

<b>Zeitschrift:</b>	Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Annuaire de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerische Naturforschende Gesellschaft
<b>Band:</b>	161 (1981)
<b>Artikel:</b>	Vom Ursprung des Universums
<b>Autor:</b>	Weisskopf, Victor F.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-90836">https://doi.org/10.5169/seals-90836</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 08.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Vom Ursprung des Universums

Victor F. Weisskopf

Als ich die Einladung der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft bekam, einen Vortrag über den Ursprung des Universums zu halten, habe ich mich sehr gefreut. Nicht nur wegen der grossen Ehre, die mir damit bewiesen ist, sondern weil dieses Thema so ungeheuer interessant und gross ist, dass es sehr weit über die rein wissenschaftliche Bedeutung hinausgeht. Es hat Beziehungen zur menschlichen Existenz, zur Mythologie, zur Religion und ist als solches eines der aufregendsten Themen, mit denen sich ein Wissenschaftler befassen kann. Ich muss aber gestehen, dass ich kein Experte der Kosmologie bin. Es gibt Leute, die viel mehr davon verstehen, und ich kann meine Wahl durch den Rat nur dadurch begründen, dass Experten oft nicht so klar vortragen wie Nicht-Experten, weil sie nämlich durch die Menge der Einzelheiten daran gehindert sind.

Weiterhin ist das Faszinierende an diesem Thema, dass man automatisch zu Fragen kommt, die mit der fundamentalen Struktur der Materie zu tun haben, nämlich mit den Elementarteilchen. Heute trifft die Wissenschaft des ganz Grossen, die Kosmologie, mit der Wissenschaft des ganz Kleinen, der Elementarteilchen-Forschung, zusammen. In dieser zweiten Richtung muss ich mich leider als Experte betrachten und hoffe, dass ich dann nicht in den Fehler falle, Ihnen darüber zu viel zu erzählen.

Nun muss ich in der Tat mit den Elementarteilchen anfangen, denn nur so können wir verstehen, wie die heutigen Ideen über den Ursprung des Universums zustandegekommen sind.

## Die Struktur der Materie

In der Abbildung 1 habe ich versucht, in ganz elementarer Weise die Stufen der Ma-

terie darzustellen. Wir fangen mit einem Stück Metall als Beispiel an: Das besteht aus Atomen. Die Atome werden durch die chemische Kraft zusammengehalten, die an sich keine sehr grossen Energien enthält. Das Elektronenvolt (eV) ist ein Mass der Energie. Die Kräfte, die die Atome zusammenhalten, sind von dieser Größenordnung. Jetzt nehmen wir ein Atom heraus. Wir wissen dann, dass dieses Atom aus einem Kern und mehreren Elektronen besteht. Sie werden durch die elektrische Kraft zusammengehalten, die bereits etwas stärker ist, in der Größenordnung von 10 eV. Die Grösse der Atome ist ungefähr  $10^{-8}$  cm. Der Kern selbst – vergrössert betrachtet – besteht aus Protonen und Neutronen, die durch die Kernkraft zusammengehalten werden; eine Kraft, die bedeutend stärker ist, nämlich von der Größenordnung 10 Millionen Elektronenvolt (MeV). Der Kern selbst ist auch sehr viel kleiner, nämlich  $10^{-12}$  cm.

Heute weiss man, dass die Protonen und Neutronen, die sogenannten Nukleonen, selbst auch wieder nicht elementar sind, sondern wahrscheinlich aus drei Elementarteilchen bestehen, die den unglücklichen Namen «Quark» führen. Man hätte einen besseren Namen wie «Parton» wählen sollen, aber nun blieb der Term «Quark» stecken.

Hier finden wir wieder viel grössere Kräfte, die die Quarks zusammenhalten. Sie sind nämlich von der Größenordnung GeV, eine Milliarde eV, und die Grösse dieser Nukleonen ist ungefähr  $10^{-13}$  cm. Die Kernkraft selbst, die die Protonen und Neutronen zusammenhält, wird heute als eine Folge dieser starken Kraft verstanden, die die Quarks zusammenhält. Diese Kräfte binden in schwächerem Masse auch die Nukleonen im Kerne zusammen, so ungefähr wie die chemischen Kräfte die Atome zusammenbinden. Die chemischen Kräfte sind ja auch schwächer als die Kräfte im Atom.

