

Gott erschuf die Welt ...und niemand sah zu: Physik angesichts der Einmaligkeit des Urknalls

Gert-Ludwig Ingold

Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Ingold, Gert-Ludwig. 2005. "Gott erschuf die Welt ... und niemand sah zu: Physik angesichts der Einmaligkeit des Urknalls." In *Im Anfang war der Urknall!? Kosmologie und Weltentstehung: Naturwissenschaft und Theologie im Gespräch*, edited by Hanspeter Heinz, Manfred Negele, and Manfred Riegger, 23–40. Regensburg: Pustet.

Nutzungsbedingungen / Terms of use:

licgercopyright

Dieses Dokument wird unter folgenden Bedingungen zur Verfügung gestellt: / This document is made available under these conditions:

Deutsches Urheberrecht

Weitere Informationen finden Sie unter: / For more information see:

<https://www.uni-augsburg.de/de/organisation/bibliothek/publizieren-zitieren-archivieren/publiz/>



Gott erschuf die Welt ... und niemand sah zu

Physik angesichts der Einmaligkeit des Urknalls

Gert-Ludwig Ingold

1. Anfang ohne Zeugen

„... die große Verlegenheit, die Gott der Wissenschaft bereitet, besteht darin, daß er nur ein einzigesmal gesehen worden ist, und das bei der Erschaffung der Welt, ehe noch geschulte Beobachter da waren.“¹

Mit diesen Worten weist Robert Musil in seinem Roman *Der Mann ohne Eigenschaften* durch die Hauptfigur Ulrich auf eine Schwierigkeit hin, die für den Naturwissenschaftler entsteht, wenn es um die Anfänge des Universums geht. Ist es sinnvoll, über einen Vorgang nachzudenken, der nicht direkt beobachtet wurde?

Selbst wenn beim Urknall Zuschauer zugegen gewesen wären, so hätte es sich doch um ein einmaliges Ereignis gehandelt. Hieraus ergibt sich ein weiteres Problem, auf das Musil ebenfalls hinweist:

„Was etwas gelten soll und einen Namen tragen, das muss sich wiederholen lassen, muss in vielen Exemplaren vorhanden sein, und wenn du noch nie den Mond gesehen hättest, würdest du ihn für eine Taschenlampe halten; ...“²

Wie kommen wir mit der fehlenden Reproduzierbarkeit zurecht? Selbst wenn das Universum zyklisch wäre, sich also in ferner Zukunft zusammenzöge, um in einem weiteren Urknall wieder neu zu entstehen, würde uns das heute nichts nützen. Kann die Entstehung unseres Universums angesichts dieser Probleme, die die Fundamente einer beobachtenden Wissenschaft berühren, überhaupt Gegenstand physikalischer Forschung sein? Im Folgenden sollen einige Facetten dieses Problems diskutiert werden.³

Das Unterfangen, sich dem Urknall aus physikalischer Sicht zu nähern, ist keineswegs aussichtslos, wie schon die Tatsache beweist, dass der Nobelpreisträger für Physik des Jahres 1979, Steven Weinberg, ein Buch mit dem Titel *The First Three Minutes* verfasst hat, in dem es gerade um die ersten drei Minuten des Universums geht. Genau genommen beginnt Weinbergs Schilderung zwar erst eine hundertstel Sekunde nach dem Urknall, aber diese Beschränkung ist nur durch den Stand des damaligen Wissens bedingt und wird in keiner Weise ausgenutzt, um die angesprochenen, grundsätzlichen Probleme zu umgehen. Offenbar kann man sehr wohl in physikalisch sinnvoller Weise über den Ursprung der Welt nachdenken, auch wenn Weinberg zugibt:

„I cannot deny a feeling of unreality in writing about the first three minutes as if we really know what we are talking about.“⁴

Als Physiker werden wir vielleicht nie mit Sicherheit wissen, was beim Urknall wirklich passiert ist, aber das hindert uns nicht daran, ein auf Beobachtungen und geeignete Theorien gestütztes, plausibles Bild davon zu entwerfen, wie es wohl gewesen sein muss.

2. Der Blick zurück

Nachdem wir daran, dass die Entstehung unseres Universums nicht unmittelbar beobachtet wurde, nichts mehr ändern können, müssen wir heute versuchen, diesen Mangel durch möglichst umfangreiche indirekte Beobachtungen zu beheben. Je zahlreicher und je verschiedenartiger diese sind, umso eher werden wir in der Lage sein, konkurrierende theoretische Vorstellungen zu beurteilen und Modelle, die nicht im Einklang mit der Realität stehen, zu identifizieren und zu verbessern oder zu verwerfen.

Will man etwas über die Geschichte des Universums in Erfahrung bringen, so liegt es zunächst nahe, auf astronomische Beobachtungen zurückzugreifen. Schließlich waren es Messungen an den Spektren anderer Galaxien, aus denen Edwin Hubble 1929 schloss, dass das Universum nicht statisch ist, sondern sich im Laufe der Zeit ausdehnt. Lässt man umgekehrt die zeitliche Entwicklung in Gedanken rückwärts laufen, so sollte sich das Universum immer weiter zusammenziehen, bis es

schließlich in einem Punkt konzentriert ist. Ein solches Szenario war bereits einige Jahre vor Hubbles Beobachtung auf der Basis von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie von Alexander Friedmann in einer damals wenig beachteten Arbeit theoretisch beschrieben worden.

