf die Erde gekommen sein und aus Vormenschen auf gentechnischem Weg Sklaven erzeugt haben. Von ihm stammt die These, Nibiru durchquere alle 3600 Jahre das innere Sonnensystem.

Doch der mysteriöse Planet X wurde bis heute nicht entdeckt - vielleicht, weil es ihn nicht gibt. Darauf deuten die Bahndaten der beiden Voyager-Sonden hin, die vor 30 Jahren starteten. Der NASA-Forscher Miles Standish untersuchte, welchen Gravitationskräften die Zwillingssonden auf ihrer Reise ausgesetzt waren. Den Einfluss eines zehnten Planeten konnte er nicht finden, obwohl beide Sonden derzeit am Rand des Sonnensystems fliegen und deshalb dessen Schwerkraft besonders stark spüren sollten. Bahnanalysen der beiden Sonden Pioneer 10 und 11 erbrachten das gleiche Resultat. Auch verfeinerte astronomische Beobachtungsmethoden zeigen, dass die

Bahnstörungen der großen Planeten geringer sind als ursprünglich gedacht.

Damit ist die schöne Sage von Nibiru und seinen Bewohnern zumindest wissenschaftlich gesehen vom Tisch. Selbst wenn es einen Planeten auf der von Sutton Harrington errechneten Bahn gäbe, könnte auf seiner Oberfläche kein höheres Leben existieren. Denn er würde sich bis zu 100 Astronomische Einheiten weit von der Sonne entfernen (1AE entspricht der Distanz Erde-Sonne, also knapp 150 Millionen Kilometer). Selbst Pluto ist mit einem mittleren Abstand von 39,4 AE noch vergleichsweise sonnennah. Jedes Mal, wenn Planet X/Nibiru das innere Sonnensystem verlässt und sich dessen eisigem Rand nähert, würde seine Atmosphäre ausfrieren, die gefrorenen Gase fallen dann in großen Flocken vom Himmel. Schon zuvor wäre alles flüssige Wasser zu Eis erstarrt. Wie sich unter diesen Umständen eine Zivilisation entwickeln soll, ist völlig unklar.

Allerdings vermuten japanische Astronomen neuerdings, dass es am Rand des Sonnensystems doch einen Himmelskörper von etwa der halben Masse der Erde geben könnte. Er müsste drei- bis viermal so weit von der Sonne entfernt sein wie Pluto. Seine Umlaufbahn soll gegenüber der Ebene der Ekliptik um bis zu 40 Grad geneigt sein. Daher würde der tiefgefrostete Trabant nur etwa zwei Prozent seiner Umlaufzeit in dieser Ebene verbringen, was erklären könnte, warum er noch nicht entdeckt wurde. Die Japaner schließen aus den eigenwilligen Umlaufbahnen einiger Transneptunier auf die Existenz des Objekts. Doch auch dieser Körper kann den Mythos von Nibiru und seinen Bewohnern nicht retten.

Leben wir in der Matrix?

Ist es denkbar, dass nicht Menschen mit einem Gehirn und hoch entwickelten Sinnen dieses Buch lesen, sondern Leser wie Buch nur Teil eines Programmcodes sind, der in einem mächtigen Computer läuft, der unsere Welt simuliert? In der Science-Fiction-Literatur ist diese Idee altbekannt, ebenso in entsprechenden Filmen. So drehte der Regisseur Rainer Werner Fassbinder 1973 den Klassiker »Welt am Draht«. Er handelt von einem gigantischen Computer, der zur Simulation der wirklichen Welt entwickelt wurde. Mittels einer speziellen Apparatur können Menschen, die das Programm überwachen, auch direkt in den simulierten Raum eintauchen. Dabei entdecken sie, dass sie selbst und die ganze sie umgebende Welt ebenfalls nur Simulationen in einer künstlichen Umgebung sind, die von einer noch höheren Ebene aus gesteuert wird.

Ab 1999 folgte die Trilogie »Matrix«. In den Filmen wurden die Menschen von Maschinen an ein Computerprogramm angeschlossen, das ihnen ihr Leben vorgaukelt. In Wahrheit liegen sie in Behältern mit einer Nährflüssigkeit und liefern den Maschinen Energie. Kaum einer der Eingeschlossenen ahnt, dass alles, was er täglich erlebt, nicht real ist.

Auch manche Wissenschaftler halten es für denkbar, dass die Welt nichts als eine große Illusion ist. Einer von ihnen war der 2001 verstorbene britische Astronom Fred Hoyle, der den Begriff vom Urknall prägte. Eine Superintelligenz »müsse Physik, Chemie und Biologie manipuliert haben«, schrieb er

1954 in einer Astronomie-Fachzeitschrift. Insbesondere die Gesetze der Kernphysik müssten absichtsvoll konstruiert sein, um die Kernfusions-Reaktionen in den Sternen so ablaufen zu lassen, dass sie Kohlenstofferzeugen - den Grundstoff des uns bekannten Lebens.

In jüngerer Zeit griffen insbesondere der britische Philosoph Nick Bostrom von der Universität Oxford und sein Landsmann, der Physiker John D. Barrow von der Universität Cambridge, das Thema wieder auf. Sie argumentieren aber unterschiedlich. Barrow bezieht sich auf die Theorie vom Multiversum. Sie besagt, dass es eine unendliche Vielzahl parallel existierender Universen gebe, die jeweils unterschiedliche Eigenschaften besitzen. In vielen davon müsse Leben existieren, wobei sich in manchen technische Zivilisationen entwickelten, die der unseren weit überlegen sind. Sie sollten höchst leistungsfähige Rechner besitzen, die ganze Kosmen einschließlich intelligenter Bewohner simulieren können.

Die gottgleichen Programmierer müssten ihren Ultrasupercomputern nur die Gesetze der Physik und Biochemie eingeben, die im simulierten All gelten sollen, dann könnten sie im Zeitraffer zusehen, wie ganze Zivilisationen heranreifen - so wie irdische Biologen Fruchtfliegen im Reagenzglas beobachten. Weil die simulierten Zivilisationen irgendwann in der Lage sein sollen, ihrerseits Universen zu simulieren, würde die Zahl der künstlichen Welten exponentiell wachsen und irgendwann die Zahl der realen Welten übersteigen. Deshalb sei es statistisch wahrscheinlicher, dass wir in Wahrheit nur aus Elektronen bestehen, die in einem Höchstleistungsrechner herumflitzen.

Davon ist auch Nick Bostrom überzeugt. Er glaubt aber, dass nicht fremde Intelligenzen, sondern eine weiter entwickelte Menschheit die Illusion unserer Existenz schuf. Für die Fortentwicklung unserer Spezies, sagt er, gebe es drei Möglichkeiten:

- Die Menschen erklimmen keine höhere Zivilisationsstufe, weil sie - sei es durch eigenes Verschulden oder eine Naturkatastrophe - vor deren Erreichen aussterben.
- Die Menschheit erreicht den zivilisatorischen Höchststand, doch unsere Nachfahren sind nicht an der Schaffung künstlicher Welten interessiert, oder es ist ihnen verboten.
- Forscher lernen eines Tages, das Bewusstsein zu simulieren und wenden dieses Wissen zur Schaffung künstlicher Welten an. Dazu genügt nach Berechnungen von Experten wie dem US-Roboterforscher Hans Moravec von der *Carnegie Mellon University* in Pittsburgh ein Computer, der 100 Billionen Rechenoperationen pro Sekunde schafft. Heutige Computer liegen bei einer Billion Rechenoperationen pro Sekunde, Moravecs Ziel scheint also in Reichweite zu kommen.

Zwar könnten wir durchaus noch in der »Originalgeschichte« (so Bostrom) leben. Doch angesichts der Vielzahl der möglichen simulierten Welten sei es wahrscheinlicher, dass die »echte« Menschheit ihr Zukunftsziel bereits erreicht hat und uns nun in einer Kunstwelt simuliert.

Der Ökonomie-Professor Robin Hanson von der *George Mason University* in Fairfax (US-Staat Virginia) zieht daraus einige lustige Schlussfolgerungen. Für den Fall, dass wir entdecken würden, dass wir nur eine Figurensammlung in einem Supercomputer sind, entwarf er ein paar Verhaltensregeln. Zuerst sollten wir versuchen, den Zweck der Simulation herauszufinden. Würde sie zum Amüsement ihrer Schöpfer dienen, sollten wir das Spiel mitmachen und unser Leben möglichst dramatisch gestalten, mit viel Sex, Drogen und Rock'n' Roll. Wollten die Programmierer zusätzlich in ihre Simulation eintauchen, würden sie vermutlich in die Rolle der Reichen

und Schönen schlüpfen. In diesem Fall sollten wir die Nähe solcher Berühmtheiten suchen, um wiederum am Spiel teilzuhaben. Käme es den Erschaffern der Kunstwelt aber darauf an, Gott zu spielen, der die Unwürdigen bestraft, sollten wir ein tadelloses, sündenfreies Leben führen. Gelängen diese Mitwirkungen nicht, könnten die Erschaffer das Interesse an ihrer Simulation verlieren und den Stecker ziehen.

Hätten wir aber wirklich die Möglichkeit, herauszufinden, ob wir aus Fleisch und Blut oder aus Nullen und Einsen bestehen? Ja, sagen Barrows und Bostrom übereinstimmend. Denn zum einen müssten die Programmierer ihr Universum nicht bis ins letzte physikalische Detail ausstaffieren (was immense Rechenleistung einsparen würde), sondern nur so weit, dass die simulierten Kreaturen keine Unstimmigkeiten in ihrer Welt feststellen können. Diese würde dann immer noch realistisch erscheinen - so lange niemand zu genau hinschaut. Überdies, meint Barrow, seien die Programmierer trotz ihrer Überlegenheit weder allwissend noch unfehlbar. Ihr Modell könne daher Fehler enthalten, die sich im Lauf der (simulierten) Äonen summieren. Dann wären sie zu Nachbesserungen gezwungen - schon, um einen Computerabsturz zu verhindern. Dies gelte auch dann, wenn die Geschöpfe im künstlichen Kosmos technische Fortschritte machen, die sie an den Rand der simulierten Welt bringen.