Tab. 1. Die Quantenleiter.

Reich	Energie	Ort in der Natur
1. Atom-Reich	~ eV	Erde, Planeten, Oberfläche der Sterne
Atome, Moleküle, Chemie, feste Körper, Flüssigkeiten, Gase, Plasma, Optik		
2. Kern-Reich	~ MeV	Inneres der Sterne
Protonen-Neutronen, Kernreaktionen, Fission, Fusion, Radioaktivität		
3. Subnukleares Reich	~ GeV	kosmische Katastrophen, Neutronen-Sterne, Urknall
Angeregte Protonen, Mesonen, Anti-Materie, Schwere Elektronen, Quarks, Gluonen, kurzlebige Teilchen		

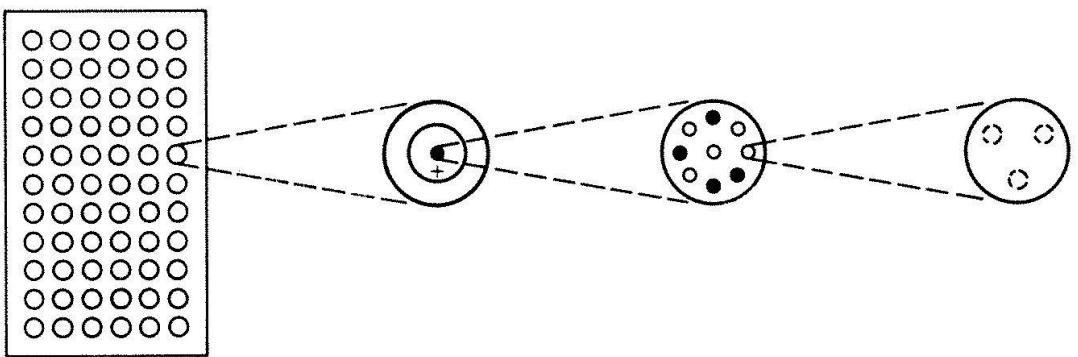
Dann möchte ich noch die Existenz des Phänomens der Radioaktivität erwähnen, das von einiger Wichtigkeit sein wird. Es besteht darin, dass die Quarks ihre Natur ändern. Es gibt Quarks mit verschiedener Ladung und Natur. Der Effekt der Radioaktivität besteht darin, dass ein Quark in ein anderes übergeht und dabei andere Teilchen, Elektronen und Neutrinos emittiert.

Die Sachlage, die in Abbildung 1 angedeutet ist, führt uns zum Begriff der Quantenleiter, die eine wichtige Rolle in der Geschichte des Universums spielen wird (siehe Tabelle 1). Man kann gewissermaßen drei Reiche – bis heute wenigstens – unterscheiden. Erstens das atomare Reich, bei dem es sich um die Atome und ihre Wechselwirkungen handelt: Moleküle, Chemie, feste Körper, Flüssigkeiten, Gase, Plasma, Optik und eigentlich auch die Biologie. Die Wechselwirkungen sind von der Größenordnung von einigen eV. In der Natur finden sich die Prozesse der ersten Stufe der Quantenleiter auf der Erde, auf den Planeten und auf der Oberfläche der Sterne.

Das Kernreich, die nächste Stufe der Leiter, hat viel höhere Energien. Im atomaren Reich sind die Kerne fest, sie verändern sich nicht, sie bleiben wie sie sind. Wenn man aber Energien von Millionen Elektronenvolt anwendet, dann gibt es Kernreaktionen, es gibt Fission und Fusion, und der Prozess der Radioaktivität tritt ein. In der Natur findet man diese Erscheinungen im Innern der Sterne, sie produzieren die Sternenergie. Das bisschen Radioaktivität, das man auf der Erde findet, ist der Überrest aus der Zeit, als die Erdmaterie von irgendeiner Supernova in den Weltraum geschleudert wurde.

