

DAS EXPANDIERENDE UNIVERSUM

Zu allen Zeiten hat der Anblick des nächtlichen Himmels die Menschen fasziniert. Die Betrachtung der hellen Lichtpunkte der Sterne am schwarzen Firmament ist auch schon eine erste und einfache kosmologische Beobachtung. Warum ist der Himmel zwischen den Sternen dunkel? Wenn sich die Sterne gleichförmig und unveränderlich ohne Ende ins All erstrecken würden, so träfe der Blick schließlich in jeder Richtung auf einen Stern und der ganze Himmel wäre so hell wie die Oberfläche der Sonne. Diese schlichte Tatsache heißt »Olbers'sches Paradoxon«, obwohl sie weder von Olbers stammt noch paradox ist.

Schon Johannes Kepler hatte 1610 bemerkt, dass die Dunkelheit des Nachthimmels einigen älteren Vorstellungen vom Weltenbau, insbesondere dem Weltbild Giordano Brunos, widerspricht. Später wurde seine Überlegung mehrfach wiederholt, auch 1823 von dem Bremer Arzt und Astronomen Heinrich Wilhelm Olbers. Interessanterweise wurde aber zu Anfang des 20. Jahrhunderts dieses Argument nicht beachtet. Damals glaubten alle Astronomen an eine statische Welt. Selbst Albert Einstein versuchte zunächst aus seiner Theorie ein derartiges Modell abzuleiten.

Wir wissen heute, dass die Welt nicht statisch ist, dass alle Sterne vor endlicher Zeit entstanden sind und wieder vergehen. Deshalb trifft unser Blick in vielen Richtungen nicht auf einen Stern und der Nachthimmel erscheint dunkel.

In dunklen Nächten, weitab von der Lichterfülle der Städte, können wir das helle Band der Milchstraße sehen, wie es sich über den Himmel zieht – Milliarden von Sternen, die alle ihre Energie verströmen. Eigentlich können wir mit dem bloßen Auge, dem »unbewaffneten« Auge, wie sich militante Astronomen ausdrücken, nur etwa tausend

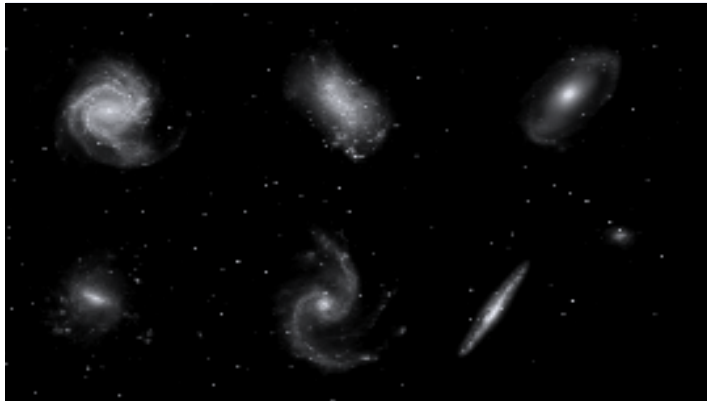


Abb.1: Einige Spiralgalaxien, die unterschiedlich zur Blickrichtung orientiert sind, erscheinen als Scheibe oder nur als leuchtende Kante.

unserer nächsten Sternnachbarn sehen. Aber bewaffnet mit einem Teleskop erkennen wir mehr und wir sehen auch, dass es neben der Milchstraße viele verschwommene Lichtflecken am Himmel gibt, die sich bei näherem Hinsehen als Sternsysteme wie unsere Milchstraße, als »Galaxien«, zeigen.