Die Beobachtung von Sternen oder Galaxien in den Tiefen des Weltalls ist immer eine Reise in die Vergangenheit. Die Vorgänge, die wir heute auf der Erde beobachten können, haben sich in den meisten Fällen vor sehr langer Zeit abgespielt, da das Licht, das wir empfangen, sich zwar schnell, aber nicht unendlich schnell ausbreitet. Selbst vom Andromeda-Nebel, einer Galaxie in unserer Nachbarschaft, ist das Licht bereits zwei Millionen Jahre unterwegs. Unter Umständen existiert ein beobachtetes astronomisches Objekt heute schon gar nicht mehr. Obwohl uns räumlich sehr weit entfernte Objekte auch zeitlich weit zurückblicken lassen, sehen wir dabei nur ein Stadium des Universums, in dem sich aus der ursprünglich im Wesentlichen homogenen Materieverteilung bereits Sterne gebildet hatten. Zu diesem Zeitpunkt war das Universum möglicherweise schon eine Milliarde Jahre alt, vielleicht auch nur hundert Millionen Jahre. Auf jeden Fall war die Frühphase kurz nach dem Urknall schon lang Geschichte.

Wie schon Galilei dreihundert Jahre zuvor, beobachtete Hubble im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums, wenn auch mit erheblich verbesserten Methoden. Neben dem großen Teleskop des Mount Wilson Observatoriums standen ihm die spektroskopischen Methoden zur Verfügung, die seit dem 19. Jahrhundert entwickelt worden waren. Die technologischen Fortschritte in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts führten dazu, dass die Astronomen heute nicht länger auf den sichtbaren Bereich des Spektrums beschränkt sind, sondern Beobachtungen vom kurzwelligen Röntgenbereich mit Hilfe von Satelliten bis hin zu den langwelligen Radiowellen durchführen können. Damit ist uns heute praktisch das gesamte elektromagnetische Spektrum zugänglich. Wir werden später jedoch sehen, dass es in Zukunft vielleicht möglich sein wird, noch eine Strahlung ganz anderer Art aus dem Weltall zu empfangen und damit weitere wertvolle Informationen über die Anfangsphase des Universums zu gewinnen.

Beschäftigen wir uns zunächst aber noch etwas mehr mit dem, was uns die elektromagnetische Strahlung über die Anfänge des Universums verrät. Im Jahre 1964 wurde zum ersten Mal ein Blick zurück in jene Zeit

geworfen, als noch keine Sterne entstanden waren. Arno Penzias und Robert Wilson beobachteten mit einem eigentlich für die Satellitenkommunikation gedachten Radioteleskop ein unerwartetes Mikrowellensignal, dessen Ursprung sie im Weltall ausmachten. Zwei Eigenschaften machen dieses Signal besonders bemerkenswert: Es kommt nicht von einer lokalisierten Quelle, z.B. einer fernen Galaxie, sondern gleichmäßig aus allen Richtungen des Weltalls. Außerdem entspricht die Abhängigkeit der Intensität dieser Strahlung von der Frequenz mit sehr hoher Genauigkeit dem, was man für die Abstrahlung eines Körpers mit einer Temperatur von knapp drei Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt erwartet. Man spricht daher auch von der Drei-Kelvin-Hintergrundstrahlung.

Diese Hintergrundstrahlung ist ein Relikt aus einer Zeit etwa 400.000 Jahre nach dem Urknall. Vor dieser Zeit bestand das Universum aus einem Plasma freier geladener Teilchen, vor allem Elektronen und Protonen, die mit den Photonen, also den Quanten des elektromagnetischen Feldes – den Lichtteilchen –, ständig wechselwirkten. Dies hatte zur Konsequenz, dass sich die Photonen nicht sehr weit frei bewegen konnten und dass sie die gleiche Temperatur wie das Plasma hatten. Die Situation änderte sich jedoch, als die durch die Expansion des Universums sinkende Temperatur etwa 4000 Grad erreicht hatte und Elektronen und Protonen zu neutralen Wasserstoffatomen zusammenfanden. In dieser Zeit entkoppelten die Photonen, so dass wir noch heute elektromagnetische Strahlung aus dieser Phase des Universums beobachten können. Tatsächlich sollte es nicht erstaunen, dass Licht praktisch ungestört das Weltall durchqueren kann. Andernfalls wäre es nicht möglich, astronomische Objekte in den Tiefen des Universums zu beobachten. Seit der Entkopplung von der restlichen Materie ist die einzige Veränderung, die die Photonen der Hintergrundstrahlung erfahren haben, eine Abkühlung aufgrund der Ausdehnung des Universums. So beobachten wir heute eine Strahlung mit einer Temperatur knapp über dem absoluten Nullpunkt, die uns ein Abbild des Weltalls in einem relativ frühen Stadium zeigt.

Aus diesem Grunde wurde die Drei-Kelvin-Hintergrundstrahlung in den letzten 15 Jahren sehr detailliert vermessen.⁵ Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperatur der Strahlung, wenn man die Bewegung der Erde herausrechnet, äußerst isotrop, also in allen Richtungen gleich, ist. Dieser Befund rechtfertigt zumindest für die Frühphase des Universums die Verwendung des bereits erwähnten Modells von Friedmann für die Expansion

des Weltalls, das auf einer homogenen Materieverteilung basiert. Andererseits gibt es winzige Fluktuationen der Temperatur der Hintergrundstrahlung in der Größenordnung von einem hundertstel Promille, die auf Inhomogenitäten der Materie zum Zeitpunkt der Entkopplung der Photonen hinweisen. Solche Unregelmäßigkeiten könnten die Ausgangsbasis für die spätere Strukturbildung im Universum gewesen sein.

Die Möglichkeit, einen Blick auf das Weltall im Alter von einigen Hunderttausend Jahren werfen zu können, ist jedoch nur die eine Seite der Entkopplung der Photonen von der restlichen Materie. Die andere Seite der Medaille ist, dass das Universum vor diesem Zeitpunkt für elektromagnetische Strahlung undurchsichtig war. Ist uns also die Sicht auf unser eigentliches Ziel, den Urknall, versperrt?