Die dritte Stufe ist das subnukleare Reich, dem z.B. das CERN-Laboratorium gewidmet ist, und da handelt es sich um Energien von vielen GeV. Dann findet man angeregte Protonen, neuartige Teilchen wie Mesonen, Antimaterie in grossen Mengen, neben den gewöhnlichen Elektronen noch andere schwere Elektronen, Quarks und Gluonen. Die Gluonen sind die Quanten der starken Kraft, die die Quarks zusammenhält. Und zudem findet man viele, viele kurzlebige Einheiten, die erscheinen und bald wieder verschwinden und sich in andere Energieformen verwandeln. Ich erinnere Sie hier an die Tatsache, dass Materie und Antimaterie, Teilchen und Antiteilchen, wenn sie zusammen treffen, sich gegenseitig vernichten und ihre Massen-Energie in Strahlung verwandeln. Abgesehen von unseren Laboratorien, sind diese Phänomene wahrscheinlich in der Natur nur in kosmischen Katastrophen zu finden, wie z.B. in Neutronen-Sternen und vor allem im Urknall, am Anfang des Universums, als, wie wir sehen werden, diese Prozesse eine ganz bedeutende Rolle spielen.

«Was sind nun die Elementarteilchen aufgrund unseres heutigen Wissens?» Wir kennen heute fünf Quarks mit verschiedenen Eigenschaften, auf die wir nicht eingehen. Sie tragen elektrische Ladungen, die ein Bruchteil der Einheitsladung sind, ein Drittel oder zwei Drittel. Sie haben verschiedene Massen, was wir heute überhaupt noch nicht verstehen. Das Interessante ist, dass sie sich immer nur in Verbindungen von drei Quarks oder einem Quark mit einem Anti-Quark befinden und niemals – bis heute wenigstens – allein isoliert gefunden wurden. Scheinbar



Objekt:	Materie	Atom	Kern	Proton oder Neutron
Bestandteile:	Atome	Kern Elektronen	Protonen Neutronen	Quarks
Grösse (cm):	beliebig	$10^{-8}$	$10^{-12}$	$10^{-13}$
Verbindende Kraft:	chemische Kraft	elektrische Kraft	Kernkraft	starke Kraft
Energie (eV):	1	10	$10^6$	$10^9$

Abb. 1. Stufen der Materie.

ist die Kraft zwischen ihnen so stark, dass man sie nicht trennen kann. Das ist aber noch nicht ganz sicher.

Neben diesen Quarks haben wir die Leptonen, deren Hauptrepräsentant das Elektron ist. Nun gibt es, wie ich vorhin andeutete, völlig unverständlicherweise, schwere Elektronen, die sogenannten Myonen und Tauonen, die sich vom Elektron durch nichts unterscheiden als durch ihre Masse. Außerdem haben sie eine kurze Lebensdauer, denn sie können unter Emission von Neutrinos in gewöhnliche Elektronen übergehen. Sie sind also kurzlebige Dinge, während das gewöhnliche Elektron – wie wir glauben – eine unendliche Lebensdauer hat. Neben diesen Elektronen gibt es dann noch die Neutrinos, die im Universum auch eine wichtige Rolle spielen. Es gibt verschiedenartige Neutrinos, für jedes Elektron ein spezielles.

Die weiteren Elementarteilchen sind die Träger der Wechselwirkungen. Die bis jetzt genannten Teilchen haben Wechselwirkungen, d.h. es gibt Kräfte zwischen ihnen: Wir unterscheiden elektromagnetische Wechselwirkungen, z.B. die Kraft, die die Elektronen an den Atomkern bindet, die schwachen Wechselwirkungen, die die Radioaktivität hervorrufen, und die starken Wechselwirkungen: die Kräfte zwischen den Quarks, die

die Quarks zusammenhalten. Und dann gibt es natürlich auch die Gravitation. Solche Wechselwirkungen, solche Kraftfelder, haben auf Grund der Quantenfeldtheorie immer die Eigenschaft, dass sie durch gewisse Teilchen übertragen werden: die Feldquanten. Bei der elektromagnetischen sind es natürlich die bekannten Photonen, bei den schwachen Wechselwirkungen hypothetische Teilchen mit hoher Masse, die sogenannten W- und Z-Bosonen, die bis heute noch nicht gefunden sind; die starke Wechselwirkung zwischen den Quarks ist durch Gluonen übertragen. Bei der Gravitation sind die Feldquanten die sogenannten Gravitonen. Wir werden wenig über diese sprechen. Letztthin hat sich herausgestellt, dass die elektromagnetischen und die schwachen Wechselwirkungen miteinander verknüpft sind.