Galaxien

Die Galaxien – riesige Systeme aus Sternen, Gas und Staub – sind die Bausteine des Universums, zumindest des Teils, der unserer Beobachtung zugänglich ist (Abb. 1). Im Reich der Galaxien wurden für unser Weltbild entscheidende Entdeckungen gemacht. Unsere Milchstraße besteht aus etwa 100 Milliarden Sternen und erstreckt sich über riesige Distanzen. Die Astronomen verwenden als Messlatte nicht mehr das Meter, sondern die Laufzeit des Lichts: Von der Sonne zur Erde braucht das Licht 8 Minuten. Diese Entfernung von 144 Millionen Kilometern entspricht also dem Entfernungsmaß von

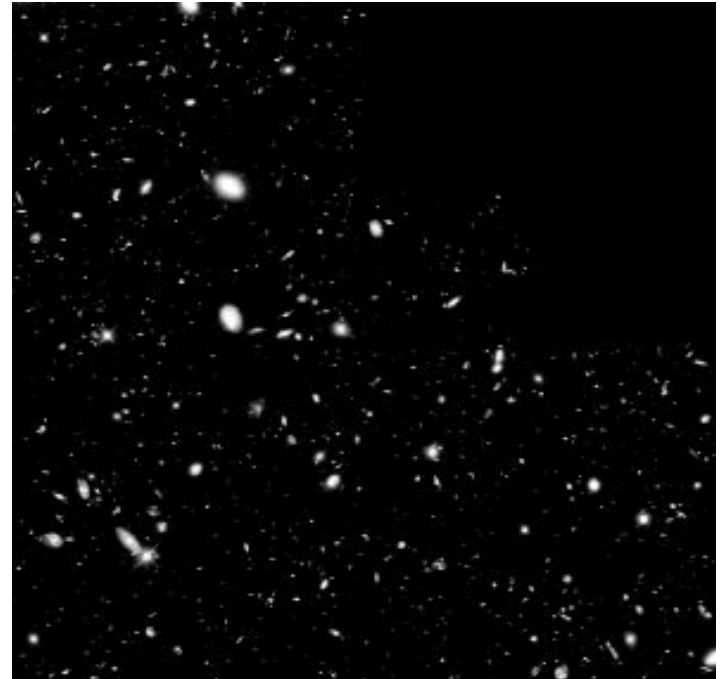


Abb.2: Ein winziger Ausschnitt (etwa eine Bogenminute zum Quadrat, d.h. 25 Milliardenstel) des Himmels, den das Weltraumteleskop Hubble (kurz HST) 10 Tage lang beobachtete, um auch noch die lichtschwächsten Galaxien zu finden.

8 Lichtminuten. Um ein Sternsystem wie unsere Milchstraße zu durchqueren, braucht das Licht etwa 100 000 Jahre. Im Schnitt sind Galaxien etwa eine Million Lichtjahre voneinander entfernt. Ausgehend von Beobachtungen wie der in Abb.2 gezeigten Aufnahme des Weltraumteleskops Hubble, kommen die Astronomen zu der Vermutung, dass der beobachtbare Bereich etwa zehn Milliarden Galaxien enthält. Jede einzelne Galaxie mit ihren Milliarden von Sternen ist für sich ein interessantes System, doch in der Erforschung des Kos-

mos wird sie wie ein Testteilchen betrachtet, das nur dazu dient, gewisse, vielleicht vorhandene, globale Eigenschaften aufzuzeigen.

Das moderne Bild vom Kosmos ruht im Wesentlichen auf zwei fundamentalen Beobachtungen, der Entdeckung des amerikanischen Astronomen Edwin P. Hubble, dass sich fast alle fernen Galaxien von uns wegbewegen, und der Messung eines kosmischen Strahlungsfeldes im Mikrowellenbereich durch Arno Penzias und Robert Wilson im Jahre 1964. Die Entdeckung Hubbles im Jahr 1929 veränderte das Bild der Welt dramatisch: Die Vorstellung einer gleichmäßigen, unveränderlichen Verteilung von Sternen bis in unendliche Tiefen musste aufgegeben werden zugunsten des Konzepts eines Universums der Entwicklung und Veränderung, wie es das auseinander fliegende, expandierende System der Galaxien darstellt.

