

Josef Honerkamp, Fakultät für Physik, Universität Freiburg

Zeitgenössische Betrachtungen zum Schicksal des Universums¹

Physikalische Gesetze im Universum

Ich möchte einige Gedanken über die Zukunft des Universums vortragen. "Ein merkwürdiges Thema" werden Sie vielleicht denken, "wohl etwas weit weg von den Problemen unseres Lebens". Zudem ist es riskant: auf der einen Seite begibt man sich in Gefahr, mit Propheten aller Art verwechselt zu werden, zum anderen kann man in den Geruch kommen, es sich besonders leicht machen zu wollen, nämlich Dinge behaupten zu wollen, die doch kein Mensch nachprüfen kann.

Dennoch, das Verlangen, nicht nur zu wissen, woher wir kommen, sondern auch, wie das alles letztlich weitergeht, ist unabweisbar. Die großen Mythen der vergangenen Jahrtausende enthalten alle auch eine Eschatologie, eine Lehre von den letzten Dingen, wenn auch diese meistens nicht so detailliert ist wie deren Vorstellungen von der Entstehung der Welt.

Jede Zeit hat ihre Methoden und ihre Wissensbasis. Waren es früher Intuition und Eingebung alleine, so ist in den letzten Jahrhunderten ein neues Element hinzugekommen: die Erkenntnis, dass es in der Natur Gesetzmäßigkeiten gibt, die präzise und quantitativ formulierbar sind und sich in Prüfungen immer wieder bewähren, so dass man sich offensichtlich auf sie verlassen kann. Wenn die Systeme einfach genug sind, so dass man alle Bedingungen und wirkenden Gesetze überblicken kann, ist auch die Entwicklung des Systems vorhersehbar. So kamen u.a. die Erfolge der Astronomie zustande, zunächst die präzisen Vorhersagen der Sonnenfinsternisse, heute z.B. die genauen Berechnungen der Satellitenbahnen.

Wenn die Systeme einfach genug sind, sagte ich. Es hat sich gezeigt, dass Planeten und vor allem Sterne genügend einfache Systeme sind, wenn man sich nur für deren Bewegung und Zusammensetzung interessiert. Physikalische Gesetze, millionenfach auf der Erde erprobt, erklären auch dort die Verhältnisse. Die physikalischen Gesetze haben sich als wahrhaft universell erwiesen. So lag es nahe, diese auch auf die Entwicklung des Kosmos und der Sterne anzuwenden, um sich somit auf der Basis des zeitgenössischen Wissens Gedanken über die Zukunft des Universums zu machen.

Hier entsteht aber ein anderes Risiko. Man kann nicht prüfen, ob alle Bedingungen für die Anwendbarkeit der Gesetze erfüllt sind. Die Entwicklung der Kosmos ist ein einmaliger Vorgang. Wir können nicht experimentieren, die Entwicklung z.B. unter anderen Randbedingungen wiederholen.

Diese Überlegungen, die ich Ihnen vortragen werde, sind also von einer anderen Verlässlichkeit als die Ergebnisse der Physik, die durch Experimente im Labor überprüft und gesichert sind. Diese verlässlichen und überprüften Gesetze allerdings wollen wir gerade

¹ Vortrag anlässlich der Eröffnung des Akademischen Jahres der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg am 20. Oktober 1993

benutzen und zwar zur Diskussion der zukünftigen Entwicklung des Kosmos, wobei wir eben nicht überprüfen können, ob wir bei dieser Übertragung alles berücksichtigt haben.

So führte auch der erste große Versuch dieser Art in der neueren Geschichte in die Irre: Hermann von Helmholtz berichtete 1854 in einem berühmt gewordenen Vortrag davon, wie die Übertragung eines wichtigen Gesetzes aus der Thermodynamik auf das gesamte Universum zum Schluss führt, dass auf die Dauer alle Temperaturdifferenzen eingeebnet werden und die Welt in einem lauen, strukturlosen Brei enden muss. "Von da an ist das Universum zu einem Zustand ewiger Ruhe verdammt", sagte er. Dieser Endzustand wurde als Wärmetod bezeichnet.

Der Fehler von Helmholtz lag darin, dass er etwas nicht berücksichtigte, was man damals auch nicht wissen konnte: dass das Universum expandiert. Dieses wurde erst klar in der zweiten großen Anwendung einer auf der Erde geprüften Theorie auf den gesamten Kosmos. Die allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein war nicht nur auf der Erde erfolgreich, sondern führte auch bald zu einer Kosmologie, die inzwischen durch viele Beobachtungen gestützt wird und uns, heute weiter ausgeführt, ein Bild von der Entwicklung des Kosmos gibt, das bisher allgemein akzeptiert wird.

In dieses Bild gehen unsere besten physikalischen Theorien und Vorstellungen ein; neben der allgemeinen Relativitätstheorie auch -- wenn es um die früheste Entwicklung geht -- die modernen Theorien über die Wechselwirkung der elementaren Teilchen wie z.B. der Quarks, Photonen, Protonen. Alle diese Theorien können durch systematische Befragungen der Natur, durch wiederholte und auf spezielle Fragen abgestimmte Experimente, getestet werden und sie sind in diesem Sinne geprüft.

