

<sup>27</sup> L.S. Cordell, Prehistory of the Southwest, San Diego 1984.

<sup>28</sup> M.D. Coe, Mexico, from the Olmecs to the Aztecs, aaO. 29 H.H. Lamb, Klima und Kulturgeschichte, Hamburg 1982.

<sup>30</sup> K.J. Hsu, Sun, climate, hunger, and mass migrations, aaO.

<sup>31</sup> P. Kennedy, Aufstieg und Fall der großen Mächte. Ökonomischer Wandel und militärischer Konflikt von 1500-2000, Frankfurt a.M. 1991.

<sup>32</sup> M.E. Moseley, The Incas, London 1994.

<sup>33</sup> R.A. Bryson/T.J. Murray, Climates of Hunger, Madison, Wisc. 1977; L. Ponte, The Cooling, Englewood, N.J. 1976.

<sup>34</sup> K.J. Hsu, Could global warming be a blessing for mankind?, aaO.; ders., Sun, climate, hunger, and mass migrations, aaO. Der Autor spielt hier u.E. die drängendste Gefahr für unsere Lebensgrundlagen, die Erderwärmung aufgrund des Treibhauseffektes, auf unverantwortliche Weise herunter. Der Hinweis auf die Wärmeperioden in der Vergangenheit trifft den Sachverhalt nicht, da der rasche Anstieg der mittleren Temperatur aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes ein Novum ist. Aus der Fülle von einschlägiger Literatur sei verwiesen auf: J.L. Lozäu/H. Graßl/P. Hupfer/H. Sterr, Warnsignal Klima, Hamburg 1998. (Anm. d. Red.)

Aus dem Englischen übersetzt von Michael Krämer

# Die Zukunft des Universums

Andreas Albrecht / Christopher J. Isham

## 1. Einführung

In der Kosmologie sind viele Dinge gegenwärtig in Bewegung geraten. Auf der einen Seite haben erd- und satellitengestützte Beobachtungsstationen eine Fülle neuer Daten über die genauere großräumige Struktur des Universums geliefert. Auf der anderen Seite hat sich die Theorie in wesentlichen Bereichen weiterentwickelt, vor allem in der Frage, welche Rolle die Elementarteilchenphysik in der Phase unmittelbar nach dem Urknall spielte. Dieses glückliche Zusammentreffen von Tatsachenerkenntnissen und theoretischen Entwicklungen löste bei den Naturwissenschaftlern weltweit noch nie dagewesene enthusiastische Erwartungen aus. Viel wurde über dieses Frühstadium des Universums geschrieben, wie man sich seine Expansion und Entwicklung bis zur Welt, wie wir sie heute kennen, vorzustellen habe. Sogar der Ursprung des Universums ist bis heute Gegenstand intensiver Diskussionen im Kontext einer „Quanten-Kosmologie“ -



einem Mischmasch aus Quantentheorie und Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie, die einer Esoterik alle Ehre macht.<sup>1</sup>

Im Licht dieser intensiven Forschungsbemühungen über den Beginn des Universums überrascht es, daß man so wenig darüber erfährt, wie das ganze einmal enden soll. Bis zu einem gewissen Grad ist diese Zurückhaltung verständlich: Je weiter man in die Zukunft hineinschaut, desto ungewisser werden der Stellenwert und die Aussagekraft unserer heutigen naturwissenschaftlichen Erkenntnisse. Wenn man jedoch über das „Ende der Dinge“ nachsinnt, so kann das tiefgehende Emotionen auslösen, die sich tendenziell mit verschiedenen Aktionsprogrammen verbinden, die mit Wissenschaft nichts zu tun haben, aber um so lautstärker auftreten, je weniger echte Wissenschaft dabei das Wort führt. So hat es zum Beispiel höchst spekulative Mutmaßungen über die Zukunft der Menschheit gegeben - häufig in Form triumphalistischer Erzählungen, wie die Menschheit einmal das gesamte Universum erobern wird.<sup>2</sup> Das andere Extrem sind die apokalyptischen wissenschaftlichen Beschreibungen vom unvermeidlichen Ende der Menschheit, die natürlich implizit all jene auf den Plan rufen, die einen panentheistischen Sinn in einem Universum suchen, das allem Anschein nach, in den Kategorien des Physikalismus ausgedrückt, vom blinden Zufall und vom Gesetz der zunehmenden Entropie beherrscht wird.