Die Feinjustierung müsste sich allerdings bemerkbar machen, etwa in logischen Widersprüchen oder Abweichungen bei den Naturgesetzen. Womöglich sind wir solchen Inkonsistenzen bereits auf der Spur. So beobachteten australische Astronomen vor einigen Jahren weit entfernte sogenannte Quasare, die ihr Licht vor einigen Milliarden Jahren aussandten.

Quasare (von englisch »quasi-stellar object« = sternähnliches Objekt) sind die leuchtkräftigsten Objekte im Universum. Ihr Licht entsteht, wenn interstellares Gas und Staub (manchmal auch ganze Sterne) von der Schwerkraft riesiger Schwarzer Löcher in den Zentren weit entfernter Galaxien eingefangen und auf eine Kreisbahn gezwungen werden. Dabei bilden sich rasch rotierende Scheiben, in denen sich die Materie stark erhitzt.

In den Spektren dieser Himmelskörper fanden sich Hinweise, dass die sogenannte Feinstrukturkonstante - eine fundamentale Naturkonstante - im frühen Universum einen anderen Wert hatte als heute. Das wäre erklärbar, wenn sich im Lauf der Zeit die Lichtgeschwindigkeit geändert hätte. Doch dies schließt Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie aus. Bei der Festlegung ihres aktuellen Wertes könnte es sich also um eine eilige Korrektur des Programms handeln.

Ähnlich verhält es sich mit den von der Relativitätstheorie vorhergesagten Gravitationswellen. Die Physikerbauten weltweit mehrere große Detektoren, um sie aufzuspüren. Bislang aber blieben sie erfolglos. Einsteins Formelwerk wurde bis jetzt durch alle Experimente glänzend bestätigt. Bliebe der Nachweis der Gravitationswellen aus, kann dies bedeuten, dass die Theorie doch nicht stimmt - oder dass die kosmische Simulation diesbezüglich unvollständig ist. Ein solcher Programmiertrick könnte auch die Quantenmechanik sein. Wir verstehen ihre merkwürdigen Regeln nicht. Vielleicht stellt sie eine weitere Grenze der Simulation dar. Die Heisenberg⁵sehe Unschärferelation etwa verhindert, dass wir alle Eigenschaften eines Teilchens gleichzeitig erfahren können. Dadurch lässt sich erneut sehr viel Rechenkapazität sparen, vor allem, wenn der Mikrokosmos der »wahren« Welt, in der die Simulierer leben, sehr kompliziert ist.

Sitzen wir also wirklich in einem kolossalen Big-Brother-Container, in dem uns unsere Schöpfer mehr oder weniger amüsiert studieren? Es ist doch eher unwahrscheinlich. Warum sollte eine fortgeschrittene Menschheit ihre eigene Entwicklung im Computer wiederholen, wo sie doch um die Stärken und Schwächen ihrer Art weiß? Und wenn wir unseren Forscherdrang beibehalten, ist es sicher lohnender, mit der geballten Rechenkraft die Geheimnisse des Universums zu lüften, anstatt eine künstliche Welt mit unbedeutenden Kreaturen zu erzeugen. Wir leben gewiss in einer realen Welt, und die Rätsel der scheinbaren Inkonsistenz der Feinstrukturkonstanten und der Quantentheorie werden wir schon noch lösen.

Kosmische Katastrophen

Können kosmische Katastrophen die Erde vernichten?

Das Leben, sagen Scherzbolde, ist von der ersten Sekunde an lebensgefährlich. Das gilt auch für die Menschheit. Bislang hat sie aber überlebt und blieb - anders als die Saurier - von äußeren Katastrophen verschont. Das muss nicht so bleiben. In der Tiefe des Alls lauern tatsächlich tödliche Gefahren. Einige kosmische Phänomene könnten die Erde unbewohnbar und uns so den Garaus machen.

Einen Vorgeschmack gaben die Geschehnisse vom 27. August 1998. Am frühen Morgen dieses Tages traf eine aus der Tiefe des Alls heranrasende Strahlenfront auf die Nachtseite der Erde. Die ionisierende Gammastrahlung ließ in den oberen Luftschichten die Gasatome aufleuchten. »Unsere Atmosphäre schützte uns, sonst wären wir alle gestorben«, dichtete daraufhin ein deutsches Boulevardblatt.

Das war natürlich Unsinn, denn der fünf Minuten andauernde Strahlenorkan brachte das irdische Leben in keiner Weise in Gefahr. Verursacht wurde er durch einen Energieausbruch auf einem 20 000 Lichtjahre entfernten sogenannten Magnetar mit der astronomischen Bezeichnung SGR 1900+14. Es war das stärkste je in unserer Milchstraße beobachtete Ereignis dieser Art. Aufgrund der großen Distanz erreichte aber nur eine Strahlendosis von der Stärke einer zahnärztlichen Röntgenaufnahme die Erde. Weil die Lufthülle die Strahlung fast vollständig absorbierte, war am Boden nichts mehr davon zu spüren.

Ein Magnetar ist eine besondere Art von Neutronenstern. Diese entstehen, wenn ein relativ massereicher Stern am Ende seines Lebens in einer Supernova-Explosion verglüht. Die Materie seines Kerns wird dabei so dicht zusammengepresst, dass sie sich vollständig in Neutronen umwandelt. Sie lagern sich in der dichtestmöglichen Konfiguration der Materie zusammen.

Anders als normale Neutronensterne besitzen Magnetare jedoch gewaltige Magnetfelder. Diese werden bis zu einer Billiarde Gauß stark - damit sind sie 800 Millionen Mal stärker als das irdische Feld. Durch die rasche Rotation der Himmelskörper wickeln sich die Magnetfeldlinien auf, bis sie explosionsartig zerreißen und sich auf einem niedrigeren Energieniveau neu arrangieren. Dabei birst die Kruste des Magnetars. Hoch energetische Teilchen fliegen ins All - ein Gammablitz entsteht. Ein derartiges Sternbeben erschütterte auch SGR 1900+14 und setzte so viel Energie frei wie die Sonne in 300 Jahren.

Bei diesem Ereignis blieb die Menschheit also verschont. Dennoch könnte sie eines Tages durch eine ähnliche kosmische Katastrophe ausgelöscht werden. Das Universum hält vier weitere Möglichkeiten bereit, um die Erde durch Hitze oder Strahlung zu sterilisieren. Eine davon sind Gammastrahlenausbrüche. Sie flammen auf, wenn zwei Neutronensterne oder ein Neutronenstern und ein Schwarzes Loch miteinander kollidieren. Ebenso entstehen sie, wenn ein Stern von über 40 Sonnenmassen zu einem Schwarzen Loch kollabiert. Astrophysiker sprechen dabei von einer Hypernova. Es ist die gewaltigste mögliche Katastrophe im All. Die Explosion erzeugt einen Materiestrahl (Jet), der im ungünstigsten Fall wie eine Kanone auf die Erde gerichtet ist. Darin werden elektrisch geladene Teilchen auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. In den

Jets entstehen die Gammastrahlen, die schließlich auf unseren Planeten treffen.

Einige Paläontologen glauben, dass ein solcher Ausbruch an dem Massenaus sterben beteiligt war, das vor 440 Millionen Jahren am Ende eines Erdzeitalters namens Ordovizium die irdische Flora und Fauna dezimierte. Die Strahlenflut, so ihr Szenarium, durchschlug die Erdatmosphäre und tötete viele Lebewesen direkt. Danach setzten atmosphärenchemische Reaktionen ein, die zum Abbau der Ozonschicht führten. Nun konnte die zerstörerische UV-Strahlung der Sonne ungehindert bis zum Boden vordringen, zugleich prasselte saurer Regen nieder. Beide Effekte töteten viele weitere Organismen. Andere Forscher aber widersprechen dieser These. Sie glauben eher an einen Meteoriteneinschlag als Ursache des Massenaussterbens im Ordovizium.

Eine Größenordnung unter den Hypernovae liegen die Supernovae. Hierbei detonieren kleinere Sterne im Massenbereich von drei bis etwa 40 Sonnenmassen. Sie schleudern bei diesem feurigen Ende ihres Lebens mehrere Sonnenmassen an Materie ins All. Der Stoßfront aus energiereichen Teilchen eilt ein Blitz aus Röntgenstrahlung voraus. Würde ein solcher Doppelschlag die Erde treffen, wäre es um die Biosphäre geschehen.

Dass solche kosmischen Katastrophen unseren Heimatplaneten in der Tat beeinflussen können, zeigen Spuren, die Geologen in bestimmten Gesteinsformationen entdeckten. Sie stammen von einer Supernova, die vor 2,8 Millionen Jahren detonierte. Vormenschen wie der *Australopithecus africanus*, die zu jener Zeit die Erde bevölkerten, dürften verständnislos zum Himmel geschaut haben. Am helllichten Tag glänzte dort neben der Sonne ein neues leuchtendes Objekt. Nachts überstrahlte es sogar den Vollmond. Es war besagte Supernova. Zuerst erreichten ihr Licht sowie ihre UV- und Röntgenstrah-

lung unseren Planeten. Unterwegs schwächte sich die Strahlenflut jedoch so sehr ab, dass sie den irdischen Organismen nicht
mehr schaden konnte. Später folgten die mit den Stern trümmern davon stiebenden Atome. Sie sanken durch die Lufthülle
zur Erdoberfläche, wo sie sich in einem feinen Schleier ablagerten. Dann wurden sie nach und nach unter neuen Ablagerungsschichten begraben.

Vor einigen Jahren kamen diese Radioisotope - darunter Eisen-60 und Beryllium-10 - in den Forschungslabors wieder ans Licht. Aus der Konzentration der Partikel und den Eigenschaften der Sedimentschichten konnten die Geologen nicht nur berechnen, wann die Supernova detonierte, sondern auch, dass sie etwa 100 Lichtjahre von der Erde entfernt gestanden haben muss. Ähnliche Isotopenfunde in anderen Schichten lassen auf eine weitere Supernova schließen, die vor 35 000 bis 60 000 Jahren in einer Entfernung zwischen 60 und 130 Lichtjahren hochging.