Die Übertragungen dieser Theorien auf die Entwicklung des Kosmos in diesem Bild ist bisher auch mit allen Beobachtungen, die wir mit der heute weit entwickelten Astronomie direkt oder indirekt vom Universum sammeln konnten, konsistent.

Danach leben wir auf einem Planeten eines unbedeutenden Sternes mittleren Alters, der zusammen mit 100 Milliarden anderer solcher Sterne eine spiralförmige Galaxie bildet; eine große Anzahl dieser Sterne sehen wir am abendlichen Himmel die Milchstraße bilden.

Unsere nächsten Nachbarn sind 4-12 Lichtjahre entfernt, so z.B. α -Centauri oder Sirius. Ein Lichtjahr ist die Entfernung, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Das ist eine Entfernung, die wir uns eigentlich nicht vorstellen können, denn in einer Sekunde legt das Licht schon 300 000 km zurück. Es hat also eine Geschwindigkeit von $300.000 \text{ mal } 3600 \text{ km/h} = 1.1 \text{ Milliarden km/h}$, ist also etwa 10 Millionen mal schneller als ein Auto, das mit 110 km/h fährt. Ein Jahr besteht nun etwa aus $3 \cdot 10^7$ Sekunden, somit ist ein Lichtjahr etwa 10 Billionen km, nämlich $3 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^7 \text{ km}$, gleich ca. $10^{13} \text{ km} = 10.000.000.000.000 \text{ km}$.

Unsere Galaxie ist Mitglied einer Gruppe von Galaxien, lokale Gruppe genannt. Es gibt viele solcher Galaxienhaufen und unsere lokale Gruppe gehört mit etwa 10.000 solcher Galaxienhaufen zu einem riesigen sogenannten Superhaufen. Das Licht, das von der Sonne zur Erde 8 Minuten benötigt, braucht 300.000 Jahre, um unsere Galaxie zu durchqueren, 2,3 Millionen Jahre, um die nächste größere Galaxie, den Andromeda-Nebel zu erreichen und 10-30 Millionen Jahre, um den Galaxienhaufen, die lokale Gruppe zu durchqueren.

Die Galaxien streben in der Regel voneinander fort, und zwar um so schneller, je weiter sie voneinander entfernt sind. Dieser Umstand und viele weitere Indizien weisen darauf hin, dass vor etwa 10-20 Milliarden Jahren alle Materie sehr eng bei einander war und die Expansion des Universums durch eine große Anfangsexplosion, einen Urknall begann.

Die Form der Materie, ihre Wechselwirkungen und ihre Entwicklung während der ersten 100.000 Jahre, der ersten Minuten, Sekunden oder gar Millionstel Sekunden ist der Zweig der Physik, in dem Allgemeine Relativitätstheorie und die Theorien der fundamentalen Wechselwirkungen der elementaren Teilchen der Natur zusammenwirken müssen und erstaunliche Details werden dort diskutiert.

Das aber ist nicht unser Thema, das wird in vielen Büchern -- auch in allgemeinverständlicher Form, oder was der Autor dafür hält -- und in vielen Vorträgen erzählt. Weniger bekannt sind die Überlegungen der Physiker zur Zukunft des Universums, zu einer physikalischen Eschatologie. Was sagen uns die physikalischen Theorien über die Zukunft des Universums?

Zeitenende oder Zeit ohne Ende

Die erste Antwort auf diese Frage ist von der typischen Art, die jeden Nichtwissenschaftler sofort tief enttäuscht: Ja, es kommt drauf an. Die Zukunft hängt nämlich von drei Größen ab, den sogenannten kosmologischen Parametern, die wir alle noch nicht genau kennen. Die wichtigste davon ist die durchschnittliche Massendichte im Universum, also die Massendichte, die sich ergeben würde, wenn alle Massen gleichmäßig im Raum verteilt wären.

Ich will nicht darauf eingehen, wie schwierig diese Größe zu messen ist und wie ungenau deshalb die Werte dafür heute noch sind. Aber plausibel ist sofort folgendes: Die Anziehung der Massen arbeitet gegen die Expansion, die durch den Urknall in Bewegung gesetzt wurde. Die Masse im Universum könnte nun so groß sein, dass durch die Anziehung die Expansion irgendwann gänzlich gestoppt und sogar umgekehrt wird. Das Weltall würde sich dann wieder zusammenziehen, die Galaxien aufeinander zuströmen und alle Materie irgendwann in der Zukunft in einem großen Gravitationskollaps zusammenstürzen.

Reicht die Masse im gesamten Universum aber nicht aus für solch einen Stop der Expansion, so wird diese zwar durch die Anziehung immer langsamer werden, aber niemals zum Stillstand kommen. Ein Ende des Universums ist dann nicht in Sicht. Man spricht dann von einem offenen Universum, im Gegensatz zum geschlossenen im ersten Fall. Der kritische Wert der Massendichte liegt bei $\bar{\rho} = 2.4 \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$, das entspricht nur einigen Atomen pro m^3 . Ist die Dichte größer, so ist das Weltall geschlossen.