Die astronomischen Beobachtungen dieser Expansion führen zur Bestimmung einer charakteristischen Zeitspanne von 15 Milliarden Jahren. Vor 15 Milliarden Jahren waren die auseinander fliegenden Galaxien dicht beisammen. Die Temperatur der kosmischen Mikrowellenstrahlung, die jetzt etwa 2,7 Kelvin beträgt, war in der Vergangenheit im weniger ausgedehnten Kosmos höher. Diese beiden fundamentalen Beobachtungen führen nahezu zwangsläufig zu dem Schluss, dass es einen heißen dichten Frühzustand des Universums gegeben hat, in dem die Galaxien und Sterne, die wir jetzt sehen, in einem nur wenig strukturierten, heißen und dichten Gemisch aus Strahlung und Materie aufgelöst waren.

Modellvorstellungen

Das expandierende Universum lässt sich in mathematischen Modellen beschreiben, die sich als einfache Lösungen der Einstein'schen Gravitationstheorie ergeben. Es gibt eine ganze Reihe von Modellen, die im Einklang mit den astronomischen Messungen sind. Trotzdem sprechen die Astronomen von einem »Standard-Urknallmodell«, im

Sinne einiger typischer Eigenschaften, die alle diese Modelle gemeinsam haben: Das Universum hat sich nach einer explosionsartig schnellen Ausdehnung zu Anfang durch eine heiße und dichte Frühphase zum gegenwärtigen Zustand entwickelt. Es sieht in jedem Punkt und in allen Richtungen gleich aus, abgesehen von Unregelmäßigkeiten auf kleinen Skalen. Galaxien und Galaxienhaufen haben sich aus anfänglich kleinen Dichteschwankungen durch die Wirkung der Schwerkraft gebildet. Die Keime dieser Schwankungen sind auch als Unregelmäßigkeiten der kosmischen Mikrowellenstrahlung vorhanden, so wie sie etwa 400 000 Jahre nach dem Urknall der Strahlung und Materie eingepreßt waren.

Neueste Messungen an Supernovae, explodierenden Sternen in fernen Galaxien, erbrachten zusätzlich den Hinweis, dass die Expansion gegenwärtig sogar beschleunigt verläuft, angetrieben von einer kosmischen Abstoßung, einer positiven »kosmologischen Konstanten«. Dies bedeutet, dass die Ausdehnung des Weltalls unumkehrbar für alle Zeit weitergehen wird.

Im Standardmodell beginnt das Universum mit einer Urexplosion von unendlicher Dichte, Temperatur und unendlich großem Anfangsschwung. Diese Anfangssingularität entzieht sich einer Beschreibung mit den Begriffen und Gesetzen der uns bekannten Theorien. Der Urknall ereignete sich nicht an einem bestimmten Punkt, sondern überall. Doch kurz nach dem Urknall, etwa 1 Sekunde später, gilt wohlbekannte Physik, und das weitere Verhalten des Universums lässt sich in einem konsistenten Standardmodell beschreiben.

Hier sei noch ein Zeitrafferbild geschildert, das die zeitliche Entwicklung des Kosmos veranschaulichen soll:

Ein Zeitrafferbild

Drängen wir die Geschichte des Universums auf ein Jahr zusammen. Jeder Monat in diesem Bild entspricht in Wirklichkeit einer Milliarde

Jahre. Stellen wir uns vor, mit dem Glockenschlag zum neuen Jahr entstehe auch unsere Welt im Urknall. Der Urstoff, eine Strahlung, die den ganzen Raum gleichmäßig und mit ungeheurer Dichte und Temperatur erfüllte, besaß noch keine Struktur, aber durch den Schwung der geheimnisvollen Urexplosion dehnte er sich überall gegen seine eigene Schwerkraft aus und kühlte sich dabei ab. Schon in einem winzigen Bruchteil der ersten Sekunde des ersten Januar entstand die Materie: die Elementarteilchen und gleich darauf die einfachsten Atomkerne, Wasserstoff und Helium. Noch vor Ende Januar entkoppelten Strahlung und Materie und die Galaxien bildeten sich. Die ersten Sterngenerationen in den Galaxien erzeugten in ihrem Inneren die höheren chemischen Elemente und schleuderten sie – zum Teil in Staubform – bei ihrer Explosion in das umgebende Gas. Kohlenstoff entstand sehr häufig, und auf Staubkörnern in der Nähe von Sternen formten sich komplizierte organische Moleküle, die heute durch radioastronomische Beobachtungen nachweisbar sind.