Ungeachtet der millenaristischen Tendenzen sogenannter Fin-de-siècle-Wissenschaftler, die sich den Luxus solcher Aktivitäten leisten können, besteht ein klares und nicht geringes Interesse, einmal den Versuch zu machen, im Licht der modernen Kosmologie ausgewogen und wissenschaftlich über die voraussichtliche Zukunft des Universums zu berichten. Dies ist auch das zentrale Anliegen dieses Artikels. Wir werden in seinem Verlauf untersuchen, wo die Grenze zwischen unserem Wissen und Nichtwissen über das Universum verläuft. Alles in allem ist jedoch Mäßigung angesagt, da sich herausstellt, daß wir trotz des rapiden Fortschritts auf diesem Gebiet über keine Informationen verfügen, die klare Vorhersagen über die Zukunft des Universums zuließen. Einige davon dürften wohl frühestens in den nächsten zehn Milliarden Jahren zu erwarten sein.

Was bedeutet es also, die Zukunft des Universums zu erforschen? Sicher, die Aufgabe ist von ganz besonderer Art. Die Naturwissenschaft geht ja methodisch so vor, daß sie zunächst über die Art der Dinge eine Hypothese aufstellt, diese dann entsprechenden Beobachtungen und/oder Experimenten unterzieht, um sie so entweder zu verifizieren oder zu falsifizieren. Das funktioniert auch ganz gut bei Aussagen, die die unmittelbare Zukunft betreffen. In der Tat sind alle Vorhersagen in den Naturwissenschaften üblicherweise Vorhersagen über die nähere Zukunft eines kleinen Teils des Universums; doch es ist klar, daß Behauptungen über sein absolutes Ende mit dieser Methode nicht bewiesen werden können: Für einen Beobachter dieses letzten Ereignisses gäbe es nämlich keine „Zeit danach“ mehr, in der er die notwendigen Berechnungen anstellen könnte, um seine Vorhersagen zu bestätigen oder zu widerlegen; und überhaupt, keiner von uns wird auch nur im entferntesten lang genug leben.

Probleme gibt es aber nicht nur in bezug auf das „Ende“. Wir müssen auch die



Möglichkeit in Betracht ziehen, daß die Gesetze der Physik eine Zeitkomponente enthalten, die wir bis jetzt noch nicht beobachtet haben und die uns daher unbekannt ist. Praktisch können wir eigentlich nur, mehr ist nicht „drin“, von heutigen Daten aus und in heutiger Begrifflichkeit theoretische Extrapolationen anstellen, in der Hoffnung, daß die bestehende Theorie adäquat genug ist, den jeweils gewünschten künftigen Zeitraum abzudecken. Es ist evident, das Problem, auf das wir hier stoßen, hat mit der berüchtigten Schwierigkeit zu tun, wie denn eigentlich die Naturwissenschaft das von ihr angewandte induktive Schlußverfahren ganz allgemein rechtfertigt: Genauer gesagt, müssen wir ja annehmen, daß erstens die grundlegenden mathematischen Gesetze der Physik und die physikalische Begrifflichkeit zeitunabhängig, Vorhersagen aber dennoch nicht möglich sind;<sup>3</sup> und daß zweitens unser gegenwärtiges Verständnis dieser zeitlosen Gesetze ausreicht, um alle Eventualitäten abzudecken, die in der Zukunft auftreten könnten.

Von der theoretischen Physik her gesehen, wäre dieses Problem im Kontext des „Endes der Dinge“ ein wenig leichter, wenn sich die Geschichte des Universums mit einem der zyklischen Lösungsmodelle<sup>4</sup> der Feldgleichungen der Relativitätstheorie beschreiben ließe: In diesem Fall wäre das Ende ein Spiegel des Anfangs und könnte als solcher untersucht werden. Die Standardauffassung ist jedoch die, daß – obwohl die meisten der uns bekannten fundamentalen Gesetze der Physik tatsächlich zeitsymmetrisch<sup>5</sup> sind – es doch eine auffällige Asymmetrie zwischen den Anfangs- und den (angenommenen) Endzuständen des Universums gibt: Genauer gesagt, die Anfangsbedingungen des Universums waren relativ einfach, aber seither hat dieses an Größe und Komplexität ständig zugenommen.