Vieldiskutierte Abschätzungen jener Massen, die man sehen kann, liefern aber höchstens einen Wert, der einem Fünfzigstel dieses kritischen Wertes entspricht. Offensichtlich gibt es aber auch noch viel dunkle Materie, also Materie, die man nicht sehen kann, die sich aber aufgrund ihrer gravitativen Wechselwirkung mit sichtbaren Sternen und Sternsystemen bemerkbar macht. Aber damit kommt man noch nicht an den kritischen Wert heran.

Es gibt viele weitere Überlegungen, bei denen man prüft, ob man so viel Masse im Universum zusammenbekommt, dass man den kritischen Wert übertrifft: da ist z.B. eine neue Variante für das früheste Stadium des Universums, eine sogenannte inflationäre Phase, im

Spiel, oder die Frage, ob die Neutrinos, die wie ein Gas den gesamten Weltraum ausfüllen, eine Ruhemasse besitzen¹. Neutrinos sind sehr merkwürdige Teilchen; sie spielen im Zoo der Elementarteilchen eine wichtige Rolle; z.B. auch bei der radioaktiven β - Strahlung, dem Zerfall des freien Neutrons; bei der Untersuchung dieser Art von Radioaktivität sind die Neutrinos auch entdeckt worden. Neutrinos wechselwirken mit anderer Materie nur sehr schwach, d.h. dass die Erde z.B. völlig transparent für diese Teilchen ist. Sie können in Scharen ungehindert durch die Erde fliegen, ohne dass eines von ihnen auch nur absorbiert wird. In allen Experimenten mit diesen merkwürdigen Teilchen verhalten sie diese wie masselose Teilchen, aber ausschließen kann man nicht, dass sie dennoch eine Masse besitzen, die unterhalb der Nachweisgrenze liegt.

Im Universum sind nun sehr viele Neutrinos vorhanden, sehr viel mehr als Protonen oder Neutronen, man schätzt etwa 400 Neutrinos pro cm^3 oder 400 Mill. Neutrinos pro m^3 (im Mittel -- innerhalb von Galaxien ist sie sehr viel größer) im Vergleich zu nicht einmal einem Proton pro 50 m^3 . Eine winzige, bisher nicht nachweisbare Neutrinomasse von etwa $2 \cdot 10^{-35}$ kg, etwa 20.000 mal kleiner als die Elektronenmasse, würde damit im gesamten Weltall eine Masse von $400 \text{ Mill.} \cdot 10^{-35} \text{ kg/m}^3 = 2 \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$ allein aufgrund der Neutrinos bedeuten und der kritische Wert wäre zusammen mit der anderen Materie leicht erreicht.

Heute neigt man aber, nach vielen Überprüfungen der Abschätzungen aller drei kosmologischen Parameter, zu der Ansicht, dass das Weltall eher offen ist, es damit wohl einen Anfang, aber kein Ende hat.

Was wäre, wenn es nun doch geschlossen wäre? Lassen Sie mich das zunächst etwas kurz abhandeln, um mich dann der anderen Alternative, dem offenen Universum zu widmen.

Zunächst: wenn das Weltall geschlossen wäre, wären wir heute zumindest noch in einer Expansionsphase und mindestens 20 Milliarden Jahre müssten noch vergehen bis die Expansion in eine Kontraktion übergehen würde. Je niedriger die Dichte oberhalb der kritischen Dichte, um so später würde die Expansion zum Stillstand kommen.

In der Kontraktionsphase wird der Abstand zwischen dem Galaxienhaufen wieder kleiner werden. Die Galaxienhaufen werden zunächst ihre Identität verlieren, dann die Galaxien: das gesamte Universum wird ein riesiges Feld von Sternen werden, das in einem See von Photonen badet, dessen Temperatur nicht mehr 3 K wie heute, sondern 300 K, also etwa 27 Grad Celsius ist. 100 Millionen Jahre später wird diese Temperatur auf 1000 K angestiegen sein, sie wird immer schneller ansteigen so wie die Kontraktion immer schneller wird.

Freie Atomkerne und Elektronen werden immer mehr den Weltraum füllen, von den verdampfenden Sternen freigesetzt. Dadurch wird das Universum trübe werden, so wie es während der ersten 300.000 Jahre war. In der immer schneller steigenden Temperatur werden die Sterne vollends in ihre Kerne und Elektronen aufgelöst und auch die Kerne wiederum in ihre Protonen und Neutronen. Ein Meer aus Licht und Teilchen entsteht, ein Brei von elementaren Konstituenten der Materie so wie es am Anfang des Universums vorhanden war. Was weiter geschieht, können wir nicht sagen, weil wir noch keine Theorien für eine solche extreme Situation haben.