In unserer Milchstraße ist die nächste Supernova übrigens längst überfällig: Statistisch gesehen sollte darin alle 50 Jahre ein Stern detonieren. Die letzte Explosion wurde jedoch 1680 beobachtet, also vor über 320 Jahren. Von ihr blieb der Supernova-Rest Cassiopeia A übrig. Zuvor hatten die Himmelsforscher Tycho Brahe und Johannes Kepler in den Jahren 1572 bzw. 1604 je eine Supernova beobachtet. Ein weiterer bekannter Supernova-Rest ist der Krebsnebel. Er ging aus einer Sternenexplosion hervor, die 1054 im Sternbild Stier erfolgt war. Chinesische und arabische Astronomen bemerkten das Ereignis und berichteten von einem »Gaststern« am Himmel.

Das nächste potenzielle Armageddon droht uns von Schwarzen Löchern. Sie könnten nicht nur das Leben, sondern auch unseren Planeten selbst auslöschen. Da diese Schwerkraftmonster kein Licht aussenden und damit unsichtbar sind,

könnte sich eines davon unserem Sonnensystem unbemerkt nähern und es schließlich durchqueren. Je nach seiner Flugbahn würden die Planeten mehr oder weniger stark aus ihrem Orbit gelenkt.

Für die Erde gibt es bei einem nahen Vorbeiflug des Störenfrieds zwei Möglichkeiten: Entweder sie wird aus dem Sonnensystem geschleudert. In diesem Fall würden binnen kurzer Zeit die Ozeane und später die Atmosphäre gefrieren. Eisesstarr driftet unser Planet dann für alle Ewigkeit mutterseelenallein durch die Milchstraße. Oder er gerät auf eine Spiralbahn, die ihn näher an die Sonne heranführt. Im unglücklichsten Fall stürzt die Erde dabei in unser Zentralgestirn. Einen ähnlichen Effekt hätte es, wenn ein anderer Stern unser Sonnensystem in gefährlicher Nähe passiert. Auch er würde mit seiner Schwerkraft die Umlaufbahnen der Planeten ändern. Dann könnte die Erde aus der »Lebenszone« fliegen, in der erträgliche Temperaturen herrschen und Wasser flüssig vorkommt. Landet das Schwarze Loch dagegen einen Volltreffer auf die Sonne, könnte diese sich in heiße Gasschwaden auflösen.

Ein Weltuntergang durch eines dieser kosmischen Desaster ist allerdings nicht in Sicht. Astrophysiker errechneten, dass ein Magnetar näher als zehn Lichtjahre an der Erde stehen müsste, um das Leben auf ihr zu gefährden. Eine Supernova beeinträchtigt die Biosphäre nur, wenn sie nicht weiter als 60 Lichtjahre entfernt ist. Erfolgt die Explosion jedoch in fünf bis zehn Lichtjahren Distanz, würde das irdische Leben vollständig ausgelöscht. Von beiden Klassen von Himmelsobjekten ist jedoch kein Kandidat innerhalb dieser »Sicherheitszonen« bekannt, der uns gefährlich werden könnte. Statistisch gesehen ist alle 700 Millionen Jahre mit einer Supernova zu rechnen, die beim Flug unserer Sonne durch die Galaxis in der näheren Umgebung detoniert.

In fernerer Zukunft könnte von einer solchen Explosion doch Gefahr drohen. Dann nämlich, wenn im Orionnebel, der nächstgelegenen Sternenwiege, ein massereicher und deshalb kurzlebiger Stern entstehen und Richtung Sonne fliegen würde. Allerdings kann es eine solche Begegnung frühestens in 16 Millionen Jahren geben. Ebenfalls im Sternbild Orion steht ein Stern, der noch zu Lebzeiten der jetzigen Menschengeneration als Supernova am Himmel aufleuchten könnte. Es handelt sich um Beteigeuze, den rötlich glimmenden östlichen Schulterstern der Konstellation. Dieser etwa 600 Lichtjahre entfernte Rote Uberriese ist in die letzte Phase seines Daseins eingetreten und könnte schon morgen detonieren, aber auch erst in 100 000 Jahren. Sein feuriges Ende wäre unübersehbar: Er würde um das 16 000-Fache heller und dabei das ganze Firmament überstrahlen. Doch auch hier befindet sich die Erde außerhalb der Gefahrenzone.

Schwarze Löcher oder Neutronen Sterne, die das Sonnensystem durcheinanderwirbeln könnten, stellen ebenfalls keine akute Bedrohung dar. Zwar treiben bis zu 100 Millionen dieser Leichen ausgebrannter Sterne unsichtbar durch die Galaxis. Doch statistisch gesehen kommt ein solches Objekt dem Sonnensystem nur alle 1000 Milliarden Jahre näher als einen Lichtmonat. Erst von da an kann es Schaden anrichten. Der genannte Zeitraum entspricht indes dem 80-fachen Alter des Universums.

Entwarnung geben die Astrophysiker auch hinsichtlich der Gammastrahlenausbrüche. Das irdische Leben können sie nur gefährden, wenn eine Hypernova innerhalb eines Radius von 6500 Lichtjahren detoniert und ihre harte Gammastrahlung zur Erde schleudert. Auch für dieses Himmels Spektakel gibt es einen Kandidaten: den Stern Eta Carinae. Der Blaue Riese steht im Sternbild Carina (Schiff) am Südhimmel, Astronomen schätzen ihn auf 100 Sonnenmassen; manche

glauben, es könnten auch 150 Sonnenmassen sein. Jedenfalls reicht dies aus, um eine galaktische Hypernova zu zünden.

Eta Carinae ist ein veränderlicher Stern, das heißt, seine Helligkeit variiert. Er geht seiner letzten Lebensphase entgegen und wurde offenbar bereits instabil. Im 19. Jahrhundert beobachteten Astronomen, dass seine Leuchtkraft stark schwankt, 1841 gab es schließlich einen heftigen Ausbruch. Der Monsterstern strahlte dabei so viel Licht ab wie sonst nur eine Supernova und verlor zehn Sonnenmassen an Materie, überstand jedoch erstaunlicherweise die Explosion. Sie brachte eine große, pilzförmige Wolke hervor, den sogenannten Homunkulus-Nebel. Würde Eta Carinae in einer finalen Hypernova-Explosion zerstieben, dürfte der Erde nichts geschehen, denn das Gestirn ist 7500 Lichtjahre entfernt. Es gibt also einen ausreichenden Sicherheitsabstand.

Doch Eta Carinae ist eine Ausnahme. Ansonsten gibt es in unserer kosmischen Nachbarschaft kaum mehr massereiche Sterne. Diese entstanden vornehmlich in der ersten Sterngeneration nach dem Urknall. Die von diesen Ursternen erschweren Elemente veränderten die chemische Zusammensetzung des kosmischen Gases und Staubs, sodass in den folgenden Sterngenerationen nur noch sehr wenige solcher Uberriesen entstehen konnten. Weil die Sterne der ersten Generation längst detonierten, droht von ihnen keine Gefahr mehr. Astronomische Beobachtungen stärken dieses Modell. Sie zeigen, dass sich nur vier Gammastrahlenausbrüche näher als zwei Milliarden Lichtjahre an der Erde ereigneten. Alle anderen spielten sich in viel größerer Entfernung ab - das heißt, die Hypernovae explodierten vor vielen Milliarden Jahren, als es noch die frühen Monstersterne gab. Wie es aussieht, bleibt die Erde von diesen vier geschilderten Weltuntergangs Szenarien vorläufig verschont, ob langfristig

eines davon eintritt, ist offen. Die fünfte Apokalypse aber wird mit Sicherheit kommen. Am Ende ihres Lebens, wenn ihre Brennstoffvorräte schwinden, bläht sich unsere Sonne zu einem Roten Riesen auf. Ihre Atmosphäre dehnt sich aus, möglicherweise bis über die Erdbahn hinaus. Dieser Prozess verläuft allmählich, über Hunderte von Millionen Jahren. Dabei steigen die Temperaturen auf der Erde, sodass die Ozeane schließlich verdampfen und alles Leben erlischt. Doch ob die Erde schlussendlich im Feuer sterben wird oder im Eis, war bislang unklar. Fest steht, dass die anschwellende Sonne die inneren Planeten Merkur und Venus verschlingt. Durch diese Ausdehnung (und weil ein heftiger Sternwind viel Materie abtransportiert) verliert sie aber an Masse, wodurch sich ihre Gravitation abschwächt. Die Erde spiralt deshalb nach außen bis zur Marsbahn und könnte so dem Inferno entkommen. Dann würde sie nach dem Erlöschen der Sonne als eiskalter Trabant weiter ihre Kreise ziehen. Dieses Szenarium galt bis vor Kurzem als das wahrscheinlichste.

Nach neuesten Erkenntnissen der Astronomen erwartet unseren Planeten aber doch ein feuriges Ende. Computersimulationen zeigen, dass die Sonne sich im Rote-Riesen-Stadium um das 250-Fache vergrößert und 2700-mal heller leuchtet als heute. Dabei kommt ihre Atmosphäre der Erde auf ihrer neuen Bahn näher als zuvor gedacht. Dadurch kreist unser Planet dicht über der Sonnenoberfläche. Seine Schwerkraft zieht die unter ihm liegenden solaren Gasmassen an, dabei entsteht ein Gezeitenberg. Dessen Masse bremst wiederum die Erde und zieht sie nach innen, bis sie die Sonnenatmosphäre durchfliegt und dabei verglüht. Doch bis dahin bleibt noch reichlich Zeit: Den Modellrechnungen zufolge stirbt die Erde erst in 7,59 Milliarden Jahren den Feuertod.

Eine weitere Variante des Weltuntergangs proklamiert eine Gruppe amerikanischer Endzeitgläubiger. Ihre Befürchtung:

Kollisionen energiereicher Teilchen in Beschleunigern wie dem LHC des Genfer Kernforschungszentrums Cern könnten einen Riss im Raumzeit-Gefüge erzeugen. Dies löse einen Phasenübergang im Kosmos aus, vom heute herrschenden Zustand eines »falschen Vakuums« zum echten Vakuum mit niedrigerer Energie. Dabei würde eine Schockfront entstehen, die alle Materie zerstört. Zuerst verschlingt diese die Erde, bevor sie ins Universum hinaus zieht.