Dies führt uns unausweichlich zum sogenannten „Zeitpfeil“, der wahrscheinlich ein hervorstechendes Merkmal jeder Diskussion über Anfang oder Ende des Universums sein dürfte. Es gibt verschiedene Zeitpfeile, die alle bei unserem Thema eine gewisse Rolle spielen. Auf psychologischer Ebene haben wir das Gefühl, in einer unwiderruflichen Bewegung gefangen zu sein, die von einer nur erinnerten Vergangenheit in eine unbekannt Zukunft führt. Dieses Gefühl ist sicher der Antrieb, aus dem heraus die Menschheit – bisweilen schon wie beses-

#### Die Autoren

*Andreas Albrecht, außerordentlicher Professor für Theoretische Physik am Imperial College der London University. Sein weites Interessengebiet umspannt Kosmologie, Teilchenphysik und die Grundlagen der Quantenmechanik und der statistischen Physik. Ihn faszinieren vor allem die Fortschrittmöglichkeiten auf dem Gebiet der Kosmologie, die sich aus der rasanten Zunahme von Daten ergeben, die im Laufe des nächsten Jahrzehnts zu erwarten sind (email: a.albrecht@ic.ac.uk).*

*Chris Isham ist Professor für Theoretische Physik am Imperial College, London. Seine Forschungsarbeiten in den letzten 25 Jahren galten hauptsächlich Fragen der Quantengravitation und konzentrierten sich schwerpunktmäßig auf die damit verbundenen mathematischen und begrifflichen Probleme. Neben der theoretischen Physik und Mathematik gilt sein Hauptinteresse allgemeinen philosophischen Fragen, den Arbeiten von C.G. Jung und der Theologie. Er war vier Jahre Vorsitzender des Science & Religion Forum (email: c.isham@ic.ac.uk). Anschrift: The Blackett Laboratory, Imperial College of Science, Technology and Medicine, South Kensington, London SW7 2BZ, England, Großbritannien.*



sen - nach materiellen Verbesserungen oder nach eschatologischem Sinn sucht, was sich zum Beispiel in den schon angedeuteten, eher überspannten Spekulationen über das Ende des Universums widerspiegelt.

Der psychologische Zeitpfeil bestimmt aber auch unsere Ansicht von der wissenschaftlichen Methode selbst, besonders den unterschiedlichen Stellenwert, den wir einmal den Vorhersagen über die Zukunft und das andere Mal den Aussagen über die Vergangenheit zuschreiben. Und natürlich verstrickt uns die Zeitwahrnehmung, die für uns wesentlich und unumkehrbar in eine Richtung verläuft, sehr stark in das Problem der Induktion und in die allgemeinen (strittigen) Fragen über den Sinn von Zukunftsforschungen überhaupt. Aus mehr physikalischer Sicht bekräftigt die postulierte Existenz einfacher kosmologischer Anfangsbedingungen - der sogenannte „kosmologische“ Zeitpfeil - die wissenschaftlichen Versuche, andere Zeitpfeile zu verstehen, wie zum Beispiel den thermodynamischen Pfeil (der stets zunehmenden Entropie) oder den psychologischen Pfeil vom Fluß der Zeit, die beide für unsere Erfahrung unumkehrbar in eine Richtung laufen.

## 2. Vier Kräfte der Zukunft

Betrachten wir nun die vier voneinander abhängigen physikalischen Prozesse, die wahrscheinlich in jeder Diskussion über die Zukunft des Universums eine Hauptrolle spielen: die Evolution der Sterne, die Struktur der Materie, die Stabilität der Materie und die Schwerkraft, dabei vor allem Entstehung und Untergang der sogenannten Schwarzen Löcher.

Wenn - in vertrauter Hybris - mit der Zukunft des Universums die Zukunft der Menschheit gemeint ist, dann muß man sagen, daß es zwar höchst unwahrscheinlich, aber immerhin doch möglich ist, daß unsere gesamte Kultur durch den Einschlag eines Asteroiden eines Tages völlig vernichtet wird; oder aber, daß wir in ein schwarzes Loch eingesogen werden. Wenn wir die Sache so sehen, könnten wir uns gleich in nuklearer oder biologischer Kriegsführung selbst zerstören.

Weiter werden die Kernverschmelzungsprozesse im Inneren der Sonne, wo Wasserstoff zu Helium verbrennt, einmal zu Ende gehen. Die Folge wird sein, daß sich die Sonne zu einem Roten Riesen aufbläht, immer mehr anschwillt, bis sie die Erde schluckt und wir uns alle in Dampf auflösen.<sup>6</sup> Jedes dieser Ereignisse wäre, vom Blickwinkel der Menschheit aus betrachtet, kennzeichnend für das „Ende des Universums“. Betrachtet man den Vorgang jedoch aus der Perspektive des gesamten beobachtbaren Universums, so wäre jede lokale Katastrophe dieser Art völlig belanglos: Es bliebe immer noch dieses komische Schwarze Loch bzw. der sich aufblähende Rote Riese. Doch diese Ereignisse sind Teil eines gewaltigen Bildes, das vermutlich über viele Milliarden von Jahren noch bemerkenswert stabil bliebe.