¹ eine Frage übrigens, die nach der Delphi--Studie der deutschen Bundesregierung von den deutschen Wissenschaftlern als besonders wichtig eingestuft wird -- neben den Fragen nach einem optimalem Recycling von Abfällen und nach Methoden zur Früherkennung von Krebs

Wir wollen uns hier aber im folgenden auf den heute als wahrscheinlicher geltenden Standpunkt stellen, dass das Weltall offen ist und somit ein Ende der Zeit und des Raumes nicht abzusehen ist. Was passiert dann auf die Dauer mit den Sternen, was mit den Galaxien?

Das Sterben der Sterne

Sterne werden geboren, leben eine Zeit lang und sterben. Was verstehen wir unter dem Leben eines Sternes in diesem Bild und wie lange währt es? Welche Art von Tod kann ein Stern erleiden?

Ein Stern lebt, wenn sich kernphysikalische Fusionsprozesse in ihm abspielen, also Atomkerne zu größeren Kernen zusammenschmelzen. Dazu muss eine gewisse Dichte und eine gewisse Temperatur im Inneren vorhanden sein, etwa 10 Millionen Grad wie in unserer Sonne und viel wäre dazu zu sagen, wie solch ein Sternenleben aus interstellaren Materiewolken entsteht oder wo man heute Sterne im statu nascendi beobachten kann. Wir wollen uns aber hier für das Ende von Sternen interessieren.

Zunächst entsteht im Zentrum eines Sterns Helium, aus Wasserstoff zusammengeschnitten. Das ist der Fusionsprozess, den man auf der Erde nachzuahmen versucht. Später sind es Kohlenstoff und nach und nach komplexere Elemente, die durch Fusion entstehen, bis Eisen erreicht ist. Dieses ist aufgrund seiner Stabilität kein Kernbrennstoff mehr, die Fusion und damit das Sternenleben erlischt, die Gravitation bekommt die überhand und komprimiert die Materie zu kleinen Gebilden, sozusagen zu Sternleichen oder Sternkadavern. Wie stark komprimiert und wie klein das Gebilde ist, hängt wieder von irgendwas ab, nämlich von der Masse des Sterns zu seiner Lebenszeit. Dabei sind drei Fälle zu unterscheiden:

1) Ein Stern mit einer Masse wie sie unsere Sonne hat, wird zu einem sogenannten weißen Zwerg von der Größe etwa der Erde. Die Dichte ist enorm hoch, ein Kubikzentimeter würde eine Tonne wiegen. Es gibt keine Atome mehr in einem solchen dichten weißen Zwerg. Atomkerne und Elektronen sind getrennt und nur eine bestimmte Eigenschaft von Elektronen verhindert, dass der weiße Zwerg durch die Gravitation noch weiter verdichtet wird.

Bevor jedoch dieses Endstadium erreicht ist, bläht sich ein Stern wie unsere Sonne noch einmal kräftig auf, wird zu einem roten Riesen - unsere Sonne wird so groß werden, dass die Erdbahn darin verschwinden wird.

Der weiße Zwerg ist allerdings noch nicht das allerletzte Stadium, der Sternkadaver ist sozusagen noch warm. Er ist sogar zunächst extrem heiß und strahlt daher wie eine Sonne, heißt eben deshalb weißer Zwerg. Milliarden Jahre dauert es, bis der weiße Zwerg seine ganze Wärme, die er durch den Gravitationskollaps gewonnen hat, an den Weltraum abgegeben hat und schließlich als unsichtbarer kalter "Schwarzer Zwerg" übrig bleibt.

2) Ein Stern von einer Masse zwischen 1.4 und etwa 5 Sonnenmassen erleidet ein Ende, das unter dem Namen Supernova bekannt ist. Der Stern zerbirst am Ende in einer heftigen Explosion, die äußeren Schichten des Sternes werden herausgeschleudert, die Helligkeit erreicht dabei die von 100 Millionen Sonnen, so dass selbst wir auf der Erde solche Ausbrüche auch von sehr weit entfernten Objekten beobachten können. Im Jahre 1054 beobachteten die chinesischen Astronomen über Wochen einen sogenannten Gaststern, der ebenso hell leuchtete wie die Venus. Die bei dieser Explosion abgeschleuderte Hülle ist heute als Krebsnebel zu sehen und der übriggebliebene Kern ist ein sogenannter Neutronenstern.

Die jüngste Supernova wurde am 23. Februar 1987 in der großen Magellanschen Wolke beobachtet.

Der Radius eines solchen Neutronensterns ist nun nur noch 10 km, die Dichte ist so groß, dass ein Kubikzentimeter dieser Materie etwa 1 Milliarde Tonnen wiegen würde. Hier sind auch schon die Atomkerne aufgebrochen, der Stern besteht hauptsächlich aus Neutronen. Auf den Neutronensternen kann es Flecken geben, die starke Radiostrahlung abgeben. Da der Stern sich im allgemeinen sehr schnell um eine Achse dreht, entsteht ein Leuchtturmeffekt: ein Strahlenbündel wird rotierend in den Weltraum abgegeben. Auf der Erde empfangen wir solches als pulsierende Strahlung und Neutronensterne heißen deshalb auch Pulsare².