Astrophysiker halten dieses Szenarium für baren Unsinn. Ihr Argument: Die Natur machte dieses Experiment unzählige Male, etwa bei jeder Supernova-Explosion. Sobald wir deren Licht sehen, erreicht uns auch die abgestrahlte Energie. Würde diese einen Phasenübergang auslösen, wäre die Welt längst vernichtet.

Die Abwehr der Killer-Asteroiden

Bislang hatte die Menschheit Glück: Seit Homo sapiens auf der Weltbühne erschien, blieb die Erde von fatalen Meteoriteneinschlägen verschont. Doch das nächste kosmische Geschoss kommt bestimmt - es fragt sich nur, wann. Darauf kennen die Astronomen zumindest eine statistische Antwort, und sie haben auch Szenarien entwickelt, die zeigen, was bei einem Einschlag passiert. Trifft etwa eine interplanetarische Kartoffel von 50 mal 100 Meter Größe unseren Planeten, setzt sie so viel Energie frei wie eine Wasserstoffbombe mit einer Sprengkraft von 50 Millionen Tonnen TNT. Das entspricht, wie der Schweizer Astronom Roland Brodbeck errechnete, einer Kugel von knapp 400 Meter Durchmesser aus purem Sprengstoff. Eine Druckwelle breitet sich aus und walzt im Umkreis von 25 Kilometern alles nieder, was ihr im Weg steht.

Ein Meteorit, der am 30. Juni 1908 am Fluss Steinige Tunguska in Sibirien detonierte, muss ungefähr diese Größe gehabt haben. Bei seinem Einschlag wurden im Umkreis von etwa 50 Kilometern sämtliche Bäume entwurzelt, und in der 65 Kilometer entfernten Handelssiedlung Wanawara zerstörte die Druckwelle Fenster und Türen. Solche Einschlagskörper, auch Impaktoren genannt, sind astronomisch gesehen Asteroiden oder Kometen. Erst wenn sie die Erdatmosphäre durchfliegen und den Boden erreichen, werden sie Meteoriten genannt.

Planetenweite Auswirkungen hätte der Einschlag eines Asteroiden aus Eisen von 4 mal 4 mal 6 Kilometern Größe. Ein sol-

eher Bolide wöge 400 Milliarden Tonnen. Die beim Einschlag freigesetzte Energie entspricht der Explosion von etwa 25 Billionen Tonnen TNT. Aus dieser Menge ließe sich - wiederum laut Brodbeck - eine Sprengstoff-Kugel von 30 Kilometern Durchmesser herstellen. Die gleiche Energie würde bei gleichzeitiger Zündung von mehr als einer Milliarde Atombomben vom Hiroshima-Typ frei. Ein solcher Treffer fegte vor 65 Millionen Jahren die Dinosaurier von der Erde, heute könnte er die Menschheit ausrotten.

Zum Glück sind solche Katastrophen selten. Das ergaben Berechnungen von Forschern der US-Raumfahrtbehörde NASA. Sie ermittelten die Wahrscheinlichkeit, mit der Himmelskörper bestimmter Größe unseren Planeten treffen. Dazu werteten sie die Daten eines Asteroiden-Suchprogramms namens LINEAR (von: Lincoln Near-Earth Asteroid Research Project) aus. Dieser Tabelle zufolge treffen Geschosse mit einem Durchmesser von über einem Kilometer die Erde alle 600 000 Jahre. Einschläge wie das Tunguska-Ereignis sollte es bereits alle 2000 bis 3000 Jahre geben. Vernichtende Ereignisse wie der Einschlag des vermutlich zehn Kilometer großen Killer-Asteroiden, der die Saurier aussterben ließ, kommen nur alle zehn Millionen Jahre einmal vor. Ein solches globales Desaster ist damit allerdings überfällig, denn zum letzten Mal kam es, wie erwähnt, vor 65 Millionen Jahren zu einer globalen Katastrophe.

Natürlich sagen solche Statistiken nichts darüber aus, wann uns der nächste kosmische Hammer trifft. Das könnte schon morgen geschehen. Gefährlich sind insbesondere die sogenannten Erdbahnkreuzer, also Asteroiden, die der Sonne nahe kommen und dabei die Bahn der Erde überqueren. Knapp 5000 solcher potenziellen Bomben wurden durch die sieben Suchprogramme, die es weltweit gibt, bislang gefunden; über 700 davon sind größer als ein Kilometer. Die NASA stuft 906

dieser auch Nah-Erd-Objekte genannten Asteroiden als »potenziell gefährlich« ein, das heißt, sie können mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit die Erde treffen. Brisant an diesen Geschossen ist, dass sie aus Richtung Sonne anfliegen können und dadurch der Entdeckung entgehen. Schon einige Male sahen Astronomen solche Boliden erst beim Abflug, nachdem sie die Erde bereits passiert hatten.

Die Menschheit wäre also gut beraten, Methoden zur Abwehr gefährlicher Asteroiden zu entwickeln. Inzwischen brüten mehrere Forschergruppen über dem Problem, wobei sie bereits eine ganze Reihe mehr oder minder origineller Technologien vorschlugen. Der nächstliegende Gedanke war, anfliegende Geschosse einfach mit Atombomben in Stücke zu sprengen. Einen solchen Plan entwarfen Studenten des Massachusetts Institute of Technology bereits 1967. Ihre Aufgabe war es, in einer Simulation den Asteroiden Icarus bei einem hypothetischen Anflug auf die Erde vom Kurs abzubringen (in Wahrheit kreuzt er in sicherer Entfernung von der Erdbahn). Die Jungforscher errechneten, dass dies mit sechs 100-Megatonnen-Wasserstoffbomben gelingen könnte, die von Saturn-V-Raketen zu Icarus befördert werden sollten. Später modifizierten US-Physiker diese Idee. Um einen Asteroiden zu pulverisieren, so erkannten sie, müsste eine Bombe in seinem Kern platziert werden. Deshalb sollten mehrere Nuklearraketen den Himmelskörper hintereinander anfliegen. Der erste Sprengkopfreißt ein Loch in seine Oberfläche, der zweite detoniert Sekunden später in dem entstandenen Krater und vertieft ihn. Nach einem Dutzend solcher Explosionen sollte das Loch dann tief genug sein, sodass eine letzte riesige Wasserstoffbombe das Zerstörungswerk vollenden könnte.

Der aus Ungarn stammende Physiker Edward Teller, bekannt als »Vater der Wasserstoffbombe«, präsentierte dagegen 1992

einen anderen Vorschlag: Ein einziger Sprengkörper, sofern er nur ausreichend groß wäre, könnte nach Tellers Kalkulation genügen, um den Boliden zu zerstören. Dazu benötigt er jedoch eine Sprengkraft von einigen Milliarden Tonnen TNT, ein Vielfaches also von jeder bislang gebauten Bombe. Heutige Sprengköpfe können allenfalls Objekte von einem Kilometer Durchmesser zerstören.

Später erkannten Astronomen, dass eine solche Megabombe die Gefahr für die Erde eher noch vergrößern würde. Denn viele Asteroiden sind keine soliden Felsblöcke. Sie können mehrere Kerne haben, die durch ihre Schwerkraft aneinanderkleben, oder sogar einem fliegenden Schutthaufen aus kleineren Gesteinsbrocken gleichen. In diesem Fall würde eine Detonation den Boliden in viele mehr oder weniger große Bruchstücke zerlegen, deren Einschläge sich dann wie bei einem Schrotschuss großräumig auf der Erde verteilen. Oder einer der Kerne absorbiert die Explosionsenergie, der Asteroid als Ganzes bleibt aber weitgehend unbeeinflusst.

Alternativ könnte es ausreichen, einen schweren Einschlagkörper auf den Asteroiden zu schießen, der keinen Sprengstoff mitführt. Eine Explosion gäbe es dann nicht, er würde sein Zielobjekt allein durch die Aufprallenergie von seiner Bahn schieben. Die Abweichung wäre zwar nur gering. Doch wenn der Himmelskörper weit genug von der Erde entfernt ist, würde er vom Kollisionskurs abgebracht. Tatsächlich entwickelt die europäische Raumfahrtagentur ESA derzeit eine solche Einschlagsonde. Das Projekt läuft unter dem Namen »Don Quijote«. Es besteht aus zwei Flugkörpern.

Der erste, Sancho getauft, soll einen 400 Meter großen Asteroiden namens Apophis anfliegen, über längere Zeit begleiten und dabei seine Bahn exakt bestimmen. Dann prallt die zweite Sonde namens Hidalgo auf den Himmelskörper, und Sancho misst die durch den Aufprall verursachte Bahnabwei-

chung. Eigentlich sollte das Don-Quijote-Gespann schon 2007 einen Probeflug absolvieren, doch es gab Verzögerungen, nun soll es laut ESA irgendwann zwischen 2011 und 2017 so weit sein.

Bei den Erdbahnkreuzern sind die Bahnen bekannt, und bei jedem neu entdeckten Objekt bemühen sich die Astronomen, diese schnellstmöglich zu bestimmen. Oft lässt sich dabei schon Jahre oder Jahrzehnte im Voraus erkennen, ob es sich unserem Planeten gefährlich nähert. Apophis etwa wird die Erde im Jahr 2029 in relativ geringer Distanz passieren. Dieser Vorbeiflug, fürchten Astronomen, ändert womöglich die Flugbahn der Gesteinskugel so, dass sie bei ihrer Wiederkehr 2036 unseren Planeten tatsächlich treffen könnte - allerdings nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 zu 45000. Und mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 zu 1500 könnte der Asteroid 2004 VD17 am 4. Mai 2102 die Erde treffen - die Gefahr ist also real.

Für solche langfristigen Bedrohungen entwickelten die Forscher weitere Methoden zur Abwehr. Eine davon ist, eine relativ schwere Raumsonde auf einen Begleitkurs zu dem Asteroiden zu schicken. Sie soll nur wenige Meter über dessen Oberfläche schweben. Dabei zieht sie ihn über Jahre hinweg allein durch ihre Schwerkraft sanft von seiner Bahn. Da der Bolide natürlich auch die Sonde anzieht, muss sie diese Kraft durch ein Raketentriebwerk kompensieren, sie wird damit zum »Gr avitation s -Trakto r «.