Die früher beschriebene Quantenleiter führt zu einem Begriff, der wichtig für die Entwicklung des Universums sein wird: bedingte Elementarität. Was ist damit gemeint? Zur Beurteilung, wie elementar ein Teilchen ist, kommt es darauf an, was für Energieaustausche stattfinden. Wenn man z.B. Energieaustausche hat, die unter einem eV liegen, wie z.B. in der Luft zwischen den Luftmolekülen, dann sind sogar die Atome und selbst

die Moleküle Elementarteilchen, weil sie sich ja nicht verändern. Das Wesentliche am Elementarteilchen ist, dass es so bleibt, wie es ist. Und dann gibt es natürlich das Licht, die Photonen. Wenn man dann aber zu einem höheren Energieaustausch geht, z.B. 10000 eV, dann gibt es noch immer die Photonen, aber dann werden die Atome in Kerne und Elektronen auseinandergerissen. Auf dieser Stufe sind also die Kerne und die Elektronen die Elementarteilchen. Wenn wir weitergehen in die Gegend von 100 MeV, dann haben wir wieder die Photonen und Elektronen, aber bei dieser Energie sind die Kerne in Neutronen und Protonen zerlegt, weil die Energie, die sie zusammenhält, kleiner ist als 100 MeV. Es gibt auch Elektronen, und wegen der schwachen Wechselwirkung kommen in diesem Gebiet auch die Neutrinos zur Wirkung. Und wenn man dann noch weitergeht in die Region der GeV, dann kommen eben die erwähnten neuen Erscheinungen heraus, nämlich schwere Elektronen, Neutrinos, Mesonen aller Arten. Auch sollten dann die Träger der schwachen Wechselwirkung aufscheinen. Sie sind bis heute zwar – wie gesagt – noch nicht entdeckt, aber es ist sehr wahrscheinlich, dass sie existieren. Außerdem gibt es dann noch die Quarks und die Gluonen, die die Quarks zusammenhalten. Es ist natürlich eine interessante Frage, ob wir damit schon bei den wirklichen Elementarteilchen angelangt sind. Vielleicht geht diese Liste weiter und weiter. Darüber möchte ich dann am Ende noch sprechen.

## Das heutige Universum

Bevor wir uns mit der Entwicklung des Weltalls beschäftigen, möchte ich zwei Bemerkungen machen: Alles, was ich hier sagen werde, steht nicht ganz fest. Die Beobachtungen sind natürlich sehr schwierig, und daher wissen wir nicht genau, ob die Dinge wirklich den Tatsachen entsprechen. Die zweite Bemerkung ist die, dass ich die Sachlage vereinfachen werde. Ich tue es aus zwei Gründen: weil ich es nicht besser weiß und um die Sache ein bisschen leichter verständlich zu machen.

Um die Geschichte des Weltalls zu verstehen, muss man einige wichtige Tatsachen

über das heutige Universum festhalten. Ich teile sie in vier Abschnitte, über die ich dann im einzelnen sprechen werde.

Erste Tatsache: das heutige Universum besteht eigentlich nur aus Wasserstoff und Helium. Ungefähr 92 Prozent aller Atome im ganzen Weltall sind Wasserstoffatome, ungefähr 8 Prozent Helium, und der Rest, nur 0.1 Prozent, sind Atome anderer Art wie etwa Sauerstoff, Kohlenstoff, Eisen usw.

Die zweite Tatsache ist vielleicht eines der überraschendsten Phänomene, das in den letzten 80 Jahren entdeckt worden ist; es ist die Ausdehnung, die Expansion des Universums. Heute kann man mit ziemlicher Sicherheit behaupten, dass sich das Universum tatsächlich ausdehnt, und zwar so, dass sich die Dinge um so rascher von uns weg bewegen, je weiter sie von uns entfernt sind.

Der dritte Punkt ist die heutige Verteilung der Materie im Weltraum. Das ist ein sehr schwieriger Punkt, denn es kann ja immer Materie existieren, die man nicht beobachtet hat. Man sieht nur leuchtende Materie, aber man kann Schlüsse ziehen über weitere Materie durch Gravitations- und andere Effekte. Wir interessieren uns hier weniger für die detaillierte Verteilung wie Sternsysteme oder Ansammlungen von Galaxien. Wichtig für uns ist die Dichte der Materie, gemittelt über ganz grosse Gebiete, die sehr viele Sternsysteme enthalten. Jedenfalls weiß man heute ungefähr, sehr ungefähr, dass es durchschnittlich  $10^{-6}$  Protonen oder Neutronen pro Kubikzentimeter gibt, wenn man über sehr grosse Distanzen mittelt. Die Dichte ist natürlich viel grösser innerhalb eines Milchstrassensystems und viel kleiner in den Zwischenräumen. Wir geben hier den Durchschnittswert an.