Mitte August ging aus einer zusammenstürzenden Wolke von Gas und Staub unser Sonnensystem hervor. Schon nach einem Tag war die Sonne in ihrem heutigen Zustand und versorgte ihre Planeten mit einem ziemlich konstanten Strahlungsstrom mit einer Temperatur von etwa 6000 Grad. Da der übrige Himmel dunkel und kalt war, konnte die Erde die zugestrahlte Energie bei viel tieferer Temperatur wieder abstrahlen. So erschienen auf der Erde zuerst komplizierte chemische, dann biologische Strukturen. Von Mitte September stammen die ältesten Gesteine der Erdoberfläche, und in ihnen finden sich offenbar schon die ersten Spuren von Leben: fossile Einzeller. Bereits von Anfang Oktober stammen fossile Algen, und im Laufe von zwei Monaten entstand nun zunächst in den Gewässern eine ungeheure Vielfalt von Pflanzen und Tierarten. Die ersten Wirbeltierfossilien datieren wir auf den 16. Dezember. Am 19.12. besiedelten die Pflanzen die Kontinente. Am 20.12. waren die Landmassen mit Wald bedeckt, das Leben schuf sich selbst eine sauerstoffreiche Atmo-

sphäre, die das ultraviolette Licht zurückhielt und somit noch komplexere und empfindlichere Formen des Lebens ermöglichte. Am 22. und 23. Dezember entstanden aus Fischen amphibische Vierfüßler und eroberten feuchtes Land. Aus ihnen entwickelten sich am 24. Dezember die Reptilien, die auch das trockene Land besiedelten. Am 25.12. erschienen die ersten Säugetiere. In der Nacht zum 30.12. begann die Auffaltung der Alpen. In der Nacht zum 31.12. entsprang der Menschenzweig dem Ast, von dem ein weiterer Zweig zu den heutigen Menschenaffen führt. Mit etwa 20 Generationen pro Sekunde begann nun der Mensch seine Entwicklung. Fünf Minuten vor zwölf lebten die Neanderthaler, 15 Sekunden vor zwölf wurde Jesus Christus geboren, eine halbe Sekunde vor zwölf begann das technische Zeitalter. Schon sind wir im neuen Jahr.

DIE AUSDEHNUNG DES WELTALLS

Das Hubble'sche Gesetz

Hubble hatte mit dem neuen 2,5 m Teleskop auf dem Mt. Wilson in den Jahren 1923 und 1925 so genannte Cepheiden in verschiedenen »Nebelflecken« (wie M31 und M33) entdeckt. Diese Cepheidensterne können zur Messung kosmischer **Entfernungen** benützt werden, denn sie verändern ihre Helligkeit rhythmisch, d.h. sie pulsieren mit einer Periode von einigen Stunden bis zu Tagen. Man weiß: Je langsamer sie pulsieren, desto größer ist ihre Leuchtkraft. Die auf der Erde gemessene Helligkeit des Sterns ist die Leuchtkraft geteilt durch das Quadrat der Entfernung. Da Cepheiden mit derselben Pulsperiode dieselbe Leuchtkraft haben, kann man aus der Messung ihrer Helligkeit ihre Entfernungen bestimmen, falls man einige Kandidaten mit genauer Entfernung kennt, um die Beziehung festzulegen – zu eichen, wie die Astronomen sagen.

fundamentalen Quantenfeldtheorie und den damit verbundenen Phasenübergängen, tatsächlich konnte aber bisher kein Modell dieser Art konsistent formuliert werden.

Das »inflationäre Modell« des Universums löst auch nicht wirklich das Problem des einzigartigen Anfangszustandes. Es postuliert stattdessen eine statistische Verteilung von Konfigurationen. Leider ist es bis jetzt auch nicht gelungen, nichtsymmetrische Startbedingungen wirklich rechnerisch in ihrer Entwicklung zu beschreiben. Nach wie vor müssen – zwar nur in einem kleinen Gebiet – sehr präzise bestimmte Bedingungen erfüllt sein. Der Startwert des Skalarfeldes muss ad hoc – als Anfangsbedingung – eingesetzt werden. Er bestimmt aber entscheidend den Verlauf der Inflation.