Wenden wir uns nun dem Universum insgesamt zu, so ist auch hier die Evolution der Sterne von zentraler Bedeutung. Während seiner Lebensdauer verbraucht ein Stern verschiedene nukleare Brennstoffe (angefangen mit dem im Urknall erzeugten Wasserstoff) und produziert verschiedene Kerne. Dieser Prozeß verändert



seine chemische Zusammensetzung; die größeren Sterne beenden ihr Leben, indem sie zu einer Supernova explodieren und einen großen Teil ihrer chemisch veränderten Materie wieder im Weltall überall verstreuen. Nach dem Standardmodell sind Kohlenstoff und Sauerstoff, die für uns lebenswichtig sind, genau auf diese Weise entstanden.

Allein von dieser Beobachtung her wird deutlich, daß die genaue Natur der im Weltall verteilten Materie ein wichtiger Faktor bei der Bestimmung seiner Zukunft ist. Es gibt eine ganze Reihe von Wirkungen, die diesen Bestand an Materie ändern können. Eine davon ist ganz einfach die Expansion des Weltalls: Da das Weltall expandiert, kühlen sich die expandierenden Körper ab. Dadurch ändert sich im Laufe der Zeit auch die innere Struktur des Universums, da die Eigenschaften und die Zusammensetzung der Materie temperaturabhängig sind.

Weiter stellt sich uns die Frage nach der grundlegenden Stabilität der Materie. Es ist durchaus möglich, daß es extrem langsame physikalische Prozesse gibt, wodurch Protonen und Neutronen sich letztlich in reine Strahlung auflösen und so jedes Atom und Molekül im Universum zerstören. Diese Vorhersage ist sicher eine von den glaubhafteren der „Großen Vereinheitlichten Theorien“, die bestrebt sind, alle atomaren und nuklearen Kräfte als verschiedene Facetten einer einzigen Grundkraft anzusehen. Doch sind derartige Ereignisse bisher noch nicht beobachtet worden, und die heutigen Grenzen bei Beobachtung dieser Prozesse bedeuten, daß die Zerfallszeit von Protonen wenigstens  $10^{32}$  Jahre beträgt.<sup>7</sup>

Es wären, allgemein gesagt, auch noch andere sehr langsame Prozesse denkbar (nicht so katastrophal wie der Protonenzerfall), die zwar noch nicht beobachtet worden sind, aber in späteren Stadien des Universums sehr wichtig sein könnten. Oder es könnte völlig neuartige Prozesse geben, deren bloße Möglichkeit wir uns erst irgendwann einmal in der Zukunft vorstellen können: für einen sensiblen Naturwissenschaftler ein vielleicht schmerzhafter Gedanke, aber gewiß keine logische Unmöglichkeit. Und in der Tat befassen sich Forscher ernsthaft mit Spekulationen dieser Art.

Von weitaus größerer Bedeutung als die einzelnen Strukturelemente der Materie ist die Schwerkraft, die wechselseitige Anziehung aller Körper, egal welcher Art. Bei alltäglichen Dingen - wie zum Beispiel dieser Seite - ist die elektrische Abstoßung zwischen den positiven Kernen in einem Atom bzw. die zwischen den negativen Elektronen, die ihn umkreisen, sehr viel stärker als die Anziehungskraft der Gravitation, so daß diese nicht völlig zusammenbrechen kann. Es ist jedoch eine Grundeigenschaft der Gravitation, daß sie unabhängig von den speziellen Eigenschaften der beteiligten Körper (sei es nun Papier oder das intergalaktische Medium) alle anderen Kräfte überwiegt, wenn man eine genügend große Punktmasse betrachtet. So wird bei Objekten, die eine kritische Größe überschreiten (den sogenannten „Jeansschen Radius“, der von der Art von Materie abhängt) die Gravitation unausweichlich kollabieren.<sup>8</sup>

Freilich, in der Praxis kann der Sieg der Gravitation ein Pyrrhus-Sieg sein, da sich das System beim Zusammensturz in typischer Weise erhitzt, wodurch sich die Eigenschaften der Materie möglicherweise verändern, bis ein neues Gleichge-



wicht entsteht. Bei Objekten mit ausreichend hoher Dichte überwindet jedoch die Gravitation alle Widerstände durch die Bildung Schwarzer Löcher, denen nichts zu entgehen vermag, außer durch sehr schwache Quantenprozesse (die berühmte „Hawking'sche Strahlung“). Der sogenannte Jeans'sche Kollaps kann auch durch ein expandierendes Universum verhindert werden, bei dem die entfernteren Objekte sich schneller voneinander fortbewegen als die näheren. Dies kann genügen, um die Schwerkraft aufzuheben. Es gibt tatsächlich eine größenabhängige „Jeans'sche Länge“, die verhindern kann, daß die Gravitation stets die Oberhand behält.