Die vierte Tatsache ist von grosser Wichtigkeit: Der ganze Raum ist von einer Wärmestrahlung erfüllt, deren Temperatur ungefähr drei Grad über dem absoluten Nullpunkt (3 °K) liegt. Aller Wahrscheinlichkeit nach ist sie eine Strahlung, die zu einer sehr frühen Periode des Weltalls ausgesandt wurde. In diesem Sinne kann sie als der optische Widerhall des Urknalls betrachtet werden, der vor vielen Milliarden Jahren stattgefunden hat. Dass man also sozusagen den Urknall heute noch «sehen» kann, ist wohl eine der überraschendsten Entdeckungen der modernen Wissenschaft.

Ich möchte jetzt über einige dieser Punkte näher im Detail sprechen, und zwar fangen wir mit der Expansion an. Ich werde in meinen Ausführungen durchwegs annehmen, dass das Universum unendlich ist. Das ist nicht ganz sicher; wenn die Dichte der Materie hoch genug ist, könnte es nach Einstein ja auch ein endliches Universum sein, das aber keine Grenzen hat, indem es geschlossen ist wie die Oberfläche einer Kugel im Zweidimensionalen. Aber es genügt, um die Prinzipien zu verstehen, wenn wir das vergessen und annehmen, was durchaus den Tatsachen entsprechen könnte, dass das Universum wirklich unendlich ist.

Die Expansion des Weltalls wurde entdeckt, als man fand, dass sich kosmische Objekte von uns weg bewegen, und zwar umso rascher, je weiter sie von uns entfernt sind. Die Geschwindigkeit dieser Wegbewegung beträgt ungefähr 15 km in der Sekunde pro Million Lichtjahre Entfernung. Diesen Geschwindigkeitszuwachs per Distanz nennt man «Hubble-Konstante». Man muss sich diese Expansion als eine Verdünnung vorstellen. Überall im ganzen unendlichen Raum verdünnt sich die Materie und jeder Punkt könnte dann die Mitte dieser Verdünnung sein. Abbildung 2 ist ein eindimensionales Beispiel. Wir haben da Punkte Z, A, B, C, D. Wenn wir uns in A befinden, dann sehen wir Z sich nach links und B sich nach rechts bewegen und C, weil es weiter weg ist, sich stärker nach rechts und D sich noch stärker nach rechts bewegen. Aber wenn jemand sich in B oder C befindet, würde er natürlich genau dasselbe sehen, relativ gesprochen, so dass diese Ausdehnung keinen Punkt des Universums auszeichnet, also im ganzen unendlichen Universum überall dieselbe ist.

Aus dieser Ausdehnung oder Verdünnung könnte man sofort einen merkwürdigen

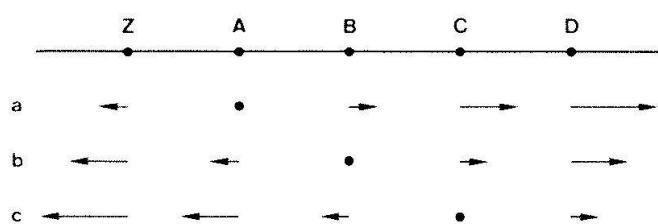


Abb. 2. Eindimensionales Beispiel der Expansion des Weltalls. Die Zeilen a, b, c zeigen die Geschwindigkeit von A, B, C aus gesehen.