Nicht unbedingt. Einen Ausweg könnten Gravitationswellen bieten, die nur äußerst schwach mit der Materie im Universum wechselwirken. Diese Wellen werden gemäß der Vorhersage von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie abgestrahlt, wenn sich Massen in geeigneter Weise beschleunigt bewegen. Dieser Vorgang hat große Ähnlichkeit mit der Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen durch eine Antenne, in der Ladungen eine oszillierende Bewegung ausführen.

Bis heute sind Gravitationswellen noch nicht direkt nachgewiesen worden. Hier erweist sich ihre nur sehr schwache Ankopplung an Materie als Nachteil. Es gibt jedoch indirekte Nachweise, so dass kaum an ihrer Existenz gezweifelt wird. Gegenwärtig sind mehrere Experimente im Aufbau oder in der Planung, die in der Lage sein sollten, Gravitationswellen nachzuweisen.⁶ Auf dieser Grundlage ließe sich eine Gravitationswellenastronomie entwickeln, deren Aufgabe unter anderem die Untersuchung einer entsprechenden Hintergrundstrahlung wäre. Solche Beobachtungen könnten Aufschluss über eine sehr frühe Phase des Universums geben. Auch wenn dies im Moment alles noch Zukunftsmusik ist, so sind Resultate denkbar, die unsere Vorstellungen vom Urknall eventuell entscheidend beeinflussen werden.

3. Physik jenseits der Alltagserfahrung

Neben den astronomischen Beobachtungen, von denen bis jetzt die Rede war, gibt es noch einen vollkommen anderen Zugang, der uns Einblicke

in die Natur des Urknalls und der sich daran anschließenden Vorgänge geben kann. Wie wir am Beispiel der Drei-Kelvin-Hintergrundstrahlung gesehen haben, geht die Expansion des Universums mit einer Abkühlung einher. Lassen wir die Zeit rückwärts laufen, so nimmt daher die Temperatur und damit auch die Energiedichte im Universum immer mehr zu. Nun folgt aber aus der speziellen Relativitätstheorie die Möglichkeit der Umwandlung von Materie in Energie und umgekehrt. Dies ist gerade der Inhalt von Einsteins berühmter Formel $E=mc^2$. Prozesse, in denen aus Energie Elementarteilchen erzeugt oder Elementarteilchen ineinander umgewandelt werden, sollten somit kurz nach dem Urknall eine wichtige Rolle gespielt haben.

Solche Prozesse finden heute routinemäßig in den großen Elementarteilchenbeschleunigern statt, wo zum Beispiel Protonen oder Elektronen mit sehr großer Energie zur Kollision gebracht werden und dabei andere Elementarteilchen erzeugt werden. Die Vorgänge im frühen Universum lassen sich also zumindest teilweise im Labor nachvollziehen. Aus einem einmaligen Ereignis vor langer Zeit wird so ein reproduzierbarer Vorgang in der Gegenwart.

Je weiter unser Verständnis der Elementarteilchen zu hohen Energien reicht, umso weiter können wir in die Vergangenheit des Universums zurückblicken, und genau dies hat Steven Weinberg erlaubt, über die ersten drei Minuten zu schreiben. Da die Elementarteilchenbeschleuniger immer nur eine begrenzte Energie zur Verfügung stellen können, bleibt uns experimentell ein sehr kurzer Zeitraum nach dem Urknall notwendigerweise verschlossen. Dies hindert theoretische Physiker jedoch nicht daran, Vorstellungen über die Physik bei noch höheren Energien zu entwickeln. Ist es nicht etwas verwegen, ohne Rückhalt durch das Experiment in solche Bereiche vorzudringen? Können wir überhaupt hoffen, ein physikalisches Verständnis in immer mikroskopischeren Dimensionen zu erreichen und damit letztlich vielleicht auch den Anfang des Universums zu verstehen?

In der Bibel finden wir hierzu im Buch Kohelet die Worte:

„Gott hat das alles zu seiner Zeit auf vollkommene Weise getan. Überdies hat er den Menschen eine Vorstellung von der Ewigkeit eingegeben, doch ohne dass der Mensch das Tun, das Gott getan hat, von seinem Anfang bis zu seinem Ende wieder finden könnte.“ (Koh 3,11; Einheitsübersetzung)

Lässt man die Geschichte der Physik Revue passieren, so kommt man zum Schluss, dass wir noch keineswegs an den Grenzen der physikalischen Erkenntnis angelangt sind.

Nachdem sich im frühen 17. Jahrhundert die Idee durchgesetzt hatte, die Vorgänge in der Natur mathematisch zu beschreiben, wurde im Laufe von drei Jahrhunderten eindrucksvoll nachgewiesen, dass ein solcher Zugang für die Alltagswelt tatsächlich möglich ist. Vielleicht ist es letztlich gar nicht so erstaunlich, dass intelligente Lebewesen im Laufe der Zeit adäquate Methoden entwickeln, die ein Verständnis ihrer Umwelt und insbesondere auch präzise Vorhersagen erlauben.

Weniger offensichtlich mag es erscheinen, dass eine solche Beschreibung der Natur auch noch funktioniert, wenn die Alltagserfahrung nicht mehr als Grundlage dienen kann und unter Umständen schon eine geeignete Begriffsbildung Schwierigkeiten bereitet. Doch bereits im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts drang die Physik mit drei Theorien erfolgreich in solche Bereiche vor. Mit der Quantenmechanik wurde eine Theorie der mikroskopischen Welt entwickelt, deren Interpretation zwar für lang anhaltende Debatten sorgte, deren Vorhersagen aber vollkommen in Einklang mit den experimentellen Beobachtungen stehen. Einsteins spezielle Relativitätstheorie wird erst bei extrem hohen Geschwindigkeiten relevant, wo zum Beispiel das selbstverständlich erscheinende Konzept der Gleichzeitigkeit hinterfragt werden muss. Die allgemeine Relativitätstheorie schließlich ist in erster Linie auf kosmischen Skalen von Bedeutung, ihr Verständnis erlaubt aber unter anderem erst die korrekte Funktion des GPS-Navigationssystems.⁷