In einem homogen sich ausdehnenden Universum wie dem unsrigen hängt ein Sieg der Gravitation letztlich davon ab, wieviel Materie vorhanden ist. Um genau zu sein, bei der gegenwärtig gegebenen empirischen Expansionsgeschwindigkeit liegt die kritische Massendichte bei annähernd  $4 \times 10^{-30}$  Gramm pro Kubikzentimeter. Wenn in einem homogenen Modell die Massendichte diesen kritischen Wert überschreitet, dann ist das Universum, wie man sagt, „geschlossen“; es wird schließlich unter seinem Eigengewicht kollabieren, und alles wird auf eine infinitesimal kleine Region mit unendlicher Dichte zusammengepreßt. Obwohl dieser Kollabierungsprozeß einem zeitlich rückwärts laufenden Urknall sehr ähneln würde, gibt es keinen naturwissenschaftlichen Grund für die Annahme, daß sich der thermodynamische bzw. psychologische Zeitpfeil umkehrt, wenn das Universum erneut in sich zusammenstürzt. Insbesondere erwartet man, daß jeder derartige Zusammensturz in unserer psychologischen Zukunft liegt.

Beobachtungen haben noch nicht endgültig erwiesen, ob das Universum sich oberhalb oder unterhalb der kritischen Dichte befindet. Die meiste sichtbare Materie besteht in Form von Sternen, deren Dichte bei etwa 1-2% des kritischen Wertes liegt. Man kann auch auf das Vorhandensein „dunkler Materie“ schließen, wenn man die Wirkungen ihrer Anziehungskraft auf leuchtende Objekte<sup>9</sup> beobachtet. Dies ist beim sogenannten „Gravitationslinseneffekt“ der Fall, bei dem divergierende Lichtstrahlen, die von einem Hintergrundobjekt ausgehen, durch einen (u.U. nicht gesehenen) massereichen Körper (z.B. eine Galaxie) wieder gesammelt werden können, um ein charakteristisches Doppel- oder gar Mehrfachbild der einen Strahlungsquelle zu erzeugen. Mit solchen Argumenten kann man überzeugend beweisen, daß die Dichte dunkler Materie ungefähr 10% des kritischen Schwellenwertes beträgt, nicht ganz so überzeugend jedoch, daß die Gesamtdichte sich dem kritischen Wert stark annähert. Auf diesem Gebiet werden wir vermutlich im Verlauf der nächsten fünf bis zehn Jahre sehr viel klarer sehen.

Ganz entscheidend für die Zukunft des Universums ist weiter, daß heutige kosmologische Theorien die Existenz unermeßlich großer Räume im Universum vorhersagen, die noch nicht beobachtet worden sind, und zwar grundlegend deshalb, weil seit dem Urknall noch nicht genügend Zeit verstrichen ist, damit das Licht aus diesen Regionen bis zu uns gelangen konnte. Genauer gesagt, besteht das von uns beobachtete Universum seit etwa zehn Milliarden Jahren, und da nichts schneller als das Licht sich fortbewegt, sind die entferntesten beobachtba-



ren Objekte rund zehn Milliarden Lichtjahre<sup>10</sup> von uns entfernt. Doch was liegt hinter diesem Horizont? In weiteren zehn Milliarden Jahren wird sich der Radius des von uns beobachteten Universums verdoppelt haben, und diese viel größere beobachtbare Region wird dann in der Lage sein, sich auf die Zukunft unseres kosmischen Eckchens auszuwirken. Alles, was ein Naturwissenschaftler über diesen noch unbeobachteten Bereich sagen könnte, ist zwangsläufig in höchstem Maße spekulativ.