3) Die dritte Form eines Sternendstadiums ist noch spektakulärer. Bei einem Stern mit mehr als 5 Sonnenmassen kann der gravitativen Anziehung am Ende nichts mehr entgegengesetzt werden. Die Materie wird auf ein so geringes Volumen komprimiert, dass nun der sogenannte Schwarzschild-Radius blank liegt. Ein entsprechender Radius liegt normalerweise innerhalb der Sterne und es kann da nicht eintreten, was nun eintritt: Alles, was eine Kugel mit diesem Radius durchquert, wird unweigerlich weiter angezogen, nicht einmal Licht, keine Information, kommt aus dieser Kugel heraus. Ein schwarzes Loch ist entstanden, die Materie in diesem schwarzen Loch ist unbeobachtbar.

Langfristig werden so alle Sterne des Universums sterben, das Material für neue Sterne wird verbraucht sein. Die Galaxien werden nur noch aus Sternkadavern bestehen, die aber immer noch der Gravitation gehorchen werden. Auf etwa 1000 Milliarden Jahre schätzt man die Stern-Ära des Universums. Die Gravitation wird aber auf die Dauer folgendes bewirken: Die meisten toten Sterne werden aus den Galaxienhaufen herausgetrieben, einige stürzen ins Galaxienzentrum, wo sich ein immer dichter Kern bildet. Dieser wird immer massereicher, bis sich ein riesiges galaktisches schwarzes Loch bildet. Die Zeiträume hierfür werden mit etwa 1 Milliarde · 1 Milliarden, also $10^9 \cdot 10^9 = 10^{18}$ Jahren abgeschätzt.

Das ist eine ungeheuer lange Zeit. Man kann sich diese aber dennoch veranschaulichen. Ich habe einmal irgendwo eine schöne Geschichte gelesen von einem Mann, der einem anderen erklären wollte, was die Ewigkeit ist. Leider habe ich nicht mehr herausgefunden, wo diese Geschichte stand, obwohl ich Kollegen -- auch einschlägiger Fakultäten -- bemüht habe. Die Geschichte geht in dürren Worten ungefähr so:

Man stelle sich einen großen Berg vor, etwa den Mount Everest im Himalaya Gebirge von etwa 8 km Höhe. Jedes Jahr kommt ein Vogel geflogen und wetzt seinen Schnabel an dem Berg, dabei bricht er ein paar Krümen von dem Berg ab und wir stellen uns vor, dass der Wind diese Krümen weit weg bläst. Wenn der Vogel dadurch den ganzen Berg abgetragen hat, ist nach der Geschichte gerade eine Ewigkeit verflossen. Ich habe nun einmal überschlagen, wie lange das dauert und komme gerade auf diese 10^{18} , also eine Milliarde Milliarden Jahre.

² Der Nobelpreis für Physik wurde im Jahr 1993 an zwei Astrophysiker vergeben, die ein Sternsystem entdeckt haben, das aus zwei Pulsaren besteht, die um einander kreisen. Dabei müssen diese nach der allgemeinen Relativitätstheorie Gravitationswellen aussenden, damit also auch Energie verlieren, so dass sie sich einander nähern würden und ihre Umlaufzeit sich verringern würde. Genau das haben die Forscher beobachtet und ihre Messergebnisse stimmen innerhalb 1 Prozent Genauigkeit mit den Vorhersagen der Theorie überein

Wir können als Dauer der Stern- und Galaxienära eine Ewigkeit nennen. Nach dieser ra werden im Weltraum nur noch riesige galaktische schwarze Löcher und einzeln umher irrende Sternkadaver vorhanden sein.

Quanteneffekte und die Verwesung der toten Sterne

Diese Beschreibung der Entwicklung der Sterne und Galaxien stützt sich auf Gesetze der Physik wie z.B. aus der Thermodynamik und der Gravitationstheorie. In Großrechnern wird die Entwicklung auf der Basis dieser Gesetze simuliert und alles, was wir über Beobachtungen von Sternen und Galaxien wissen, wird natürlich dabei berücksichtigt.

Die Quantenphysik, die Physik der Atome, Atomkerne und Elementarteilchen, die keine Grenze der Naturwissenschaft, wohl aber eine Grenze der unmittelbaren Anschauung darstellt, ja überspringt, spielt bei diesen Überlegungen nur eine beiläufige Rolle.

In jüngerer Zeit haben sich einige Physiker daran gemacht, auch Phänomene der Quantenphysik für die Entwicklung solcher kosmischen Objekte zu berücksichtigen. Und es stellt sich heraus, dass Effekte, die zu einer erfolgreichen Beschreibung unserer Atome und Kerne beitragen, auch gerade für die Entwicklung der Objekte nach dieser Stern- und Galaxienära eine bedeutende Rolle spielen. Die Zeiträume, in denen sich die Wirkung dieser Effekte abspielen, sind aber noch erheblich größer als die, die wir eben eine Ewigkeit genannt haben.