In welchem erstaunlichem Maße diese Theorien erfolgreich sind, sei anhand der Quantentheorie kurz illustriert. Die grundlegenden Aspekte der endgültigen Theorie stammen aus der Zeit um 1925 und waren für die Beschreibung einzelner Teilchen entwickelt worden. Zehn Jahre später wurde entdeckt, dass die Quantentheorie, angewandt auf mehrere Teilchen, eine merkwürdige Kopplung zwischen zwei Teilchen zulässt, für die Erwin Schrödinger den Begriff „Verschränkung“ prägte.⁸ Dabei kann die Manipulation des einen Teilchens den Zustand des anderen, eventuell sehr weit entfernten Teilchens beeinflussen. Diese, der Intuition widersprechende, nichtlokale Eigenschaft war für Einstein ein Grund, an der Vollständigkeit der Quantentheorie zu zweifeln.

Man könnte nun erwarten, dass eine durch Verschränkung verursachte instantane Wirkung über große Distanzen zu einem Problem zum Beispiel mit der speziellen Relativitätstheorie führt, die einen Informationsaustausch maximal mit Lichtgeschwindigkeit erlaubt. Allerdings zeigt sich, dass hier kein Widerspruch besteht und dass die Verschränkung auch innerhalb der Quantentheorie keine Probleme aufwirft. Obwohl also das Konzept der Verschränkung ursprünglich nicht in die Theorie eingebaut war, hat sie dort in ganz natürlicher Weise ihren Platz. Eine solch bemerkenswerte innere Konsistenz ist sicherlich ein wesentliches Merkmal für die Qualität der Theorie, ganz abgesehen davon, dass ohne das durch die Quantentheorie erzielte Verständnis die vielfältigen technischen Fortschritte des 20. Jahrhunderts nicht denkbar gewesen wären. Eine mathematische Beschreibung der Welt jenseits der Alltagserfahrung ist also zweifelsohne möglich.

4. Die vier Wechselwirkungen

Die schon angesprochenen Prozesse der Erzeugung und Vernichtung von Elementarteilchen im frühen Universum können beschrieben werden, wenn man die Quantentheorie mit der speziellen Relativitätstheorie verknüpft. Um eine Vorstellung von den Fortschritten der Elementarteilchenphysik und den noch offenen Herausforderungen, die die Vorgänge beim Urknall sehr direkt betreffen, zu bekommen, müssen wir uns etwas mit den fundamentalen Wechselwirkungen beschäftigen.⁹ Zwei dieser Wechselwirkungen sind schon lange bekannt, da sie auch über sehr große Distanzen wirken können und daher auch im Alltagsleben bemerkbar werden. Dies ist zum einen die Gravitation, die Newtons Apfel zu Boden fallen ließ, die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne hält und auch die Dynamik von Materie auf kosmischen Skalen bestimmt. Dennoch ist die Gravitation die mit Abstand schwächste der vier Wechselwirkungen.

Die andere aus dem Alltag bekannte Wechselwirkung ist die elektromagnetische Wechselwirkung, die die Kraft zwischen elektrischen Ladungen bestimmt und um ein Vielfaches stärker als die Gravitation ist. Allerdings gibt es auf großen Distanzen keine elektrisch geladenen Regionen, so dass für die globale Bewegung der Materie im Kosmos die Gravitation dennoch dominiert.

Die elektromagnetische Wechselwirkung war die erste der fundamentalen Wechselwirkungen, die im Rahmen einer Elementarteilchentheorie beschrieben wurde. Bei der Entwicklung dieser so genannten Quantenelektrodynamik war es von Vorteil, dass die Wechselwirkung zwischen elektrischen Ladungen auf der Basis der klassischen Physik bereits gut verstanden war. Wesentlich für die weitere Entwicklung der Theorie der Elementarteilchen erwies sich die Tatsache, dass am Beispiel der elektromagnetischen Wechselwirkung ein abstraktes, auf Symmetrieargumenten beruhendes Prinzip gefunden wurde, mit dessen Hilfe sich eine Wechselwirkung in die Theorie einbauen lässt. Auf diese Weise konnten Theorien für weitere fundamentale Wechselwirkungen entwickelt werden, obwohl die klassische Physik dabei nicht mehr zur Unterstützung herangezogen werden konnte.

Ein weiterer glücklicher Umstand ist die Tatsache, dass die elektromagnetische Wechselwirkung zwar viel stärker als die Gravitation, dennoch aber verhältnismäßig schwach ist. Dadurch ist es möglich, die Wechselwirkung als Störung aufzufassen und ihre Auswirkungen mit sehr großer Genauigkeit zu berechnen. Hochpräzisionsmessungen machen so die Quantenelektrodynamik zu der experimentell am besten überprüften Theorie. Damit bestätigt sich, dass eine mathematische Beschreibung der Natur auch weit jenseits der Alltagserfahrung möglich ist.

Neben der Gravitation und der elektromagnetischen Wechselwirkung gibt es noch zwei weitere fundamentale Wechselwirkungen. Die so genannte schwache Wechselwirkung ist zum Beispiel für eine bestimmte Art des radioaktiven Kernzerfalls, den Betazerfall, verantwortlich, während die starke Wechselwirkung die Stabilität von Atomkernen ermöglicht. Beide Wechselwirkungen wirken nur auf sehr kurzen Entfernungen, so dass sie im Alltag nicht unmittelbar in Erscheinung treten. Nach dem Erfolg der Quantenelektrodynamik bestand die nächste Etappe darin, für die schwache Wechselwirkung eine entsprechende Theorie zu entwickeln. Dabei stellte sich heraus, dass eine mit den experimentellen Beobachtungen verträgliche Theorie sowohl die elektromagnetische als auch die schwache Wechselwirkung umfassen muss und die beiden im Rahmen einer vereinheitlichten elektroschwachen Wechselwirkung beschreibt.