Dies gilt - ungeachtet des klangvollen Namens des sog. „Kosmologischen Prinzips“ - insbesondere für das Postulat, daß das gesamte Universum auch jenseits des Beobachtungshorizonts homogen sei. Eine Reihe populärer Vorstellungen, die von einem sog. „inflationären Universum“ sprechen, bieten zur Zeit unser bestes (wenn auch noch unvollständiges) Verständnis der Anfangsbedingungen für den Urknall. In einer solch inflationären Kosmologie tritt die Materie in eine Phase ein, in der die normale Einsteinsche Gravitation als Abstoßung wirkt, wodurch sich das Universum zu ungeheurer Größe aufbläht. Die meisten Inflationsmodelle sagen einen Bereich der Homogenität voraus, die weit über den gegenwärtigen Horizont hinausreicht. Doch selbst in diesen Modellen wird die Homogenität nicht endlos dauern.

So bevorzugen gegenwärtige Spekulationen die - nicht gerade aufregende - Ansicht, daß wir in weiteren zehn Milliarden oder gar in weiteren Milliarden von Milliarden Jahren ganz einfach das gleiche sehen werden wie heute, nur ein wenig mehr davon. Doch es gibt zahlreiche andere Möglichkeiten. Es könnte zum Beispiel, lediglich unseren Blicken entzogen, ein Materiebrocken wie ein Schrapnell auf uns herabstürzen und unseren Teil des Universums im Endeffekt zu einem Schwarzen Loch zusammenpressen. Soweit es uns betrifft, käme das im wesentlichen auf das gleiche Szenario hinaus wie das eines „geschlossenen“ Universums. Denkbar wäre auch, daß es eine, nur unseren Blicken verborgene, Grenze gibt, hinter der eine völlig andere Form von Materie existiert, vielleicht sogar mit einer anderen Anzahl räumlicher Dimensionen, wie dies zum Beispiel im Kontext der Superstring-Theorie möglich ist - eine der allgemeinverständlichsten der gegenwärtig konkurrierenden Theorien, die versuchen, die allgemeine Relativität und die Quantenphysik „unter einen Hut“ zu bringen. Eine solche Grenze könnte die Quelle aller möglichen exotischen Strahlungen sein, die in der Lage wären, die Welt, wie wir sie kennen, zu zerstören.

Es ist durchaus denkbar, daß eine dieser radikalen Möglichkeiten im Laufe des gegenwärtigen Zeitabschnitts - das heißt im Laufe der nächsten paar Milliarden Jahre - wirklich eintritt. Und selbst im Bild vom „inflationären“ Universum, bei dem man mit viel größeren homogenen Räumen rechnet, bleibt immer noch die Frage: Was liegt außerhalb dieses homogenen Bereichs? Insbesondere ist es durchaus möglich, daß - selbst wenn die Inflationsvorstellung richtig ist - eines der oben erwähnten Ereignisse schließlich doch eintritt, wenn auch erst in einem Zeitraum, in dem zehn Milliarden Jahre nur ein vorüberhuschender Augenblick wären.



### 3. Ein Standardszenario für die Zukunft des Universums

In einer langfristigen Vorhersage über die Zukunft des Universums müssen wir von einer bis ins einzelne gehenden Wechselwirkung zwischen den oben festgestellten vier Kräften ausgehen. Weiter betonen wir nochmals unsere Zurückhaltung, wenn wir sagen: Die extreme Relevanz noch unbeobachteter Regionen bedeutet, daß jeder Versuch, eine solche Zukunft vorherzusagen, nur höchst spekulativ sein kann. Dennoch möchten wir im folgenden kurz umreißen, womit in einem „Standardszenario“ zu rechnen wäre. Dabei wagen wir die optimistische Annahme, daß das Universum außerhalb des heutigen Beobachtungshorizonts dem, was wir in ihm sehen, sehr ähnlich ist.<sup>11</sup>

Als warnende Vorbemerkung möchten wir feststellen, daß für eine klar umrissene physikalische Fragestellung die präzise Angabe des „Beobachters“ oft ganz entscheidend ist. Wer bzw. was beobachtet, ist eine der berühmten Schlüsselfragen in der Relativitätstheorie, und noch heikler ist die zentrale Rolle, die sie auch in der Interpretation der Quantentheorie spielt. Wenn man über das Ende des Universums nachsinnt, kann die Schwierigkeit, einen Beobachter zu bestimmen, zu einer äußerst kniffligen Angelegenheit werden. Die Perspektive eines einzelnen Beobachters, der in ein Schwarzes Loch stürzt, wird sich von der eines anderen, der in einer uns „vertrauteren“ Ecke des Universums sitzt, wesentlich unterscheiden. Wir werden jedoch dieses spezielle Problem weitgehend dadurch umgehen, daß wir unseren Blick nur auf die künftige Evolution der Materie richten, die wir zur Zeit im Universum beobachten können. Dabei zeigt sich, daß wir doch eine Menge Konkretes über sie sagen können, ohne auf die komplexen Fragen eingehen zu müssen, die sich ergeben, wenn wir die Vorhersagen von einem bestimmten Beobachtungsrahmen aus machen.