Diese Phänomene sind: die Nullpunktsenergie, der Tunnel-Effekt und die Vakuum-Polarisation. Die Nullpunktsenergie ist besonders schwer anschaulich zu beschreiben, daher versuche ich das hier erst gar nicht. Folge dieses Phänomens ist aber, das unter Berücksichtigung dieses Effektes alle Materie als radioaktiv anzusehen ist, allerdings nur so ungeheuer schwach, dass für die Umwandlungsprozesse Zeitspannen von 10^{1500} Jahren in Rechnung zu stellen sind. Wenn man sich soviel Zeit lässt, werden schließlich alle Planeten und schwarze Zwerge nur noch aus Eisenkernen bestehen. Der Eisenkern ist der stabilste Atomkern und aufgrund der Nullpunktsschwankungen wird jeder Kern auf die Dauer in diesen Kern umgewandelt.

Der Tunneleffekt beschreibt den Übergang eines physikalischen Systems von einer Konfiguration in eine energetische niedrigere, wenn auch dieser Übergang aufgrund einer Energiebarriere vom Standpunkt der klassischen Physik nicht möglich ist. Um diesen Vorgang dennoch in einem klassischen, anschaulichen Bild festzuhalten, sprechen wir davon, dass der Zustand durch die Energiebarriere hindurchtunneln kann.

Auf unsere Sternkadaver angewandt bedeutet dies: sie sind verschiedene Konfigurationen der Materie; bei gleicher Masse hat nun der schwarze Zwerg, auch wenn er nur aus Eisenkernen besteht, die höchste Energie, das schwarze Loch die geringste Energie. Es gibt Übergänge zwischen diesen Konfigurationen: vom schwarzen Zwerg zum Neutronenstern, vom Neutronenstern zum schwarzen Loch. Die mittlere Zeit für einen solchen Übergang sind in der Tat astronomisch: 10 hoch 10^{76} Jahre werden da berechnet, das sind Zeiträume, die man zwar leicht hinschreiben kann, die man aber wirklich nicht mehr veranschaulichen kann; da sind wir auch mit unserem Ewigkeitsbegriff am Ende. Aber in einem offenen Universum

werden solche Zeiten existieren und wenn man also nur lange genug wartet, wird alles zu einem schwarzen Loch.

Ist das nun die Endkonfiguration aller Materie? Das ist sie immer noch nicht, und nun muss ich auf den dritten, hier zu erwähnenden Effekt zu sprechen kommen; die Vakuumpolarisation. Auch diese ist ein Phänomen, das uns erst in einer Quantentheorie begegnet. Dort findet es eine natürliche Erklärung und seine Existenz wird durch viele experimentelle Aussagen bestätigt. Der Effekt ist der: auch im Vakuum, d.h. in Abwesenheit jeder Materie, können spontan Teilchen-Antiteilchen-Paare, also z.B. Elektron - Positron - Paare entstehen, wenn auch nur für eine sehr kurze Zeit.

Das klingt sehr merkwürdig und unanschaulich, im Widerspruch zur klassischen Physik; aber der Effekt ist erst in der Physik der Atome und Atomkerne relevant, hat dort tatsächlich einen natürlichen Platz und erweist sich auch als notwendig zur angemessenen Interpretation der experimentellen Befunde.

Was hat dieser Effekt nun mit schwarzen Löchern zu tun? Nun, am Rande eines schwarzen Loches können auch solche Teilchen-Antiteilchen-Paare erzeugt werden und es kann passieren, dass eines davon in das schwarze Loch fällt und das andere entweicht. Das sieht dann so aus, als wenn das schwarze Loch einen Strom von Teilchen abstrahlt. Diese schwarze Loch-Strahlung nennt man auch Hawking-Strahlung nach dem englischen theoretischen Physiker, der mit seinem Buch "Eine kurze Geschichte der Zeit" Furore gemacht hat.

Man kann diese heuristische Vorstellung mathematisch im Rahmen der Quantentheorie präzisieren. Dann stellt sich heraus, dass solche schwarzen Löcher langsam verdampfen, d.h. ihre Masse verringert sich, der Prozess beschleunigt sich mit abnehmender Masse, bis schließlich in einer finalen Explosion das schwarze Loch vollends in Strahlung aufgeht. Die Zeiträume für diesen Prozess sind nun nicht so schreckenerregend wie die vorherigen, allerdings auch gigantisch, nämlich 10^{100} Jahre.

Schließlich wird das Universum nur noch ein Meer von Strahlung, Neutrinos und Elektronen und Protonen sein, die Temperatur wird dem absoluten Nullpunkt immer näher rücken, ihn aber nie erreichen.