Auch die starke Wechselwirkung, die stärkste der vier Wechselwirkungen, lässt sich zu dieser Theorie hinzufügen, so dass wir heute drei

der vier fundamentalen Wechselwirkungen auf einer gemeinsamen Basis beschreiben können, dem so genannten Standardmodell der Teilchenphysik. Viele experimentelle Befunde weisen darauf hin, dass diese Theorie eine korrekte Beschreibung der Elementarteilchen bis zu den heute in Elementarteilchenbeschleunigern erreichbaren Energien liefert. Allerdings steht vor allem der Nachweis des so genannten Higgs-Teilchens, das in der Theorie eine Schlüsselrolle bei der Erklärung der Masse der Elementarteilchen spielt, zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch aus, so dass Überraschungen nicht ausgeschlossen werden können.

Wenn das Standardmodell den experimentellen Test vollständig bestehen sollte, so sind wir keineswegs schon am Ziel angelangt, denn bis jetzt steht die Gravitation noch abseits. Das Traumziel wäre aber eine Vereinheitlichung aller vier fundamentalen Wechselwirkungen. Abgesehen davon, dass eine solche Theorie als eine Art Weltformel die Basis für die gesamte Physik bilden könnte, gibt es zwei weitere Gründe, die diesen Schritt in unserem Zusammenhang besonders interessant machen. Zum einen sollte es diese Theorie erlauben, das Geschehen praktisch unmittelbar am Urknall zu erfassen, und zum anderen wird durch sie die Anzahl an grundlegenden Parametern, die die Vorgänge in der Natur bestimmen, festgelegt.

Eine vereinheitlichte Beschreibung der Gravitation und der anderen drei Wechselwirkungen erfordert eine quantenmechanische Beschreibung der Gravitation. Aus dieser Überlegung kann man bereits abschätzen, wann eine solche Theorie überhaupt von Bedeutung sein wird, nämlich auf den so genannten Planck-Skalen. Daraus folgt, dass die quantenmechanische Beschreibung der Gravitation nur unter sehr exotischen Bedingungen relevant sein wird, und der Urknall war eben eine solch exotische Situation. Die Planck-Länge beispielsweise ist unvorstellbar klein: Im Verhältnis zum Durchmesser eines Haares ist sie so klein wie der Durchmesser eines Haares im Verhältnis zum Durchmesser des sichtbaren Universums. Die quantenmechanische Beschreibung der Gravitation wird also nur auf Längen benötigt, die um viele Größenordnungen kleiner als ein Atomkern sind. Die Zeit, die das Licht benötigt, um die Planck-Länge zu durchlaufen, die so genannte Planck-Zeit, ist ebenfalls von extremster Kürze. Aber zur Beschreibung einer Zeit von der Größenordnung der Planck-Zeit nach dem Urknall benötigt man eine Quantentheorie der Gravitation, vielleicht auch noch etwas länger,

aber das spielt bei der Kleinheit der Planck-Zeit keine wesentliche Rolle. Umgekehrt übersteigen die Energien, um die es dann geht, die in den größten Beschleunigern zugänglichen Energien um etwa zwanzig Größenordnungen. Ein direkter experimenteller Nachweis der Richtigkeit einer vereinheitlichten Theorie aller Wechselwirkungen erscheint daher äußerst unwahrscheinlich, aber es ist durchaus denkbar, bei wesentlich niedrigeren Energien indirekte Hinweise zu finden.

Eine quantenmechanische Beschreibung der Gravitation zu finden, hat lange Zeit große Schwierigkeiten bereitet. Im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie werden die Effekte der Gravitation auf die Geometrie der Raum-Zeit abgebildet. Für die konventionelle Theorie der Elementarteilchen stellt eine vorgegebene Raum-Zeit den Hintergrund dar, vor dem sich die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen abspielen. Soll eine vereinheitlichte Theorie auch die Gravitation umfassen, so wird die Raum-Zeit selbst zu einem quantenmechanischen Objekt. Es ist daher wahrscheinlich, dass unsere konventionellen Vorstellungen von Raum und Zeit direkt am Urknall keine Gültigkeit hatten. Zumindest muss man sich von der Vorstellung verabschieden, dass das Universum aus einem Punkt entstanden ist. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, dass das Universum eine Vorgeschichte vor dem Urknall hat und dass es unter Umständen sogar möglich ist, die Existenz des Vorgängeruniversums nachzuweisen.¹⁰ Eine Möglichkeit hierfür könnte eine zukünftige Gravitationswellenastronomie bieten.

Ein vielversprechender Kandidat für die vereinheitlichte Theorie, aus der sich die ganze Physik ableiten können soll, ist die Stringtheorie.¹¹ Weltweit arbeiten theoretische Physiker und Mathematiker an diesem äußerst anspruchsvollen Projekt. Angesichts der zumindest zur Zeit fehlenden Anbindung an das Experiment demonstriert dies eine bemerkenswerte Zuversicht in die Fähigkeit, eine Theorie alleine auf der Basis der existierenden Erfahrung mit Quantentheorie sowie spezieller und allgemeiner Relativitätstheorie zu konstruieren. Ob eines Tages überzeugende Belege für die Richtigkeit der Theorie gefunden werden, wird sich noch zeigen müssen. Daher wird gelegentlich statt experimenteller Evidenz als Argument für die Richtigkeit der ultimativen physikalischen Theorie gefordert, dass diese sich als die einzig mögliche Theorie erweisen muss.

Bis jetzt haben wir argumentiert, dass uns die Elementarteilchenphysik bei hohen Energien Aufschluss über die Vorgänge im frühen Universum geben kann. Damit wäre immerhin schon für Zeiten kurz nach dem Urknall die Möglichkeit experimenteller Untersuchungen gegeben. Aber ist eigentlich garantiert, dass die physikalischen Gesetze wie wir sie heute kennen und beobachten schon zu Beginn des Universums gültig waren? Ist also anzunehmen, dass die Prozesse in den heutigen Elementarteilchenbeschleunigern tatsächlich etwas mit den Vorgängen im frühen Universum zu tun haben?