Ein ähnlicher Effekt würde erreicht, wenn eine Sonde, die als fliegender Spiegel fungiert, Sonnenlicht auf der Asteroidenoberfläche konzentriert. Das Lichtbündel erzeugt so viel Hitze, dass Material verdampft und in den Weltraum abströmt.
Dabei erzeugt es einen Rückstoß, der wiederum den Boliden von seiner Bahn schiebt. Ähnlich würden starke Laser wirken, die den Körper von der Erde aus unter Beschuss nehmen und

sein Oberflächenmaterial verdampfen. Dies ließe sich auch durch eine Maschine erreichen, die auf der Oberfläche abgesetzt wird, um dort Material aufzusammeln und zu zerkleinern. Anschließend schleudert sie es durch kleine Düsen ins All.

Einen ausgefeilteren Plan, der auf dieser Technik basiert, entwickelte der italienische Forscher Daniele Fargion von der Universität Rom. Er möchte einen Schwärm spezieller Sonden zu einem gefährlichen Asteroiden entsenden. Sie sollen sich auf einer Seite in dessen Kruste bohren. Das dabei verdrängte Gestein wird zermahlen und durch spezielle Düsen ins All geblasen. Der stete Schub dieser Abraum-Raketen könnte einen Gesteinsbrocken von einem Kubikkilometer Volumen im Verlauf mehrerer Jahre so sehr ablenken, dass er die Erde um einige Tausend Kilometer verfehlt. Die dazu nötige Energie kann aber nur ein Kernreaktor liefern.

Es gibt noch mehr Ideen. So könnte ein Raketenmotor auf einem Asteroiden installiert werden, der mit seinem Schub den kosmischen Brocken von seiner Bahn bringt. Dabei gibt es aber ein Problem: Asteroiden rotieren gewöhnlich, sodass das Triebwerk im Takt der Eigendrehung ein- und wieder ausgeschaltet werden müsste, um eine Ablenkung in die gewünschte Richtung zu erreichen.

Andere Forscher wollen den anfliegenden Boliden in eine spiegelnde Folie hüllen. Dann liefert das von ihm ins All reflektierte Sonnenlicht den zur Bahnablenkung nötigen Schub. Das Gleiche würde auch ein riesiges Solarsegel bewirken, das an dem Asteroiden befestigt wird. Wiederum müsste dazu aber zunächst die Rotation des Körpers gestoppt werden. Umgekehrt könnte eine Staubwolke, die in seiner Bahn freigesetzt wird, einen Asteroiden abbremsen. Diese Idee hatte der 1997 verstorbene Planetenforscher Eugene Shoemaker. Er war Mitentdecker des Kometen Levy-Shoemaker 9, der 1994

in eine Kette von Bruchstücken zerbarst, die nacheinander in einer spektakulären Schau auf dem Riesenplaneten Jupiter einschlugen.

Mehr nach Science-Fiction klingt die Vision zweier Wissenschaftler vom französischen Zentrum für Weltraum Studien: Sie wollen einen kleinen Asteroiden von etwa 40 Metern Durchmesser einfangen und ihn im erdnahen Raum »parken« - genauer an einem der stabilen sogenannten Lagrange-Punkte. Sie liegen 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt. An dieser Stelle heben sich die Anziehungskräfte von Erde und Sonne gegenseitig auf, sodass ein Körper dort ohne zusätzlichen Antrieb parallel zur Erde weiterfliegt. Wird ein größerer Bolide auf Kollisionskurs entdeckt, ließe sich dieser kleine Asteroid innerhalb von acht Monaten auf einen Abfangkurs bringen.

Welches aber ist die effektivste Lösung? Die Antwort gaben Forscher der Universität Glasgow. Sie hatten neun der vorgeschlagenen Techniken bewertet. Sieger wurden die Sonnenreflektoren. In ihrem potenziell erderrettenden Szenario soll ein Schwärm von Sonden um den anfliegenden Asteroiden kreisen. Jede von ihnen trägt einen Spiegel von 20 Metern Durchmesser. Sie werden so ausgerichtet, dass alle das reflektierte Sonnenlicht in einem Punkt konzentrieren. Dort verdampft es das Oberflächenmaterial und erzeugt einen Gasstrahl, der den Himmelskörper zur Seite drückt. Die »Spiegelbienen« sollen so effektiv sein wie Nukleargeschosse, aber ohne deren Risiken, wie die Zersplitterung des Boliden. In 20 Jahren könnten die Weltraum Spiegel einsatzbereit sein.

Ist eine Erfolg versprechende Asteroidenabwehr aber erst einmal implementiert, könnte aus dem Segen ein Fluch werden. Dann besteht nämlich die Gefahr, dass wahnsinnige Diktatoren oder US-Präsidenten die Technik nutzen, um zuvor ungefährliche Brocken gezielt auf die Erde umzulenken. Je nach

ihrer Größe könnten sie ein Land vernichten, eine ganze Region oder sogar einen Kontinent. Davor warnte schon vor Jahren der US-Astronom Carl Sagan.

Für die Asteroidenjäger gibt es noch ein Problem. Sie könnten nämlich ihr Ziel verwechseln. Das geschah im November 2007, als gleich drei Observatorien in den USA ein auf die Erde anfliegendes Objekt beobachteten. Sie alarmierten das in solchen Fällen zuständige *Minor Planet Center*, das dem *Harvard Smithsonian Center for Astrophysics* in Cambridge (USStaat Massachusetts) zugehört. Dieses gab prompt eine Warnung vor einem möglichen Einschlag heraus.

Das vermeintliche kosmische Geschoss entpuppte sich jedoch als die irdische Raumsonde Rosetta, die auf dem Weg zum Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko ist, wo sie 2014 eintreffen soll. Um auf die richtige Bahn zu gelangen, sollte Rosetta in einem sogenannten Swing-by-Manöver durch die Erdschwerkraft beschleunigt und umgelenkt werden. Die Astronomen standen zunächst blamiert da. Dann aber trösteten sie sich mit der Erkenntnis, dass ihr Frühwarnsystem immerhin korrekt funktionierte.

Himmelsphänomene

Der Stern von Bethlehem

Vor über 2000 Jahren wurde gemäß dem christlichen Glauben in Bethlehem der Herr Jesu als Sohn Gottes geboren. Kurz nach seiner Ankunft auf Erden standen die Heiligen Drei Könige vor der Krippe, in der das Knäblein lag. Ein Stern soll sie in das heilige Land geführt haben. Doch keines der bekannten Gestirne kommt als Wegweiser in Frage. Was aber leuchtete damals sonst am Himmel? Darüber rätseln Theologen ebenso wie Astronomen schon lange.

Die Quellenlage ist recht unsicher. Im Neuen Testament wird der Stern von Bethlehem im Evangelium des Apostels Matthäus an zwei Stellen erwähnt. Dort heißt es: »Ah nun Jesus geboren war in Bethlehem in Judäa, in den Tagen des Königs Merodes, siehe, da kamen Weise aus dem Morgenland nach Jerusalem, die sprachen: Wo ist der neugeborene König der Juden? Denn wir haben seinen Stern im Morgenland gesehen und sind gekommen, um ihn anzubeten.« Die zweite Stelle lautet: »Und siehe, der Stern, den sie im Morgenland gesehen hatten, ging vor ihnen her, bis er ankam und über dem Ort still stand, wo das Kind war.«

Um das Himmelsphänomen bestimmen zu können, das als Erklärung für den Stern in Frage kommt, müssen die Astronomen das Datum der Erscheinung möglichst genau kennen. Auch hier liefert die Bibel einen Hinweis. Er steht im Lukas-Evangelium: »In jenen Tagen erließ Kaiser Augustus den Befehl,

alle Bewohner des Reiches in Steuerlisten einzutragen. Dies geschah zum ersten Mal; damals war Quirinius Statthalter von Syrien.«

Weitere Anhaltspunkte geben historische Personen. Die Schlüsselfigur ist dabei König Herodes. Lange Zeit glaubten Historiker, er sei im Jahr 4 vor Christus gestorben. Sie bezogen sich auf Berichte des jüdischen Historikers Flavius Josephus, die dieser zum Ende des 1. Jahrhunderts verfasst hatte. Er berichtete, dass Herodes kurz nach einer Mondfinsternis vor dem Passahfest starb. Zunächst meinten die Astronomen, dass es sich hierbei um die Finsternis vom 13. März 4 vor Christus gehandelt haben müsste. Weitere Schilderungen in der Bibel aus Jesu Leben erlauben die Schlussfolgerung, dass die Weisen das Kind besuchten, als es etwa 15 Monate alt war. Folglich konnte es nicht nach dem Jahre 6 vor Christus geboren worden sein. Tatsächlich gilt als gesichert, dass Jesus nicht im Jahr null, sondern schon früher geboren wurde.

Die gängigste Erklärung des »Sterns von Bethlehem« war für lange Zeit ein Komet, der eine wahrhaft auffällige Himmelserscheinung ist. Tatsächlich berichten chinesische Quellen von einem Stern mit einem Schweif im Jahr 5 vor Christus, der im Sternbild Steinbock zu sehen war. Ab dem 14. Jahrhundert zeigen viele künstlerische Darstellungen der drei Weisen dementsprechend einen Kometen über dem Stall, in dem, von Ochs' und Esel umlagert, die Krippe mit dem Jesuskindlein gestanden haben soll. Eines der bekanntesten Werke dieser Art ist das Fresco »Anbetung der Könige« von Giotto di Bondone. Er hatte 1301 den Halleyschen Kometen beobachtet, der schon in antiken Quellen erwähnt wird. Unter dem Eindruck des Himmels spektakeis malte er zwei Jahre später in seinem Bild einen Schweifstern an den Himmel.

Inzwischen aber kamen die Himmelforscher wieder von der Kometenthese ab, aus mehreren Gründen: Schweifsterne wurden in der Zeit um Christi Geburt meist mit Unheil, nicht aber mit Heil verbunden. Weiter ist nicht plausibel, warum ein Komet nur den Weisen im Morgenland aufgefallen sein soll, aber nicht dem Volk in Judäa oder den römischen Besatzern. Jedenfalls berichten keine weiteren Quellen von einem solchen Himmelsphänomen in der Region. Auch die Sichtungsmeldung aus China ist auf einen einzigen Bericht beschränkt. Der Halleysche Komet scheidet als Erklärung ebenfalls aus: Er stand lange vor Christi Geburt am Himmel, nämlich von August bis November 12 vor Christus. Außerdem sprach der Apostel Matthäus explizit von einem Stern, der Unterschied zu den auffälligen, mit einem Schweif behafteten Kometen war den Menschen damals aber durchaus geläufig.