Mit der ersten bedeutsamen Änderung im kosmischen Maßstab ist in etwa  $10^{14}$  Jahren zu rechnen, wenn die Sternbildung zu einem Ende kommt und die alten Sterne erlöschen werden. Dies ergibt sich aus den kontinuierlichen Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung des Universums, die auf das stellare Brennen zurückzuführen sind. Dieses Brennen führt dann zu einer chemischen Zusammensetzung, die als Sternbrennstoff nicht mehr geeignet ist. Sind alle Sterne einmal ausgebrannt, so bleiben im Universum verschiedenartige Reste zurück: „Braune Zwerge“, „Weiße Zwerge“, „Neutronensterne“ und sogar Schwarze Löcher. Einige von ihnen werden noch ein paar Milliarden Jahre weiter Licht aussenden, aber schließlich werden sie alle zu extrem kalten Objekten, da der Nuklearbrennstoff verbraucht ist, um weiter zu leuchten. Diese Objekte könnten dann, was jedoch äußerst selten vorkommen dürfte, kollabieren, was wiederum Energie freisetzen und in einigen Fällen zur Entstehung neuer Sterne führen würde. Größere Objekte wären auch in der Lage, verschiedene, eine Zeitlang andauernde Nuklearprozesse zu zünden.

Die nächste relevante Struktur im kosmischen Maßstab sind die Galaxien, die noch eine Zeitlang als Ansammlungen kalter Sternreste weiter existieren werden.



Durch zufällige gravitative Wechselwirkungen werden einige von ihnen genügend Energie gewinnen, um aus ihrer Galaxie auszubrechen, während die Überreste mit geringerer Energie in Richtung des galaktischen Zentrums stürzen, wo sie sich in ein Schwarzes Loch verwandeln. In etwa  $10^{19}$  Jahren werden sich die meisten Überreste freigebrochen haben und im Zentrum ein Schwarzes Loch mit 1-10% der ursprünglichen Masse der Galaxie hinterlassen. Galaxien enthalten bekanntlich Materie nicht in Form von Sternen, sondern die sogenannte „dunkle Materie“. Eine verbreitete Vorstellung sagt, daß diese dunkle Materie in Form von schwach wechselwirkenden Masseteilchen, sog. WIMPs (= weakly interacting massive particles), über die ganze Galaxie verstreut ist. Diese würden dann in etwa  $10^{23}$  bis  $10^{25}$  Jahren in Strahlung zerfallen.

Man nimmt an, daß irgendwann zwischen  $10^{32}$  und  $10^{170}$  Jahren, von jetzt gerechnet, Protonen und Neutronen in Strahlung übergehen. Dadurch werden die Sternüberreste in Form Brauner oder Weißer Zwerge zerstört, nicht aber die Schwarzen Löcher. Diese können jedoch durch Quanteneffekte ihre Wirkung einbüßen, um die sog. Hawkingsche Strahlung zu erzeugen. Auf diese Weise werden vermutlich alle Schwarzen Löcher in rund  $10^{100}$  Jahren von heute ab verschwunden sein.

Nach dem Absterben der Schwarzen Löcher werden alle interessanten Erscheinungsformen, die wir im Universum kennen, erloschen sein. Übrigbleiben wird lediglich eine extrem energiearme Strahlung. Die einzig signifikanten Entwicklungen danach werden von was immer für welchen neuen Erscheinungsformen bestimmt sein, wenn überhaupt, die dann in den sich ständig vergrößernden Beobachtungshorizont eintreten. Jede andere mögliche Modellvorstellung wird vermutlich noch vorhersagen, daß es für das Auftreten einer Region mit einer überhohen Dichte noch eine gewisse Chance gibt, und daß diese Region ein Schwarzes Loch bilden wird. Alle derartigen Schwarzen Löcher werden dann schließlich in dem Prozeß, den wir oben beschrieben haben, wieder zerfallen.