5. Vielleicht war früher alles anders

Diese Frage bringt uns zurück zu dem anfangs angesprochenen Problem, dass beim Urknall keine Beobachter zugegen waren. Prinzipiell kann wohl nicht ausgeschlossen werden, dass die Physik zu Zeiten des Urknalls eine ganz andere war, das Szenario aber so geschickt aufgebaut ist, dass wir unseren Irrtum durch Beobachtungen nicht aufdecken können. Nimmt man diesen Standpunkt ein, so kann man von Seiten der Physik sofort aufhören, über den Urknall nachzudenken. Angesichts der bis jetzt so erfolgreichen Naturbeschreibung durch die Physik erscheint es aber gerechtfertigt, einen optimistischeren Standpunkt einzunehmen. Man kann hoffen, dass eine physikalische Theorie, die im Einklang mit den experimentellen Beobachtungen steht, für alle Zeiten gültig ist. Damit ist nicht grundsätzlich ausgeschlossen, dass es zeitliche Änderungen in den physikalischen Gesetzen gibt, aber solche Änderungen sollten im Rahmen einer umfassenderen Theorie beschrieben werden können. Dies setzt voraus, dass uns die Natur mit ausreichenden Hinweisen versorgt, die uns die Konstruktion einer solchen Theorie erlauben.

Die ewige Gültigkeit der physikalischen Gesetze wird keineswegs stillschweigend vorausgesetzt. So wird seit einiger Zeit der Frage nachgegangen, ob die Naturkonstanten vielleicht gar nicht so konstant sind, wie wir im Allgemeinen annehmen, sondern ob sie sich vielleicht im Laufe der Zeit verändert haben. Dabei steht die Feinstrukturkonstante, die die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung angibt, im Mittelpunkt des Interesses, nachdem astronomische Beobachtungen an Quasaren Hinweise auf eine zeitliche Änderung dieser Größe ergeben

hatten. Inzwischen hat man die Feinstrukturkonstante mit einer ganzen Reihe verschiedener Methoden auf eine zeitliche Variation in verschiedenen Entwicklungsphasen des Universums hin untersucht.¹² Mit Hilfe von hochpräzisen Atomuhren lässt sich herausfinden, ob sich die Feinstrukturkonstante zur Zeit noch ändert. Eine Möglichkeit, in die Vergangenheit zu blicken, bietet ein natürlicher Kernreaktor, der in Gabun vor etwa zwei Milliarden Jahren aktiv war. Die heute vorgefundene Gesteinszusammensetzung lässt auf den Ablauf der damaligen Kernprozesse schließen, der wiederum von der Feinstrukturkonstante abhängt. In ähnlicher Weise kann man auch die Zusammensetzung von Meteoriten und die Häufigkeit leichter Atomkerne im Universum analysieren. Lediglich eine Quasarbeobachtung hat bis jetzt ein Resultat ergeben, das auf eine zeitliche Änderung der Feinstrukturkonstanten schließen lässt. Ob es sich hier um einen echten Effekt handelt, müssen weitere Beobachtungen entscheiden. Es gibt jedenfalls bereits Vorstellungen, wie man eine solche zeitliche Variation in die bestehenden Theorien einbauen könnte.

Die Feinstrukturkonstante ist nur einer von mindestens 19 Parametern, die das bereits erwähnte Standardmodell der Elementarteilchen charakterisieren. Im Rahmen des Modells sind die Werte dieser Parameter nicht festgelegt, sie müssen aus dem Experiment bestimmt werden. Sind einige dieser Parameterwerte aus einer fundamentaleren Theorie erklärbar? Wie viel Parameter bleiben letztendlich unerklärbar, charakterisieren also unser Universum und hätten vielleicht auch andere Werte annehmen können?

6. Das Universum – für den Menschen gemacht?

Das Bestreben des Physikers ist es natürlich, möglichst wenig freie Parameter in einer Theorie zu haben, um ein möglichst vollständiges Verständnis der Natur zu erreichen. Eine vereinheitlichte Beschreibung aller fundamentalen Wechselwirkungen sollte eine Theorie liefern, aus der sich zumindest einige Parameter des einfacheren Standardmodells herleiten lassen. Andererseits könnte es auch dann noch Parameter geben, deren Wert nicht erklärbar ist oder in einem Zufallsprozess festgelegt wird. In diesem Falle wäre unser Universum nicht das einzig denk-

bare, und man könnte sich sogar vorstellen, dass tatsächlich noch weitere Universen mit anderen Eigenschaften existieren. Solche Szenarien werden von einigen spekulativen Theorien beschrieben, bei denen schwarze Löcher die Verbindung zu anderen Universen herstellen oder unser Universum aus Domänen mit verschiedenen Eigenschaften besteht. Nachdem bis jetzt noch keine Anzeichen für eine solche Domänenstruktur festgestellt wurden, müssten diese Bereiche größer als das für uns beobachtbare Universum sein.

Wie wir im Folgenden sehen werden, hat die Antwort auf die Frage, wie viel freie Parameter das Universum besitzt und ob es eventuell mehr als ein Universum im gerade geschilderten Sinne gibt, erhebliche Konsequenzen für das Selbstverständnis des Menschen.