Eine ganz fundamentale Schwierigkeit betrifft schließlich die Vakuumenergiedichte der Skalarfelder, die im frühen Universum dynamisch wirksam ist und die inflationäre Expansion antreibt. Das Problem kann man sich mit einer einfachen Abschätzung verdeutlichen: Fassen wir die aus den CMB-Schwankungen erschlossene »Dunkle Energie« als Vakuumenergiedichte auf, so erreicht diese etwa 70% der kritischen Dichte. Die Energiedichte des falschen Vakuums in der Inflationsepoche ist aber um 120 Zehnerpotenzen größer.

Natürlich darf auch das Vakuum der Quantentheorien, die die starke, schwache oder elektromagnetische Wechselwirkung beschreiben, nicht gravitativ wirksam sein. Die typischen Energiedichten sind so groß, dass sich unmittelbar Widersprüche zu den astronomischen Beobachtungen ergäben. Versucht man etwa – wie Wolfgang Pauli um 1920 – die Nullpunktenergie des elektromagnetischen Feldes als kosmologisch bedeutsame Energiedichte zu betrachten, so erhält man aus den Gleichungen ein Modell des Universums, dessen Ausdehnung kleiner ist als die Entfernung von der Erde zum Mond. Dies zeigt, wie schwierig dieses Problem ist.

Man kann mit Recht fragen: Warum sollte das Vakuum jetzt nicht gravitativ wirksam sein, aber in einer frühen kosmischen Phase die

Entwicklung bestimmt haben? Eine Antwort auf diese Frage brächte sicher einen wesentlichen Fortschritt in unserem Verständnis vom Anfang der Welt.

WELTENTSTEHUNG

Die Möglichkeiten der Physik

In der Theorie des frühen Universums können wir mit einiger Sicherheit nur die physikalischen Prozesse beschreiben, die später als eine Sekunde nach dem Urknall abliefen. Alle früheren Zeitpunkte sind allein der mehr oder weniger gut begründeten spekulativen Überlegung zugänglich. Wir haben diskutiert, welche Möglichkeiten sich ergeben, wenn versucht wird, bestimmte theoretische Überlegungen der Quantentheorie mit dem frühesten Zustand des Kosmos zu einem konsistenten Bild zusammenzufügen. Allerdings wird auch in diesen Überlegungen nach wie vor der singuläre Beginn ausgeklammert und dem Urknall werden bestimmte Bedingungen für die Struktur der Materie und Strahlung unterstellt, die letztendlich zum heute beobachteten Zustand der Welt führen sollen. Die Frage des Physikers nach der Weltentstehung ist also im Wesentlichen die Frage, welche Anfangsbedingungen gestellt werden müssen. Die Welterklärung erscheint umso überzeugender, je weniger derartige Bedingungen notwendig sind, oder je allgemeiner der Anfangszustand charakterisiert werden kann. Auch das Modell des inflationären Universums in seinen verschiedenen Spielarten geht von bestimmten Anfangskonfigurationen aus. Eine wesentliche Voraussetzung ist ja, dass Inflation überhaupt stattfinden kann. Dies ist gewiss nicht für beliebige Anfangszustände möglich.

Im frühesten Universum bei extrem hohen Dichten, Temperaturen und Raumkrümmungen müssen nicht nur Quanteneigenschaften der Materie in Betracht gezogen werden, auch das ganze Universum

selbst wird in einem gewissen (im Augenblick noch etwas verschwommenen) Sinn ein Quantenobjekt. Nur eine übergeordnete Theorie, die Quantenmechanik und Gravitation umfasst, erlaubt weitergehende Aussagen über den Anfang des Universums.

In dieser Situation, in der die Physik zunächst an Grenzen stößt, wurde versucht, weitergehende Einsichten in die Struktur des Kosmos zu gewinnen aus Argumenten, die die Bedingungen für die Entstehung von Leben unserer Art im Universum diskutieren. Einige dieser Gesichtspunkte werden üblicherweise unter der Bezeichnung »Anthropisches Prinzip« zusammengefasst werden.