Deshalb zogen die Astronomen eine Supernova als weitere Erklärungsmöglichkeit in Betracht. Explodiert ein massereicher Stern in der näheren Umgebung der Sonne in der Milchstraße, kann der scheinbar neu aufgeflammte Stern sogar bei Tag sichtbar sein. Doch die Explosionswolke (Astronomen sprechen von einem Supernova-Rest) müsste bis heute im All überdauert haben, nämlich als bunt leuchtender Nebel. Der berühmte Krebsnebel im Sternbild Stier etwa ist der Überrest einer Supernova-Explosion im Jahr 1054, die chinesische Astronomen beobachteten. Doch bei den vielen Himmeldurchmusterungen, die es bis heute gab, fand sich kein Supernova-Rest, der zum mutmaßlichen Geburtszeitpunkt Christi passt.

Die dritte Theorie zur Deutung des Sterns von Bethlehem geht auf den berühmten Astronomen Johannes Kepler zurück. Er errechnete Anfang des 17. Jahrhunderts, dass es im Jahr 7 vor Christus eine sogenannte Königskonjunktion gegeben haben müsse. Bei dieser Planetenkonstellation stehen Jupiter und Saturn am Himmel sehr nahe beieinander. Diese Position nahmen sie damals innerhalb eines Jahr sogar drei-

mal ein. Dennoch verschmolzen sie nicht zu dem einzigen hellen Stern, von dem die Evangelien in der Weihnachtsgeschichte erzählen, sondern waren stets getrennt zu sehen. Dies spricht zunächst gegen die Theorie.

Sie könnte aber Bestand haben, wenn man die astrologische Bedeutung dieses Himmelsschauspiels in der damaligen Zeit berücksichtigt. Für die Sterndeuter in Mesopotamien waren die Planeten nicht nur Himmelskörper. Ihre Bewegungen und Begegnungen entsprachen Ereignissen auf der Erde. Der Planet Jupiter etwa galt als der »Königsstern«. Er stand für den höchsten babylonischen Gott Marduk. Saturn war dem Gott Kaimun zugeordnet, der mit dem Volk Israel in Verbindung gebracht wurde. Das Sternbild Fische galt als Symbol für Palästina. Daraus könnte sich folgende Schlussfolgerung ergeben: Der Königstern Jupiter trifft in den Fischen auf den Israel schützenden Saturn, also wurde im Westen ein mächtiger König geboren.

Die drei Konjunktionen ereigneten sich im Abstand von Monaten, sodass die babylonischen Weisen zwischen Mai und Dezember ins Heilige Land hätten reisen können. Am 12. November wären Jupiter und Saturn während der Königskonjunktion in der Abenddämmerung über dem Horizont direkt vor ihren Augen gestanden, als sie von Jerusalem in südlicher Richtung auf das nur wenige Kilometer entfernte Bethlehem zuritten. Für einen Geburtstag Jesu im frühen November spricht auch, dass sich noch später im Jahr keine Hirten auf den Feldern befunden haben sollten, wie es die Bibel aber berichtet. Denn im Winter wächst in Palästina kein Gras mehr, wegen zu geringer Sonneneinstrahlung. Die Schafe hätten auf den Weiden somit kein Futter mehr gefunden.

So argumentiert jedenfalls der österreichische Astronom Konradin Ferrari d'Occhieppo, der mehrere Bücher zu dem Thema verfasste. Das letzte erschien 1991 unter dem Titel »Der Stern von Bethlehem aus astronomischer Sicht«. Diese Theorie wird auch gern von Planetarien aufgegriffen, die an Weihnachten in ihrem jeweiligen Planetenprogramm die fragliche Konjunktion zeigen. Fachkollegen d'Occhieppos zweifeln aber an dieser Deutung. So gibt es bis heute keine abschließende Antwort auf das Phänomen des Sterns von Bethlehem. Womöglich hat es ihn als astronomisches Ereignis nie gegeben, und er ist bloß als Symbol in einer Erzählung zu sehen, mit dem die Autoren der Bibel der Geburt Jesu Gewicht verleihen wollten.

Beeinflusst der Mond den Menschen?

Dass der Vollmond viele Menschen vom genialen Dr. Jekyll in einen monströsen Mr. Hyde verwandelt, davon sind die Polizeichefs im südenglischen Seebad Brighton überzeugt. Dort hatte Inspektor Andy Parr für den Zeitraum vom April 2006 bis März 2007 die Kurven der Mondzyklen mit denen der Kriminalitätsrate verglichen. Bei Vollmond, so seine Erkenntnis, sind viele Menschen gewalttätiger, in Pubs und Nachtclubs gebe es mehr Rangeleien und Schlägereien, und die Rate der Gewaltverbrechen steige. Deshalb wurden in der Grafschaft Sussex während des Sommers in den Vollmondnächten mehr Polizisten eingesetzt.

Ähnlich wie in Brighton gab es auch in Deutschland bereits eine Truppe von Vollmond-Polizisten. Im Jahr 1989 wollte der Leiter der Schutzpolizei in Ludwigshafen ebenfalls einen Zusammenhang zwischen Mondphasen und Kriminalität festgestellt haben, woraufhin er für seine Beamten in Vollmondnächten eine Urlaubssperre verhängte. Im Frühjahr 2007 veröffentlichten Forscher der polnischen Akademie der Wissenschaften eine Studie, die ebenfalls einen Anstieg der Kriminalität in Abhängigkeit von den Mondzyklen konstatiert. Vor einigen Jahren schon hatten zwei schwäbische Gerichtsmediziner erklärt, wenn der Mond sich runde, werde mehr gezecht. In ihrer Arbeit, erschienen unter dem Titel »Alkoholkonsum und mondperiodischer Einfluss«, korrelierten sie 16495 Blutalkoholtests der Polizei mit 50 Mondzyklen. Das Ergebnis: Zwei Tage vor Vollmond wurden durchschnitt-

lieh 175 Promille Sünder ertappt, um den Neumond herum sank die Zahl dann rätselhafterweise auf 120.

Diese Studien könnten auf den ersten Blick durchaus als Belege dafür gelten, dass der Mond das menschliche Verhalten beeinflusst. Daneben soll der bleiche Himmelsgeselle auch auf Naturvorgänge einwirken. Dies glauben laut einer Umfrage des Meinungsforschungsinstituts Forsa 92 Prozent der Deutschen. Einer Phase wird dabei besondere Kraft zugeschrieben: dem Vollmond. Scheint er am Himmel, sollen Lust und Liebe aufflammen sowie die Fruchtbarkeit, aber auch Unruhe und Aggression zunehmen. Überdies besitzen bei Vollmond hergestellte Lebensmittel und andere Produkte angeblich besondere Eigenschaften. Den Glauben machen sich clevere Hersteller zunutze. So füllen in Naturkostläden Käse, Bier, Brot und Quellwasser die Regale, die bei Vollmond produziert, gebacken, gebraut oder abgefüllt wurden. Daneben fachsimpeln Bauern und Hobbygärtner am Stammtisch ungeniert über die besten Mondtage für Aussaat und Ernte. Friseure sind an für den Haarschnitt angeblich günstigen Tagen ausgebucht.

Viele - meist esoterische - Ratgeber vermengen die Mondphasen mit der Astrologie. Ihre Autoren leiten einen Zusammenhang zwischen Pflanzenwachstum und dem Stand des Erdbegleiters im Tierkreis her. Im Sternbild Krebs etwa soll der Mond Blattpflanzen wie Salate, Mangold, Spinat und Kohl stärken. Nach Überzeugung der Mondgläubigen unterliegt nicht nur Grünzeug, sondern auch der menschliche Körper den Rhythmen des Nachtgestirns. Die Mond-Ratgeber ordnen bestimmte Tierkreiszeichen in Verbindung mit der Mondphase verschiedenen Körperregionen zu. Ärztliche Eingriffe sollten - außer in Notfällen - möglichst nur während der richtigen Konstellationen erfolgen. Zum Beispiel gelten Kieferoperationen im Zeichen des Stiers als »ungünstig«.

Einige Ärzte beziehen diese Regeln in ihr Geschäftsmodell ein und behandeln ihre Patienten danach. Immer mehr Kranke würden eine solche Therapieplanung einfordern, rechtfertigen sie sich.

Dass sich die Mondrhythmen auf Tiere auswirken, steht für einige Bauern außer Frage. Einer davon, der auf einem Hof nahe dem oberbayerischen Chiemsee wirtschaftet, züchtet nach dem astronomischen Mondkalender Rinder und Pferde. Dabei dokumentiert er den Brunftbeginn seiner Kühe. Zwei Tage vor Vollmond sollen sie deutlich aufnahmebereiter für den Samen der Bullen sein, weil »der Erdtrabant sie stimuliert«. Selbst Häuser werden mittlerweile nach Mondregeln errichtet. Bevorzugtes Baumaterial ist Mondholz. Stammt es von Bäumen, die im Tierkreiszeichen Steinbock gefällt wurden - also im Dezember und Januar -, soll es weniger »arbeiten« und resistenter gegen Schädlinge sein.

Beweise für die lunaren Einflüsse haben die Mondtheoretiker allerdings nicht. »Wer es ausprobiert, wird schon merken, dass es funktioniert«, weisen sie Fragende zurecht. Das sei Erfahrungswissen, die Wissenschaft könne solche Phänomene nicht erklären. Manche behaupten auch, der Erdbegleiter übe keinen direkten Einfluss aus, er diene vielmehr nur als Zeiger, der »zeitliche Übereinstimmungen überlieferter Beobachtungen« signalisiert. Vielleicht würden noch unentdeckte Naturgesetze dahinterstecken.