Nachdem wir uns bei der bisherigen Diskussion auf die Eigenschaften der Elementarteilchen und ihre Rolle im frühen Universum konzentriert haben, wollen wir zunächst noch eine weitere, ganz wesentliche Eigenschaft unserer Welt betrachten, die uns vielleicht viel zu selbstverständlich ist. Wir leben in einem dreidimensionalen Raum, der zusammen mit der Zeitkoordinate zur vierdimensionalen Raum-Zeit der speziellen Relativitätstheorie wird. Andererseits weisen die Versuche, die Gravitation mit den anderen drei Wechselwirkungen zu vereinheitlichen, darauf hin, dass man höherdimensionale Räume annehmen muss. Dabei sind einige Dimensionen auf die Größe der Planck-Länge eingerollt und für uns daher de facto nicht sichtbar. Auf diese Weise ergibt sich dann effektiv unser dreidimensionaler Raum. Es ist also vorstellbar, dass der Raum nicht zwingend dreidimensional sein muss, sondern dass die Dimensionalität des Raumes eine Eigenschaft ist, die erst in einer extrem frühen Phase des Universums festgelegt wurde.

Es mag erschreckend wirken, dass das Universum unter Umständen ganz anders aussehen könnte, als wir es gewohnt sind, und nicht ohne Grund: Intelligentes Leben, zumindest in der Form wie wir es kennen, kann es nur in dreidimensionalen Räumen geben. In einem zweidimensionalen Raum würde die Nahrungsaufnahme und -verarbeitung wie beim Menschen, also mittels eines durchgehenden Systems aus Mund, Speiseröhre, Magen und Darm, das Lebewesen in zwei unzusammenhängende Teile aufspalten. Während sich hierfür noch eine Lösung finde ließe, ist nicht zu erwarten, dass eine zweidimensionale Vernetzung von Zellen die für intelligentes Leben notwendige Komplexität eines Ge-

hirns erlaubt. Auch das System des Blutkreislaufs wäre in einem zweidimensionalen Raum in der uns vertrauten Form nicht möglich.

Die Unmöglichkeit von Leben in vier und mehr Raumdimensionen hat dagegen einen viel fundamentaleren Grund: Im Gegensatz zum dreidimensionalen Raum kann es hier keine stabilen Planetenbahnen geben. Es mag sein, dass diese Argumente zu sehr von unserer Vorstellung von intelligentem Leben geprägt sind. In jedem Falle wären aber vernunftbegabte Lebewesen in Räumen mit mehr oder weniger als drei Dimensionen radikal verschieden von den uns vertrauten Lebensformen.

Wenn die Anzahl der Raumdimensionen eine so entscheidende Rolle für unsere Existenz spielt, muss man sich fragen, wie es sich mit den vorher im Zusammenhang mit dem Standardmodell der Elementarteilchen erwähnten Parametern verhält. Auch wenn es auf den ersten Blick unwahrscheinlich klingen mag, dass die Stärke der fundamentalen Wechselwirkungen maßgeblich die Möglichkeit von Leben in einem Universum beeinflusst, so ist dies dennoch der Fall. Schließlich waren die Atome, aus denen wir bestehen, nicht von Anbeginn vorhanden, sondern mussten zunächst durch Kernreaktionen erzeugt werden. Da der Kohlenstoff die leichteste Atomsorte mit einer hinreichend komplexen Chemie ist, um als Basis für Leben dienen zu können, musste seine Erzeugung möglich sein. Andererseits durfte es nicht zu einer praktisch vollständigen Umwandlung in schwerere Atomkerne kommen. Interessanterweise ist es so, dass die Erzeugung von Kohlenstoff in unserem Universum besonders effizient abläuft, während die Umwandlung von Kohlenstoff zum schwereren Sauerstoff erheblich langsamer vonstatten geht.

Eine zentrale Rolle bei solchen Überlegungen spielt die starke Wechselwirkung, die für den Zusammenhalt der Kernbausteine verantwortlich ist. Wäre diese Wechselwirkung zu schwach, so könnte schon das Helium, das nach dem Wasserstoff zweitschwerste Element, bereits nicht mehr existieren, von Kohlenstoff ganz zu schweigen. Darüber hinaus würde den Sternen ein Mechanismus zur Energieerzeugung fehlen, der ihre Stabilität zumindest für einige Zeit garantiert. Der entgegengesetzte Fall hätte dazu geführt, dass wesentlich schwerere Elemente gebildet worden wären als dies in unserem Universum der Fall ist, womit es wiederum nicht zu kohlenstoffbasiertem Leben gekommen wäre.

Aber auch die anderen Wechselwirkungsstärken können nicht erheblich verändert werden, ohne die Möglichkeit von Leben im Universum zu gefährden. Die elektromagnetische Wechselwirkung beispielsweise spielt eine wichtige Rolle bei der chemischen Bindung. Wäre diese Wechselwirkung wesentlich schwächer, so könnten sich keine Moleküle bilden, während der umgekehrte Fall wiederum die Existenz von schweren Atomkernen verhindern würde. Von der Stärke der schwachen Wechselwirkung hängt es ab, ob Sterne, die zuvor schwere chemische Elemente synthetisiert haben, als Supernova explodieren und so diese Elemente in das Weltall verteilen können. Da es keinen anderen Mechanismus der Elementsynthese gibt, stehen nur auf diese Weise die chemischen Elemente zur Verfügung, die für das Entstehen von Leben erforderlich sind. Schließlich spielt auch die Gravitation eine Rolle, da sie wohl für die Entwicklung von Materiehäufungen im Universum verantwortlich war und so erst die Bildung von Sternen ermöglichte. Andererseits hätte eine zu starke Gravitation die Bildung von Planeten verhindert.¹³

Wie diese und ähnliche Überlegungen zeigen, ist es keineswegs selbstverständlich, dass sich in einem Universum Leben entwickeln kann. Aus diesem Umstand ergeben sich nun interessante Verbindungen zwischen unserer Existenz einerseits und der ultimativen physikalischen Theorie andererseits. Es wäre zu hoffen, dass sich eine solche Theorie als parameterfrei erweist, also keine Größen mehr enthält, die nur experimentell bestimmt werden können. Dann wäre aus physikalischer Sicht im Prinzip alles verstanden. Ob eine solche Theorie tatsächlich existiert, ist *a priori* allerdings nicht klar.