Die Zeit bis zu diesem Endzustand ist allerdings unvorstellbar: 10 hoch 10^{76} Jahre als mittlere Zeit für den Übergang vom Eisenstern zum schwarzen Loch; 10 hoch 10^{76} ist eine Zahl mit 10^{76} Nullen, das Alter unseres Universums ist 10^{17} Sekunden, also selbst, wenn jemand jede Sekunde eine Null schreiben könnte --- während der ganzen Existenz des Universums, er könnte nur eine Zahl von der Größenordnung 10 hoch 10^{17} schreiben, lächerlich klein gegen 10 hoch 10^{76} .

Aber hier ist eine Alternative zu bedenken. Durch die Versuche, die fundamentalen Wechselwirkungen der elementaren Teilchen in einer gemeinsamen Theorie mathematisch zu beschreiben, ist eine Möglichkeit ins Blickfeld getreten, an die man vorher nicht gedacht hat: Es kann sein, dass auch das Proton, das zusammen mit dem Photon, den Neutrinos und dem Elektron zum Quartett der stabilen Teilchen zählte, gar nicht unsterblich ist, also auch zerfallen kann. Das Proton als Kern des Wasserstoff-Atoms, als wesentlicher Baustein für den Aufbau der gesamten Materie: nun auch nicht mehr stabil und irgendwann zerfallend in zwei Photonen und ein Positron, das wäre schon eine Veränderung unseres Weltbildes.

Wie passt diese Überlegung zusammen mit der bisher nie ernsthaft bezweifelten Annahme, dass das Proton nicht zerfallen kann? Nun, diese neuen vereinheitlichten Theorien sagen eine mittlere Lebensdauer des Protons von mindestens 10^{32} Jahren voraus.

Das ist sehr viel länger als das Alter des Universums, somit scheint diese Hypothese nie nachprüfbar zu sein. Das stimmt aber nicht, da man nur im Mittel 10^{32} Jahre warten muss, bis ein Proton zerfällt. Protonen können auch viel früher oder viel später zerfallen. Jede Lebensdauer hat eine bestimmte Wahrscheinlichkeit für sich. Erst im Mittel ergeben sich 10^{32} Jahre für die Lebensdauer. Bei einer Ansammlung von 10^{32} Protonen wird etwa eines im Jahr zerfallen. Unser Körper enthält etwa $3 \cdot 10^{28}$ Protonen, wir müssten etwa 3000 Jahre alt werden, damit eines unserer Protonen zerfällt. Betrachten wir eine größere Massenansammlung, etwa ein Bassin mit einer Breite, Länge und Tiefe von etwa 20 Metern, in dem 8000 Tonnen Wasser Platz finden: das sind etwa 10^{33} Protonen und wir erwarten etwa 10 Protonenzerfälle pro Jahr.

Solche Experimente werden tatsächlich unternommen, in USA in der Morton Salzmine östlich von Cleveland, in Europa im Montblanc-Tunnel oder in Indien in einer Goldmine. Diese Experimente versucht man so tief wie möglich in die Erde zu legen, um die störenden Effekte der kosmischen Höhenstrahlung möglichst gering zu halten.

Das Ergebnis ist allerdings bis heute noch negativ. Aber hat man einmal diese Möglichkeit entdeckt, so wirkt sie nicht unplausibel und es ist nicht ausgeschlossen, dass man irgendwann die Instabilität des Protons entdeckt.

Interessant ist aber doch, dass eine Eigenschaft eines winzigen Elementarteilchens wiederum - wie beim Neutrino - unsere Vorstellungen über die fernste Zukunft des ganzen Universums bestimmt. Eine Masse für das Neutrino könnte entscheiden darüber, ob wir das Weltall als offen oder geschlossen zu betrachten haben, ob es ein Zeitenende oder eine Zeit ohne Ende gibt. Ein Zerfall des Protons mit einer mittleren Lebensdauer von etwa 10^{30} oder 10^{40} Jahren, würde bedeuten, dass die Umwandlung von aller Materie in Eisen und schließlich von allen Eisen- und Neutronensternen in schwarze Löcher gar nicht passieren kann, weil die Protonen dieser Sterne schon vorher alle zerfallen sein werden. Viel früher als sonst wird das Universum zu einem Meer von Strahlung, Neutrinos und Elektronen, wobei nun die Protonen fehlen, dann nämlich, wenn alle schwarzen Löcher verdampft sind. Die Zeitdauer hierfür war mit 10^{100} Jahren berechnet. Die 100 Nullen dieser Zahl können sie in 100 Sekunden, also etwa 1 1/2 Minuten hinschreiben.

Ausblick

Ich habe Ihnen von den Übertragungen unseres heutigen Wissens auf die Entwicklung des Universums berichtet. Es ergibt sich ein erstaunliches - und erstaunlich konsistentes Bild. Dass wir uns das alles nicht so richtig vorstellen können, ist kein Maßstab für die Richtigkeit der Überlegungen. Unser Anschauungsvermögen hat sich ja bisher nur in dem Maße entwickelt, dass wir auf der Erde überleben können. Es gibt genügend sehr unanschauliche Aussagen in der Physik, die im Experiment immer wieder bestätigt werden.