Schluss ziehen: wenn die Hubble-Konstante wirklich konstant ist, so kann man ja auch zurück extrapolieren. Dann kann man sich leicht ausrechnen, dass vor 20 Milliarden Jahren die Dichte unendlich gewesen sein müsste. Allerdings nur dann, wenn die Expansion immer mit demselben Tempo gegangen wäre. Nun kann man aber leicht schliessen, dass sich die Expansion verlangsamt, weil sich die Massen im Universum ja durch die Gravitation anziehen, was gegen das Auseinanderstreben wirkt. Die Verlangsamung kann man mit Hilfe der halbwegs bekannten Massendichte berechnen. Man kommt zum Resultat, dass tatsächlich der Zeitpunkt der unendlichen Dichte, diese Singularität, vor kürzerer Zeit als 20 Milliarden Jahren stattgefunden hat, weil es ja am Anfang rascher gegangen ist. Diese Rechnung zeigt, dass es eher vor 18 Milliarden Jahren war. Jedenfalls kann man ungefähr das Datum des Urknalls bestimmen. Dieser Zeitpunkt ist der natürliche Nullpunkt der Zeit. Das ist die moderne Zeitrechnung: Sie fängt mit dem Urknall an.

Nun möchte ich eine wichtige Bemerkung machen: In vielen populären Darstellungen ist der Urknall nicht richtig beschrieben. Der Urknall ist kein lokales Phänomen. Es ist nicht so, dass der Urknall an einer Stelle des Universums stattgefunden hat und die Materie dann von diesem Punkt nach allen Richtungen weggeschleudert wurde. Nein, der Urknall ist der Anfang einer Dekompression des unendlichen Universums. Das heisst, zur Zeit «Null» war das ganze Universum, der unendliche Raum, mit einer unendlichen Dichte erfüllt, was schwer vorstellbar ist. Gleich danach wurde sie endlich, aber sehr hoch. Sie war aber überall dieselbe; mit der Zeit dehnte sich das Universum aus, und die Dichte nahm überall gleichmäßig ab. Man könnte einwenden, das geht doch nicht, wo hin dehnt es sich denn aus? Nun, es war ja unendlich, zehnmal unendlich ist ja auch unendlich. Also hat der Urknall überall stattgefunden, und es ist nicht so, dass er an einem Punkt stattfand, und dass die Materie sich von diesem Punkt aus in eine leere Umgebung verbreitet hat. Falls das Weltall heute endlich ist, aber ohne Grenzen, so wäre es allerdings zur Zeit des Urknalls zu einem Punkt zusammengeschrumpft. Dann aber gäbe es kein «ausserhalb» dieses Punk-

tes. In diesem Sinne hätte dann der Urknall auch überall stattgefunden.

Nun möchte ich einen neuen Begriff einführen: den Begriff des Kommunikationsradius. Heute sehen wir sehr ferne Sterne. Aber natürlich kann uns Nachricht nur von Distanzen kommen, die kleiner sind als etwas, das ich  $R_k$  nenne, eben den Kommunikationsradius. Es kann uns nur Nachricht kommen von Punkten, von denen die Zeit, die das Licht braucht, herzukommen, kürzer ist als die Zeit vom Urknall bis heute. Das heißt, wenn die heutige Zeit, vom Urknall gerechnet, ungefähr 18 Milliarden Jahre zählt, so ist der heutige Kommunikationsradius 18 Milliarden Lichtjahre, und nicht mehr. Von weiter her können wir keine Nachricht bekommen. Früher natürlich, sagen wir vor 10 Milliarden Jahren, war der Kommunikationsradius kleiner, weil weniger Zeit seit dem Urknall vergangen war. Man beachte, dass das, was wir heute an der Grenze von 18 Milliarden Lichtjahren sehen, noch nie vorher in Kontakt mit uns war. Es konnte nicht, weil das Licht nicht genügend Zeit hatte, herzukommen. Zum Beispiel die Drei-Grad-Strahlung, die wir heute von allen Richtungen sehen, kommt von so weit weg, dass wir heute zum ersten Mal in einer Kommunikationsverbindung mit den Dingen sind, die sie ausgestrahlt haben. Das hat eine wichtige Konsequenz, wie wir bald sehen werden.

Nun komme ich zur Drei-Grad-Strahlung. Ich sagte, der Raum sei erfüllt mit einer Wärmestrahlung von  $3^{\circ}\text{K}$ , die von allen Richtungen kommt. Es ist der optische Nachhall des Urknalls. Die Intensität dieser Strahlung entspricht ziemlich genau dem, was wir von einer solchen Wärmestrahlung erwarten: ungefähr 1000 Photonen pro Kubikzentimeter. Das ist eine Milliarde mal mehr als Protonen. Aber energetisch ist das nicht sehr viel, denn die Photonen einer Drei-Grad-Strahlung haben eine sehr kleine Energie. Tatsächlich ist die Energie der Wärmestrahlung ungefähr ein Viertausendstel der Massenenergie  $mc^2$  der Materie.