Ist dies jedoch der Fall, so wäre es denkbar, dass das Universum nur so beschaffen sein kann wie wir es kennen. Dann stellt sich sofort die Frage, warum sich zwingend ein Universum ergibt, in dem Leben möglich ist. Jenseits der Physik könnte man hierauf eine teleologische Antwort geben.

Es ist allerdings durchaus wahrscheinlich, dass selbst eine parameterfreie Theorie noch die Möglichkeit vieler verschiedenartiger Universen enthält. Man kann sich dies wie beim Roulette vorstellen, bei dem die Kugel abhängig von den Anfangsbedingungen in einer der verschiedenen Mulden zu liegen kommt. Im Falle des Universums könnten ebenfalls die Anfangsbedingungen oder aber quantenmechanische Prozesse

zu einem ganz bestimmten Universum aus einer Vielzahl möglicher Universen führen. Dann könnte es sein, dass wir einfach das große Los gezogen haben, indem ein Universum entstand, das unsere Existenz ermöglicht. Wäre ein ganz anderes Universum entstanden, so hätten wir es nie erfahren, da unsere Existenz ausgeschlossen gewesen wäre.

Als weitere Möglichkeit wäre es denkbar, dass unser Universum nicht einzigartig, sondern nur eines von vielen tatsächlich realisierten Universen ist. Es wäre möglich, dass im Laufe der Zeit immer wieder Universen entstehen, die sich in ihren Eigenschaften unterscheiden. Ebenso kann man sich vorstellen, dass unser Universum, das möglicherweise erheblich größer ist als der für uns sichtbare Teil, aus riesigen Domänen mit verschiedenen physikalischen Eigenschaften besteht. In diesem Falle würden wir in einem bestimmten Universum oder einem bestimmten Teilbereich eines Universums leben, weil dort geeignete Bedingungen vorherrschen, so wie das Leben auf der Erde entstand und nicht auf einem anderen Planeten des Sonnensystems wo die Entwicklung von Leben ausgeschlossen war.

Man kann nun versuchen, unsere Existenz in diesem Universum zu verwenden, um dessen Eigenschaften zu begründen. Eine solche Argumentation wird nach Brandon Carter als anthropisches Prinzip¹⁴ bezeichnet, das in einer Reihe verschiedener Varianten existiert. In seiner extremsten Form geht dieses Prinzip davon aus, dass das Universum den Zweck hat, Leben zu beherbergen. Hierbei bewegt man sich jedoch weit jenseits der Grenzen physikalischer Prinzipien. Insbesondere steht eine solche Überlegung im Gegensatz zur Lektion, die uns Kopernikus erteilte, und die dem Menschen eine Sonderstellung im Universum verwehrt. In der Physik hat es sich sehr bewährt, Kopernikus in diesem Punkt zu folgen.

Andererseits ist klar, dass zumindest die Eigenschaften des Universums in dem Bereich, in dem wir uns befinden, unsere Existenz zulassen müssen. Diese triviale Aussage wird interessanter, wenn man unsere Existenz benutzt, um Eigenschaften unseres Universums zu erklären. Obwohl eine solche Argumentation nicht im Widerspruch zum kopernikanischen Prinzip steht,¹⁵ gehen die Meinungen darüber, ob eine solche Art der Erklärung akzeptabel ist, allerdings weit auseinander.

Die Zukunft wird sicherlich weitere Einsichten in die Frühphase des Universums bringen und vielleicht wird man eines Tages wissen, ob

unser Universum ein Unikat ist oder nur eines unter vielen. Die Antwort hierauf wird das menschliche Selbstverständnis möglicherweise revolutionieren. Hält man sich die Entwicklung unseres Verständnisses des Universums im Laufe der letzten vierhundert Jahre vor Augen, so wäre es schon reizvoll zu wissen, was die Physik in vierhundert Jahren zu diesem Thema sagen wird und wie weit wir heute von der Beantwortung einiger der grundlegendsten Fragen entfernt sind.

Anmerkungen

- ¹ R. Musil, *Der Mann ohne Eigenschaften*, Reinbek 2003, erstes Buch, Kapitel 85.
- ² Ebd.
- ³ Für eine kompakte Einführung in die Physik des Urknalls siehe z.B.: H.-J. Blome, H. Zaun, *Der Urknall*, München 2004.
- ⁴ S. Weinberg, *The First Three Minutes*, New York 1993, 9.
- ⁵ Für aktuelle Resultate siehe z.B.: <http://map.gsfc.nasa.gov>.
- ⁶ Siehe z.B.: www.geo600.uni-hannover.de, www.virgo.infn.it, www.ligo.caltech.edu, lisa.jpl.nasa.gov.
- ⁷ Eine Einführung in die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie gibt z.B.: T. Filk, D. Giulini, *Am Anfang war die Ewigkeit*, München 2004.
- ⁸ Für eine kompakte Einführung siehe z.B.: G.-L. Ingold, *Quantentheorie*, München 2002, Kapitel 6.
- ⁹ Für eine kompakte Einführung siehe z.B.: H. Fritzsche, *Elementarteilchen*, München 2004.
- ¹⁰ G. Veneziano, *Die Zeit vor dem Urknall*, in: *Spektrum der Wissenschaft*, August 2004, 30.
- ¹¹ Eine Einführung gibt z.B.: B. Greene, *Das elegante Universum*, Berlin 2002.
- ¹² K. A. Olive, Y.-Z. Qian, *Were Fundamental Constants Different in the Past?*, in: *Physics Today*, Oktober 2004, 40.
- ¹³ J. Demaret, D. Lambert, *Le Principe Anthropique*, Paris 1994, Kapitel 5.
- ¹⁴ J. D. Barrow, F. J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford 1986.
- ¹⁵ S. Roush, *Copernicus, Kant, and the anthropic cosmological principles*, in: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 34 (2003) 5-35.