Die hier diskutierten Zeiträume insbesondere sind so unvorstellbar, dass man diese Überlegungen als im bürgerlichen Sinne 'weltfremd' einstufen möchte. Dabei betreffen sie doch gerade direkt die Welt; was wir meinen, ist eigentlich, 'menschenfremd'. Dass wir 'mir

persönlich fremd' oder 'menschenfremd' meinen, und 'weltfremd' sagen, entspricht unserem alten Fehler, uns selbst als das Maß aller Dinge zu betrachten.

Trotz der Menschenfremdheit stellen diese Überlegungen mit den unvorstellbaren Zeiträumen aber doch so etwas dar wie einen sehr fernen Spiegel, in dem wir etwas von uns und unseren Möglichkeiten entdecken können.

Die Evolution vom Vorläufer des Menschen zum Menschen hat etwa 1 Million Jahre benötigt. Wenn man 25 Jahre als eine Generation bezeichnet, sind das etwa 40.000 Generationen. Lassen Sie uns das eine Evolutionszeiteinheit nennen, also einen Zeitraum, in dem eine evolutionäre Entwicklung spürbar ist.

Eine Milliarde Jahre bedeuten dann 1000 solcher Evolutionszeiteinheiten. Ist das Universum also 1 Milliarde Jahre älter, so bedeutet es für dieses noch wenig; selbst bei einer Lebenszeit von nur 80 Milliarden Jahren in einem geschlossenen Universum ist es unerheblich, ob es nun 15 oder 16 Milliarden Jahre alt ist. Aber nach 1 Milliarde Jahren sind 1001 Evolutionszeiteinheiten vergangen, von denen wir gerade erst eine hinter uns haben.

Gigantisch ist also die Zeit, die vor uns liegt. Wir stehen nicht am Ende, wohl nicht in der Mitte, sondern vermutlich erst am Anfang einer Entwicklung. Wir stecken vermutlich in den aller ersten Kinderschuhen, stellen die ersten sinnvollen Fragen. Wir haben also eine ungeheuer interessante Zukunft vor uns, wenn - ja - wenn wir sie nicht durch eigenes Unvermögen vereiteln und gar nicht erst erwachsen werden, uns unsere Jugend und vielleicht eine große Karriere verbauen.

Wie eng in der Perspektive, ja wie weltfremd im wahrsten Sinne des Wortes erscheint da doch jede Endzeiterwartung, die immer wieder im Verlauf der Geschichte aufgetaucht ist und die auch in heutiger Zeit manchmal auftaucht. Man sollte sich ihrer erwehren; sie lähmt die Initiative, unsere kleine Welt so zu gestalten, dass wir von der großen Welt noch genügend mitbekommen.

Ein weiterer Gedanke, der sich aufdrängt, ist folgender: ich hatte 1 Million Jahre gleich einer Evolutionszeiteinheit gesetzt. Einem Alter von 15 Milliarden Jahren entsprechen so 15.000 Evolutionseinheiten. Erst in der letzten davon ist auf unserer Erde eine Form von Leben entstanden, das sich seiner selbst bewusst ist. Wir wissen zwar nicht, ob in den Tiefen des Weltalls so etwas schon früher passiert ist; aber offensichtlich braucht die Evolution eine sehr lange Zeit, um solche komplexen Systeme hervorzubringen. Die Lebensbedingungen mussten auch erst dafür gegeben sein.

Die meiste Zeit existierte das Universum aber ohne solch ein Leben, und jetzt kommt der Punkt: So wie der Anfang des Universums so unwirtlich war, dass komplexe Systeme nicht in ihm existieren konnten, so wird auch das Ende, wie lang es auch sein wird, untauglich sein zur Beherbergung von komplexen Wesen, zumindest von solchen, wie wir es sind. Das Schicksal des Universums ist nicht mit dem Schicksal der Menschheit verknüpft. So wichtig sind wir nicht für das Universum. Jene Haltung, die die Erde unbedingt im Mittelpunkt der Welt stehen sehen wollte und für den Menschen einen zusätzlichen Akt der Schöpfung, mag auch daran festhalten, dass mit dem Ende der Menschheit auch die Welt zu Ende sein müsse. Für diese Ansicht gibt es aber, wenn wir uns in der Welt umsehen, nicht den geringsten Anlass.

Es ist aber müßig, sich das Lebensgefühl einer Zivilisation vorzustellen, die am Abend der Welt leben muss, zu einer Zeit, in der man nicht mehr sagen kann: Das Leben geht weiter. Selbst bis zu der Zeit, in der sich die Sonne allmählich zu einem Roten Riesen aufbläht und die Erdbahn verschluckt, werden 4 Milliarden Jahre, also 4.000 Evolutionszeiteinheiten vergehen. Leben und Bewusstsein werden sich weiterentwickeln - wie, das wissen wir allerdings nicht.

Wir können aber das fördern und pflegen, was diese Entwicklung maßgeblich beeinflussen wird: die Wissenschaft - und dabei mitwirken, dass diese wirklich zu einer Steigerung der Lebens- und Erlebensfähigkeit der Menschheit beiträgt.