Es ist interessant festzustellen, daß dieser zuverlässige (wenn auch extrem seltene) Zusammensturz von Strahlung zu einem Schwarzen Loch - dessen Energie dann wieder während des Zerfalls nach allen Richtungen ungezielt abstrahlt - sehr stark die fortschreitende Evolution vom Einfachen zum Komplexen widerspiegelt, die hinter dem thermodynamischen Zeitpfeil steht. Auf diese Weise bleibt eine interessante Erscheinung des bekannten Universums - der thermodynamische Zeitpfeil - tatsächlich erhalten. Einige Naturwissenschaftler betrachten diesen Pfeil als den wesentlichsten Bestandteil des Lebens. Sie spekulieren sogar, daß, solange es einen solchen Pfeil gibt, noch neue „exotische“ Lebensformen entstehen könnten (und denken vermutlich besorgt darüber nach, was immer für eine Zukunft des Universums dann noch übrigbleibt).

Man möge jedoch bedenken, daß das Fortbestehen des thermodynamischen Zeitpfeils in diesem Szenario in Wirklichkeit nichts anderes ist als eine direkte Konsequenz unserer Eingangsprämissen. Insbesondere mag die Annahme, das Universum jenseits unseres Beobachtungshorizonts ähnele dem, was wir zur Zeit sehen, recht bescheiden erscheinen; doch wenn man alle unterschiedlichen



Zustände der Materie, die möglich sind, in den Blick nimmt, so zeigt sich, daß ein solch vorausgesetzter homogener Ausgangspunkt für das Frühstadium des Universums notwendig eine auf den ersten Blick strenge Einfachheit bedeutet. Das Weiterbestehen des thermodynamischen Zeitpfeils kann dann auf die ständige Abnahme dieser angenommenen Einfachheit des Anfangs zurückverfolgt werden, da ja die Komplexität des Universums weiter zunimmt.

Je weiter wir versuchen, unser Verständnis des Universums zu extrapolieren, um so mehr hängt es, auf die Dauer gesehen, von Dingen ab, die wir noch nicht kennen. Eine ehrliche Einschätzung der Situation der Naturwissenschaft zwingt uns zu dem Eingeständnis: Letztlich müssen wir warten und sehen, was geschieht.

<sup>1</sup> Vgl. zum Beispiel C.J. Isham, Creation of the universe as a quantum tunneling process, in: R.J. Russel/W. Stoeger/G. Coyne (Hg.), Our Knowledge of God and Nature: Physics, Philosophy and Theology, Notre Dame 1988, 374-408.

<sup>2</sup> Ein heftiger Angriff auf derartige Schriften findet sich in: M. Midgley, Science as Salvation, London 1992.

<sup>3</sup> In diesem Zusammenhang könnten wir an die berühmte philosophische Diskussion über „grue“ (zusammengedogen aus green und blue) erinnern: eine Farbe, die eine Zeitlang grün ist und dann blau wird.

<sup>4</sup> Strenggenommen sind das keine exakten Lösungen, da die Mathematik bei einer Singularität zu Beginn und am Ende jedes „Zyklus“ ihre Gültigkeit verliert.

<sup>5</sup> Die einzige Ausnahme ist der eher exotische Zerfallsprozeß der K-Mesonen.

<sup>6</sup> Optimisten mögen vielleicht bemerken, daß vermehrte Sonnenwinde während dieser Periode die Erde möglicherweise auf eine entferntere Umlaufbahn in einen sicheren Abstand von der Sonne befördern könnten.

<sup>7</sup> Wir verwenden hier die wissenschaftliche Bezeichnung, wonach zum Beispiel  $10^{14}$  eine Billion bedeutet = 100.000.000.000.000 (die Zahl 14 gibt die Anzahl der Nullen nach der eins an).

<sup>8</sup> Für Regionen, in denen sich Sterne bilden, beträgt der Jeanssche Radius des intergalaktischen Materials annähernd  $10^{16}$  Meter.

<sup>9</sup> Einige Autoren haben vorgeschlagen, daß Modifikationen an den Gesetzen der Schwerkraft diese Beobachtungen eher erklären könnten als das Vorhandensein dunkler Materie, doch muß ein überzeugendes Erklärungsmodell für alle Beobachtungen erst noch gefunden werden. Vgl. auch G. Börner/J. Ehlers/H. Meier (Hg.), Vom Urknall zum komplexen Universum. Die Kosmologie der Gegenwart, München/Zürich 1993, 120ff.

<sup>10</sup> Ein „Lichtjahr“ ist das astronomische Maß für die Entfernung, die das Licht in einem Jahr zurücklegt.

<sup>11</sup> Vgl. den kürzlich erschienenen hervorragenden Artikel: F.C. Adams/G. Laughlin, A dying universe, in: Reviews of Modern Physics (1997) 337-372.

Aus dem Englischen übersetzt von Franz Schmalz