Dieser Vermutung widersprechen Naturwissenschaftler vehement. Einer davon ist Josef Fried vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg. »Wir kennen zwei Einflüsse des Mondes: seine Gravitation, die sich in den Gezeiten der Ozeane bemerkbar macht, sowie sein Licht. Die Stärke beider Effekte lässt sich leicht berechnen«, kontert der Astronomieprofessor. »Einflüsse auf den Menschen sind dabei aber nicht auszumachen.« Mechanismen, über die der Mondzyklus

Vorgänge auf Erden beeinflussen könne, seien nicht bekannt, und für geheimnisvolle verborgene Kräfte gebe es keinerlei Anzeichen.

Um die Schwerkraftwirkung des Erdtrabanten auf den Menschen zu demonstrieren, errechneten Astronomen des französischen *Observatoire de Paris* in Meudon, welche Kräfte Himmelskörper, aber auch irdische Massen auf einen Menschen ausüben. Nahe gelegene Berge und Gebäude wirken demzufolge ungleich kräftiger auf den Körper als die fernen Objekte des Sonnensystems. Auch zwei sich gegenüberstehende Personen ziehen einander vieltausendfach stärker an, als der Mond an ihnen zerrt. Dessen verschwindend geringe Schwerkraft, so die Schlussfolgerung der Franzosen, könne keine körperlich wahrnehmbaren Effekte hervorrufen.

Die Macht des Nachtgestirns untersuchte auch der Heidelberger Soziologe Edgar Wunder, Geschäftsführer der Gesellschaft für Anomalistik. Dazu sichtete er an die 700 Veröffentlichungen, um herauszufinden, ob durch lunare Einflüsse irdische Ereignisse häufiger oder intensiver eintreten - ersichtlich etwa anhand von Einweisungen in Nervenkliniken, der Zahl von epileptischen Anfällen, Selbstmorden, Unfällen oder Notrufen bei Polizei und Feuerwehr. Das Resultat: Sämtliche Studien endeten entweder negativ oder erwiesen sich als methodisch fragwürdig. »Bei Vollmond laufen nicht mehr Verrückte herum als sonst, und auch in Nervenkliniken verhalten sich die Patienten nicht auffälliger als zu anderen Mondphasen«, kommentiert Wunder.

Wohl am hartnäckigsten hält sich der Mythos, der Vollmond »ziehe Kinder«. Eine Studie vom Mai 2005 widerlegt dies klar. Gynäkologen hatten die Daten von 560 000 Geburten im US-Staat North Carolina analysiert. Häufungen zu bestimmten Mondphasen konnten sie nicht erkennen. Früher hatten auch

Hebammen an der deutschen Nordseeküste beteuert, die meisten Kinder kämen bei Flut zur Welt. Dies entlarvte Edgar Wunder als - im wahrsten Sinn des Wortes - Ammenmärchen. Anhand der Geburtsbücher mehrerer an der Nordsee gelegener Orte eruierte er den jeweiligen Zeitpunkt von 1360 Niederkünften. Tatsächlich kamen bei Flut 661, bei Ebbe aber 699 Kinder zur Welt.

Der Hautarzt Josef Smolle von der Universitätsklinik Graz wollte wissen, ob Operationen bei Vollmond tatsächlich mehr Komplikationen nach sich ziehen, wie es Mondgläubige behaupten. Dazu durchforstete er 14000 Krankenakten. »Es fand sich kein Einfluss auf die Wundheilung«, berichtet er. »Dabei müsste sich bei dieser großen Fallzahl selbst ein kleiner Effekt zeigen.« Smolle nahm auch noch 11000 Notarzteinsätze unter die Lupe. Sein Fazit: Es gab zwar Unfallhäufungen an einigen Tagen, aber die hatten partout nichts mit dem Mond zu tun. Kürzlich analysierten Experten für die österreichische Regierung den Einfluss des Mondes auf die allgemeine Unfallhäufigkeit. Dazu untersuchten sie 500000 Arbeitsunfälle. Einen statistischen Zusammenhang mit den Mondphasen fanden sie nicht.

Ebenso wenig lässt sich die Mär vom Zusammenspiel zwischen Mond und Menstruation erhärten. Zwar entspricht die weibliche Periode ungefähr einem Erdumlauf des Trabanten. Doch das ist nur eine zufällige Eigenart des Menschen. Bei Säugetieren finden sich viele Zyklusvarianten - von wenigen Tagen bei der Maus bis zu 15 Wochen beim asiatischen Elefanten. Warum aber sollte das Nachtgestirn *Homo sapiens* bevorzugen? Schon 1950 hatten Göttinger Forscher die Periodendaten von 10000 Frauen mit den Mondphasen verglichen. Ergebnis: keine Ubereinstimmungen.

Nicht einmal den Schlaf stört der Vollmond wirklich, sagen Forscher, auch wenn er direkt auf das Bett scheint. »Mit 0,2

Lux ist seine Lichtstärke zu gering, um auf den Menschen eine biologische Wirkung zu haben«, urteilt Jürgen Zulley vom Schlafmedizinischen Zentrum an der Universität Regensburg. Dazu müsse er schon einige Hundert Mal heller scheinen. Warum glauben dann 88 Prozent der Deutschen, sein Licht könne den Schlafrauben? Zulley: »Man erinnert sich an Vollmondnächte, in denen man schlecht schläft, besser als an andere Nächte. Wer dann glaubt, der Vollmond bringe ihn um die Nachtruhe, ist angespannt und schläft tatsächlich unruhiger.« Den Mythos vom Holz, dessen Qualität im Mondtakt schwankt, entzaubern schließlich gleich mehrere Studien. So verglichen Freiburger Forstwissenschaftler regulär geschlagenes und Mondholz von Eichen und Fichten. Bezüglich Härte und Konsistenz fanden sie keinen Unterschied.

Wenn die Wissenschaft den Glauben an die Macht des Erdtrabanten aber so nachhaltig zerpflückt, warum halten so viele Menschen daran fest? Anomalieforscher Wunder gibt eine Antwort: »Ein Leben nach den Mondrhythmen strukturiert den Alltag. Dies hilft Leuten, die sich nur schlecht organisieren können. Zugleich fühlen sie sich angebunden an eine natürliche Ordnung im Kosmos. Dies hat fast schon eine religiöse Dimension.« Solche Glaubenssysteme könnten Personen, die sich in ihrer Lebens situation verunsichert fühlen, neuen Halt verleihen. Gerade der Mond, der so verlässlich seine Bahn zieht, sei dazu geeignet.

Das letzte Wort ist dies vielleicht noch nicht. Immerhin gibt es nachweisliche Wirkungen des Erdbegleiters auf die Biosphäre. So bestimmen seine Phasen das Verhalten vieler Tiere. Ein berühmtes Beispiel sind die pazifischen Palolo-Würmer. Sie paaren sich alljährlich im November stets dann, wenn der Mond sein letztes Viertel erreicht. In Kalifornien lassen sich Gezeiten-Ährenfische im Sommer jeweils kurz nach Voll- und Neumond an die Strände spülen, wo die Weibchen ihre Eier

im Sand ablegen. Vermutlich takten die vom Mondlicht und den Gezeiten ausgehenden Reize die inneren Uhren solcher Arten. Die Meeresnacktschnecke *Tritonia diomedea* hingegen orientiert sich am Magnetfeld der Erde. Biologen entdeckten jedoch, dass sie ihre Bewegungsrichtung mit den Mondphasen ändert. Offenbar registriert die Molluske die winzigen Störungen, die der Erdbegleiter in den Feldlinien verursacht. Zudem schwankt der Durchmesser mancher Bäume mit der Stellung des Mondes, wie Schweizer Biologen beobachteten. Ursache ist ein im gleichen Takt wechselnder Wasserfluss im Stamm.

Könnten solche subtilen Mechanismen nicht auch auf den Menschen wirken? »Ich lasse mich von sauber durchgeführten Studien gern überzeugen«, sagt Edgar Wunder. »Dann muss man nach neuen Erklärungen suchen. So könnte es indirekte Wirkungen geben wie bei den Meeresnacktschnecken.« Im Augenblick aber verhält es sich mit dem Einfluss des Erdbegleiters wie mit dem Ungeheuer von Loch Ness: Dessen Existenz ist nicht zu beweisen, aber auch nicht völlig zu widerlegen.

Die Waagschale neigt sich jedoch immer mehr zugunsten der Skeptiker. Denn auch die eingangs angeführten polizeilichen Studien sind mittlerweile als Belege für die Wirkmacht des Erdbegleiters entzaubert. Nach der in Ludwigshafen angeordneten Urlaubssperre für Polizisten bei Vollmond ließ die Polizeidirektion Karlsruhe die Statistiken der zwischen 1990 und 1992 in der Region verübten Straftaten auswerten, vom Verkehrsdelikt bis zum Mord. Doch es ergab sich kein Bezug zum Mond. Ein solcher war auch bei einer Nachuntersuchung der Kriminalstatistik aus Brighton nicht zu finden. In diesem Fall analysierte die Redaktion der US-Astronomiezeitschrift "Sky&Telescope" die Daten nach den mathematischen Regeln der Kunst. "Jawohl, es gab Spitzen und Senken", erläuterte

Chefredakteur Rick Fienberg das Resultat, »aber sie folgten einer statistischen Zufallsvariation.«

Die Macht des bleichen Himmelsgesellen erscheint damit weitestgehend entmystifiziert. Seine schönste Wirkung aber bleibt, nämlich die Romantik, die sich beim Spaziergang in einer Vollmondnacht mit einem geliebten (oder noch zu gewinnenden) Partner ergibt.