Die Temperatur von  $3^{\circ}\text{K}$  kann man auch als die heutige Temperatur des Weltalls betrachten, denn die Temperatur der heißen Sterne, die es da überall gibt, macht gar nichts aus, wenn man über den ganzen Raum mittelt. Es ist die Lichtstrahlung, die

die Temperatur bestimmt. Nun komme ich zu einer wichtigen Feststellung: Die Drei-Grad-Strahlung scheint ganz uniform zu sein, d.h. sie hat gleiche Intensität von allen Richtungen. Sie scheint also den Raum völlig gleichmäßig zu erfüllen. Daher ist es möglich durch den Dopplereffekt die Bewegung der Erde, des Sonnensystems und sogar des Milchstrassensystems zu beobachten. In der Tat findet man in einer Richtung die Frequenzen der Drei-Grad-Strahlung ganz wenig höher und in der umgekehrten Richtung etwas tiefer, was man nur so deuten kann, dass unser Sonnensystem sich in Richtung der höheren Frequenz bewegt. Wenn man die Geschwindigkeit dieser Bewegung dann ausrechnet, so sind es ungefähr 300 km/Sekunden. Bei Analyse der Richtung stellt sich heraus, dass es teilweise die Bewegung des Sonnensystems in der Milchstrasse ist, aber teilweise auch die Bewegung der Milchstrasse gegen den sog. Virgo-Cluster. Es ist interessant, dass es damit sinnvoll wird, von einer absoluten Bewegung zu sprechen: Der grosse Traum von Michelson und Morley ist in Erfüllung gegangen. Sie wollten doch die absolute Bewegung der Erde messen und nahmen an, dass die Lichtgeschwindigkeit in der Richtung dieser Bewegung verschieden sei von derjenigen in anderen Richtungen. Nach Einstein ist die Lichtgeschwindigkeit aber in jedem System unabhängig vom Bewegungszustand immer die gleiche. Aber die Drei-Grad-Strahlung gibt uns ein fixes Koordinatensystem. Es ist an jeder Stelle des Universums sinnvoll, zu sagen, was der Ruhezustand ist: Es ist jener Zustand, in dem die Drei-Grad-Strahlung uniform erscheint. Die tiefere Bedeutung dieser Erkenntnis ist noch nicht klar.

## Die Entwicklung des Universums

Was können wir aus den heutigen Gegebenheiten des Weltalls schliessen? Offensichtlich ist das Universum nicht statisch; es verändert sich. Wegen der Expansion nimmt die Dichte der Materie mit der Zeit ab, während im grossen Durchschnitt die Materiedichte überall im Raum dieselbe zu sein scheint. Der Zeitablauf bestimmt auch den Dichteablauf, nur in der umgekehrten Richtung.

Mehr Dichte, frühe Zeit; weniger Dichte, späte Zeit.

Nun wenden wir das Prinzip der Erhaltung der Energie an. Die grössere Dichte verringert die potentielle Energie der Gravitation, weil wegen der höheren Dichte die Anziehung grösser wird. Die kinetische Energie muss daher wachsen, um die Gesamtenergie gleich zu erhalten.

Die kinetische Energie ist hauptsächlich die Energie der wegeilenden Materie in der Expansion. Daher muss die Geschwindigkeit zunehmen, wenn man in der Zeit zurückgeht. Damit erklärt sich die Verlangsamung der Expansion in der positiven Zeitrichtung. Das kann man genau berechnen: wie schon früher erwähnt, ist die Zeit vom Urknall bis heute etwas kleiner, als man direkt von der heutigen Expansion und Dichte folgern würde.

Nun möchte ich Ihnen ein paar Kurven zeigen, die im wesentlichen das Ergebnis dieser Rechnung sind. Um diese Resultate quantitativ darzustellen, wollen wir das Schicksal der Materie betrachten, die sich heute innerhalb des Kommunikationsradius befindet; das ist jene Materie, mit der wir heute kommunizieren.