Das anthropische Prinzip

Es gibt in unserer Welt eindrucksvolle Beispiele für numerische Feinabstimmungen, deren Zusammenwirken Leben von unserer Art (auf Kohlenstoff basierend) möglich macht.

So kann die Stärke der anziehenden Kernkräfte gerade die elektrische Abstoßung zwischen den positiv geladenen Protonen in den Kernen gewöhnlicher Atome, wie Sauerstoff oder Eisen, überwinden. Die Kernkraft ist aber nicht ganz so stark, dass sie zwei Protonen (Wasserstoffkerne) in ein gebundenes System bringen kann; das »Diproton« gibt es nicht. Falls jedoch die Anziehung der Kernkräfte nur ein wenig größer wäre, könnte das Diproton existieren, und praktisch der gesamte Wasserstoff im Kosmos hätte sich zu Diprotonen oder größeren Kernen gebunden. Wasserstoff wäre ein seltenes Element und Sterne wie die Sonne – die durch langsame Fusion von Wasserstoff zu Helium in ihrem Inneren lange Zeit Energie erzeugen – könnte es nicht geben.

Andererseits würden wesentlich schwächere Kernkräfte die Fusion von Wasserstoff unmöglich machen. Falls die Entwicklung des Lebens einen Stern wie die Sonne erfordert, die mit einer konstanten Rate über Milliarden Jahre hinweg Energie erzeugt, dann ist eine notwen-

dige Voraussetzung dafür, dass die Stärke der Kernkräfte innerhalb ziemlich enger Grenzen liegt.

Eine ähnliche, aber unabhängige numerische Feinabstimmung betrifft die Schwache Wechselwirkung, die tatsächlich die Wasserstoff-Fusion in der Sonne steuert. Die Schwache Wechselwirkung ist etwa eine Million Mal schwächer als die Kernkraft, gerade so schwach, dass der Wasserstoff in der Sonne langsam und gleichmäßig verbrennt. Falls die Schwache Wechselwirkung wesentlich stärker oder schwächer wäre, gäbe es Probleme für jede Art von Leben, das von sonnenartigen Sternen abhängt.

Eine weitere numerische Zufälligkeit betrifft die mittlere Entfernung zwischen den Sternen, die in unserer galaktischen Umgebung einige Lichtjahre beträgt. Man kann durchaus behaupten, dass den Sternen ein entscheidender Einfluss auf das menschliche Leben zukommt, ohne ein Anhänger der Astrologie zu sein. Wir hätten nämlich keine großen Überlebenschancen, wenn die mittlere Entfernung zwischen den Sternen beispielsweise 10-mal kleiner wäre. Dann ergäbe sich eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass im Verlauf der vergangenen 4 Milliarden Jahre ein anderer Stern nahe genug gekommen wäre, um die Planetenbahnen zu verändern. Es würde schon genügen, die Erde in einen mäßig exzentrischen elliptischen Umlauf zu bringen, um Leben auf ihr unmöglich zu machen.

Man könnte viele weitere glückliche Zufälle dieser Art aufzählen: Eine empfindliche Balance zwischen elektrischen und quantenmechanischen Kräften bewirkt die Vielfalt der organischen Chemie. Wasser ist flüssig, Ketten von Kohlenstoffatomen bilden komplexe organische Moleküle, Wasserstoffatome bilden Brückenbindungen zwischen den Molekülen.

Diese bemerkenswerte Harmonie zwischen der Struktur des Universums und den Bedürfnissen von Leben und Intelligenz aufzuzeigen, ist das Anliegen, das als »schwaches anthropisches Prinzip« formuliert wurde. Dies ist einfach die Feststellung, dass unsere Existenz

nur unter gewissen Bedingungen möglich ist. Man sollte sich aber davor hüten, diese anregenden Betrachtungen als »Prinzip« im Sinne einer physikalischen Erklärung anzuwenden. Besonders aber die Vorstellung einer zielgerichteten Entwicklung, die auf die Entstehung menschlichen Lebens eingestellt ist, wie es das so genannte »starke anthropische Prinzip« aussagt, führt sicher zu weit. Tatsächlich drehen die »Erklärungen« des starken anthropischen Prinzips den Kausalzusammenhang um. Der zeitliche Ablauf und der Zusammenhang von Ursache und Wirkung sind eben so, dass gewisse Feinabstimmungen notwendig sind für die Existenz von Leben. Der Schluss gilt aber nicht in umgekehrter Richtung. Das »schwache anthropische Prinzip« dagegen zeigt nur einige der Relationen auf, ohne die das Leben nicht entstehen könnte. Es erklärt nicht, sondern weist darauf hin, dass in einigen Punkten Erklärungsbedarf besteht.