Register

Adams, John Couch 212
Adler, Stephen 69
Alcubierre, Miguel 133,172
Allen, Paul 197
Alpher, Ralph 18
Aiiaxiniander 18
Anderson, John 100,213
anthropisches Prinzip 27 ff., 45
Antigravitation 26, 43, 50
Apophis 233 ff.
Aristoteles 143
Aurelius Augustinus 115
Außerirdische Zivilisationen 195 ff.
Axion 167

Baby-Universum 14 Barbour, Julian 117 Barrow, John D. 216 Baum, Lauris 164 Beamen 79 Bell, John 68 Bessler, Johann 151 Beteigeuze 108,226 Big Rip 51,163 Blome, Hans-Joachim 11 Böhm, David 69 Bohnrsche Mechanik 69 ff. Bohr, Niels 57,70 Bojowald, Martin 13 Bond, Hermann 20 Börner, Gerhard 15 Boson 91 Bostrom, Nick 216 Brahe, Tycho 224 Breakthrough Propulsion Physics Brodbeck, Roland 230 Broglie, Louis de 87 Brownlee, Donald 199 Bruno, Giordano 195 Burbidge, Geoffrey 21

Caldwell, Robert 51,163
Casimir, Hendrik 145
Cassiopeia A 224
Chiao, Raymond 139
Christian, Joy 67
Columbus-Weltraumlabor 192
Commander Data 36
Conway Morris, Simon 206

Deardorff, James 172
Dekoheränz 74 ff.
Demokrit 89
Determinismus 66
Diego, José de 103
Don-Quijote-Mission 181,233
Doppelspalt-Experiment 65,70
Doppler-Effekt 100
Drake, Frank; Drake-Gleichung 196 ff.
Dröscher, Walter 135
Dunkle Energie 50 ff., 159 ff.
Dunkle Materie 50,165 ff.
Dürr, Detlef 70

Eddington, Arthur 23
Ehman, Jerry 202
Einstein, Albert 12,17,26, 32, 36, 65, 70, 88,94, 108, 115, 124,137, 161
Einstein-Podolsky-Rosen-Effekt 141
Elektromagnetische Kraft 25,90
Endknall 47

Program 97, 135

Erdbahnkreuzer 231 Heisenberg, Werner 56,66,77, Ereignishorizont 107 219 Escher, M.C. 15,58 Heisenberg-Kompensator 81 Eta Carinae 226 Heraklit 56 Herman, Robert 18 Everett, Hugh 36 Herodes 240 Fargion, Daniele 235 Himmelsphänomene 239 ff. Fermi, Enrico; Fermi-Paradox 171,187 Hintergrundstrahlung 19 ff., 32,142 Ferrari d'Occhieppo, Konradin 242 Horror vacui 143 Fischer, Ernst Peter 56 Horvat, Marko 197 Flandern, Tom van 212 Hoyle, Fred 20 ff., 215 Fleischmann, Martin 153 Hubble Deep Field 19 Forward, Robert 146 Hubble, Edwin 18,125,159 Frampton, Paul 164 Hubble-Konstante 32 Fried, Josef 246 Hubble-Volumen 32 ff., Friedmann, Alexander 17 Hubble-Weltraumteleskop 19 Frost, Robert 47 Huygens, Christiaan 86 Fusion 143 Hypernova 222 ff. Hyperraum 39ff., 134 Galle, Johann 212 Gammastrahlenausbruch 222,227 Inflaton 43,142 Gamow, George 18 ff. Giotto di Bondone 240 Jane, Fred T. 79 GLAST-Satellit 169 Jets 21,109,222 Gliese 581 c 204 ff. Jupiter 241 Gluon 91,95 Gödel, Kurt 57,125 Kavitation 155 Gold, Thomas 20 Kepler, Johannes 241 Goldstein, Sheldon 70 Kerr, Roy 109,126 Gott, John Richard 14 Komet 67P/Churyumov-Gerasi-Gravitation 93 ff. menko 237 Gravitationsreibung 23 Komet Levy-Shoemaker 9 235 Gravitationswellen 22,94,219 Konfigurationsraum 116 Graviton 91,95 Königskonjunktion 241 Greulich, Otto 86 ff. kosmische Inflation 41 ff., 142 Guth, Alan 41 ff. kosmische Strings 127 kosmischer Horizont 31,42 Haisch, Bernhard 96 ff., 172 Kosmologische Konstante 26, 32, Halleyscher Komet 240 43,161 Hanson, Robin 217 Krauss, Lawrence 81 ff., 136 Harpern, Paul 126 Kreationisten 28 Häuser, Jochem 135 Kuiper-Gürtel 103 Hawking, Stephen 11,36 ff., 77,112, 123 Lamb, Willis 145 Lamb-Verschiebung 145 Hawking-Strahlung 112

Heim, Burkhard 134

Laplace, Pierre 107

Register

Laughlin, Robert 23 ff., 53 ff.
Lemaitre, Georges 17 ff., 161
Lesch, Harald 200 ff.
Leukipp 89
LHC 58,62, 168,229
Licht, Lichtgeschwindigkeit 12,
85 ff., 131 ff.
Lieu, Richard 24
Lisi, Garrett 58
Li-Xin Li 14
Lowell, Percival 212

M 87 (Riesengalaxie) 21 Maccabee, Bruce 172 Mach, Ernst 96 Magnetar 221 Markopoulou, Fotini 70 Mars 183 ff. Massendichte 47 ff. Massenträgheit 96 ff. McKay, Christopher 185 Membrantheorie 39,62 Micheil, John 107 Milgrom, Mordehai 102 Minor Planet Center 235 Mond 244 ff. Moravec, Hans 217 Multiversum 14, 29, 41 ff., 45

Narlikar, Jayant 21
Neptun 212 ff.
Neutronenstern 107,170,222
Newton, Isaac 36, 86, 93, 96,103,
115,124
Nibiru 210
Nimtz, Günter 128,138 ff.
Nunez, Dario 103

Oort, Jan 165 Ordovizium 223 Orion-Transportkapsel 178 Ozonschicht 223

Paralleluniversen 39,129 Parr, Andy 244

Pascal, Blaise 144 Penrose, Roger 27,69 Penzias, Arno 19 Peregrinus, Petrus 149 Phantomenergie 51,163 Pilotwelle 70 Pioneer-Sonden 99 ff., 213 Planck, Max 70 Planck-Länge 13,71,91 Planck-Volumen 13 ff., 92 Planck-Zeit 71,119 Planet X 210 ff. Piaton 56 Pluto 212 Polzik, Eugene 81 Pons, Stanley 153 Präonen 169 Preskill, John 112 Priester, Wolfgang 11 Protonenzerfall 49 Puthoff, Harald 172

Quantenfluktuationen 43
Quantengravitation 13,61
Quantenmechanik 26,53,65,219
Quantenschaum 32,40
Quantentheorie 13, 37,162
Quarks 91
Quasar 218
Quaternionen 69
Quintessenz 50 ff., 162

Raumfahrt 171 ff.
Realität 73 ff.
Rees, Martin 47,201
Relativitätstheorie 11,17, 32, 42, 50, 53,61,94, 108, 116, 124, 137, 161
Rosen, Nathan 132
Rosetta-Sonde 237
Rotverschiebung 18
Rovelli, Carlo 120
Rubin, Vera 165

Sagan, Carl 135,202,237 Saturn 241 ff.

Schleifen-Quantengravitation 13 ff., Torelli, Evangelista 144 71,91,118 fr. Tunneleffekt 45,128,138 Schöp flingsfeld 21 Turyschew, Slava 104 Schrödinger, Erwin 37,74 ff. Schrödingers Katze 38,74 ff. UFOs 173 ff. Schwache Kraft 90 Ulysses-Sonde 101 Unschärferelation 77,81,140,219 Schwarze Löcher 11,39,48,96, 106 ff., 166, 219, 222 ff. Uranus 212 ff. Schwarzschild, Karl 108 Urknall 11 ff., 20 ff., 25, 31,44, 48, 52 Shoemaker, Eugene 235 Urschwung 12 Shostak, Seth 208 Singularität 1 Iff., 52 Vakuum, Vakuumenergie 38 ff., 43, Sitchin, Zecheria 213 50, 96 ff., 143 ff., 162 Slipher, Vesto 17 Venus 186 Smolin, Lee 14, 39, 70 ff., 119 Verrier, Urbain Le 212 Smolle, Josef 248 Verschränkung 67 ff. Spaarnay, Marcus 145 Vielwelten-Theorie 36 ff., 129 Spiegeluniversum 14 Vilenkin, Alex 43 Standish, Miles 213 Virgo-Galaxienhaufen 21 Starke Kraft 25,90,95 Von-Neumann-Sonden 175 Star Trek 36 ff., 79 ff., 131 Steady-State-Theorie 20 ff. Walter, Ulrich 200 ff. Steorn 149 Ward, Peter 199 Warp-Faktoren 131 Stringtheorie 28, 39, 60 ff. Supernova 21, 48 ff., 106,160, Watson, Greg 150 Wellenfunktion 88 222,241 Welle-¹Teilchen-Dualismus 75,85 Supersymmetrie 167 Weltformel 13,53 ff., 61 ff., 67, 120 Sutton Harrington, Robert 213 Wheeler, John Archibald 76 ff., 108 Szabo, Leslie 148 WIMP 167 Szpak, Stanislaus 156 Witten, Edward 62 WMAP-Sonde 22 ff., 33,161,166 Tachyonen 128,133,148 Woodrow, Robert 19 Taleyarkhan, Rusi 154 Wow-Signal 202 Tegmark, Max 34 Wunder, Edgar 247 ff. Teleportation 81 ff. Wurmloch 38 ff., 132 Teller, Edward 232 Temponauten 122 Terraforming 183 ff. Zavala, Jesus 103 Tesla, Nikola 150 Zeilinger, Anton 57,66,81 ff., 112 fHooft, Gerard 67 ff Zeit 115 ff. Thorne, Kip 111 ff., 123 Zeitreisen 122 ff. Tipler, Frank 127 Zeitschleife 14

Zubrin, Robert 185

Zwicky, Fritz 23,165

Zulley, Jürgen 249

Tochteruniversen 38

Tombaugh, Clyde 212

Topologie des Universums 32



Die Vermessung der Welt als Forschungsabenteuer

Wird die perfekte Messung je gelingen? Sind Intelligenz, Gewissen oder Liebe messbar? Welche Auskunft geben uns Messergebnisse?

Die Forscherin Lorie Karnath und der Wissenschaftshistoriker G. Terry Sharrer erzählen die faszinierende Geschichte des Maßnehmens – zu Land, in der Seefahrt, in der Luft und im Universum. Sie berichten von den frühesten Versuchen, Zeit, Länge, Volumen, Temperatur zu bestimmen, und über moderne Messverfahren der Physik und Chemie. Sie geben spannende Antworten auf Fragen, die unsere tägliche Wahrnehmung von Zeit und Raum prägen.

256 Seiten, ISBN 978-3-7766-2580-6 Herbig

Lesetipp

BUCHVERLAGE
LANGENMÜLLER HERBIG NYMPHENBURGER
www.herbig.net