Es ist auch nicht ausgeschlossen, dass durch die Weiterentwicklung der Physik viele dieser Relationen als zwangsläufige Folge grundlegender physikalischer Gesetze erkannt werden. Das Standardmodell der elektroschwachen Theorie zeigt durchaus einen Weg, wie das Verhältnis der elektromagnetischen und der schwachen Kräfte, das wir jetzt beobachten, auf ein fundamentales, beide einschließendes Naturgesetz zurückgeführt werden kann. Herleitungen dieser Art, wenn auch wesentlich spekulativer, gibt es ebenfalls in den GUT (den »großen vereinheitlichten«) Theorien. Wir sind mit der physikalischen Erklärung noch nicht am Ende angelangt. Es wäre ja auch vermessen zu glauben, dass gerade jetzt alle Naturgesetze bekannt und verstanden sind. Man sollte diese anthropischen Argumente als Hinweise auf Erklärungslücken sehen und sich bemühen, in diesen Punkten Fortschritte zu erzielen.

Das von Andrei Linde entworfene Bild eines Universums aus vielen Blasen, die nicht kausal verknüpft sind und in denen jeweils verschiedene physikalische Gesetze, verschiedene Naturkonstanten wirken könnten, wäre ein zumindest logisch möglicher Abschluss

dieser Erklärungsversuche: Unter der Vielzahl möglicher Blasen gibt es eben eine, die genau die richtigen Voraussetzungen zur Entstehung von Leben bietet. Wie es unter vielen Millionen Lottospielern einen oder mehrere gibt, die 6 »Richtige« tippen, so findet sich zufällig auch einmal die richtige Kombination von Naturgesetzen und Naturkonstanten in einem Blasenuniversum. Aber ist das nicht ein bisschen viel Aufwand – Milliarden von Universen blähen sich auf und vergehen, und dadurch wird es möglich, dass auf einem kleinen Planeten am Rande einer Galaxis Leben entstehen kann?

Diese Erklärung scheint mir, abgesehen von den Schwierigkeiten, sie präzise zu beschreiben, unbefriedigend, weil ich doch gerne wüsste, ob diese vielen Möglichkeiten nicht vielleicht durch noch nicht gefundene physikalische Gesetze eingeschränkt werden, ob nicht letzten Endes doch ein fundamentales, alles umgreifendes Gesetz eindeutig zu einem physikalisch bestimmten Universum führt.

Die Auswahl des Anfangszustands

Thermodynamische Überlegungen sprechen dafür, dass der Anfangszustand der Welt sehr gleichmäßig und einheitlich strukturiert war, dass er nicht einem chaotischen Beginn entsprechen kann. Bei diesen Überlegungen spielt der Begriff der »Entropie« eine wichtige Rolle. Aus unserer Alltagserfahrung wissen wir, dass viele Vorgänge nicht umkehrbar sind: Ein Glas Wasser, das vom Tisch zu Boden fällt und zerbricht, zeigt das normale und erwartete Verhalten. Dagegen würde uns die Umkehrung, bei der sich die Glassplitter und das zerflossene Wasser wieder sammeln und in der ursprünglichen Form auf dem Tisch aufbauen würden, sicher sehr verblüffen. Die Gesetze der Mechanik lassen diese Umkehrung der zeitlichen Entwicklung als mögliche Lösung zu. Tatsächlich aber geschehen die Dinge von selbst immer so, dass ein geordneter Zustand in einen ungeordneten Zustand übergeht. Die »Entropie« wird als Maß für die Unordnung