In früherer Zeit war dieselbe Materie innerhalb eines kleineren Radius enthalten, denn sie hatte sich ja inzwischen ausgedehnt. Nennen wir  $R$  den Radius, der jene Materie umschliesst. Heute ist  $R$  gleich dem heutigen Kommunikationsradius, nämlich 18 Milliarden Lichtjahre oder  $10^{28}$  cm. «Heute» ist  $3 \times 10^{17}$  Sekunden in unserer Zeitrechnung. In der halben Zeit -  $1.5 \times 10^{17}$  Sekunden nach dem Urknall - war  $R$  nur  $0.63 \times 10^{28}$  cm, etwas mehr als die Hälfte. Abbildung 3 zeigt die Zeit-Abhängigkeit von  $R$ .

Nun wenden wir uns der Temperatur im Weltall zu. Heute ist sie  $3^{\circ}\text{K}$ . Die Temperatur ist immer umgekehrt proportional zum Radius  $R$ . Das sieht man so: Wenn sich die Materie ausdehnt, so dehnt sich auch das Licht aus, d.h. die Wellenlängen werden grösser und ihre Frequenz dementsprechend kleiner. Nun ist aber die Temperatur der Wärmestrahlung proportional der Frequenz des Lichtes. Also bedeutet eine Verdopplung der Ausdehnung eine Halbierung der Temperatur. Umgekehrt, als der Radius  $R$  halb so gross war, war sie zweimal so gross ( $6^{\circ}\text{K}$ ). Es war heißer in früheren Zeiten. Die gebro-

chene Linie in Abbildung 3 stellt die Zeitabhängigkeit der Temperatur dar. Zur Zeit Null (Urknall) war sie natürlich unendlich hoch.

Abbildung 3 enthält auch die Werte des Kommunikationsradius  $R_K$ . Er ist ja nichts anderes als die Distanz, die das Licht seit dem Urknall zurückgelegt hat. Die gestrichelte Linie gibt seinen Wert an. Er wird auch kleiner, wenn man in der Zeit zurück geht, und zwar stärker als  $R$ . Man sieht in der Figur, dass er unterhalb  $R$  liegt. Das heisst, die äusseren Teile der Materie, die heute innerhalb des jetzigen Kommunikationsradius liegen, haben in der Vergangenheit noch nicht mit uns kommuniziert. Wir haben darauf schon früher hingewiesen.

Jetzt wenden wir uns den Ereignissen zu, die zu sehr kurzen Zeiten stattgefunden haben, so kurz, dass sie in Abbildung 3 nicht sichtbar sein können. Um zu sehen, was kurz nach dem Urknall stattfand, verwenden wir in Abbildung 4 eine logarithmische Zeitskala, die die Zehnerpotenzen der Zeit angibt. Das rechte Ende der Abszisse entspricht «heute», da heute etwa  $10^{17}$  Sekunden seit dem Urknall vergangen sind; das linke Ende der Zeit einer Millionstelsekunde nach dem Urknall. Nachdem die Temperatur sich reziprok zum Radius  $R$  verhält, können in diesem logarithmischen Diagramm beide durch die gleiche Kurve dargestellt werden, wenn die Skala des Radius nach oben zunimmt, die Skala der Temperatur aber nach oben abnimmt.

Wir sehen in Abbildung 4, dass am Zeitpunkt von  $10^{13}$  Sekunden (ungefähr 300 000

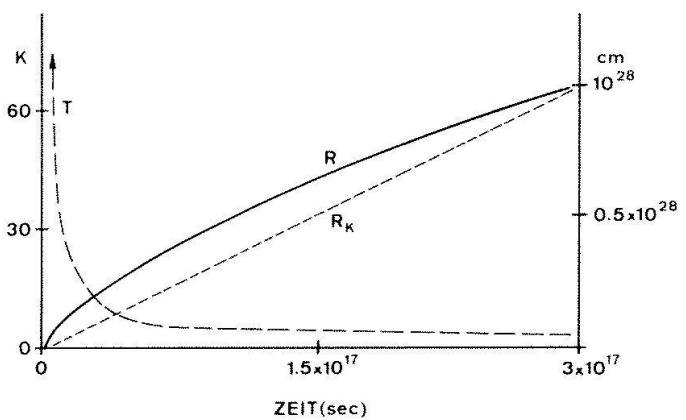


Abb. 3. Massenradius  $R$ , Kommunikationsradius  $R_K$  (Skala rechts) und Temperatur (Skala links) als Funktion der Zeit seit dem Urknall.

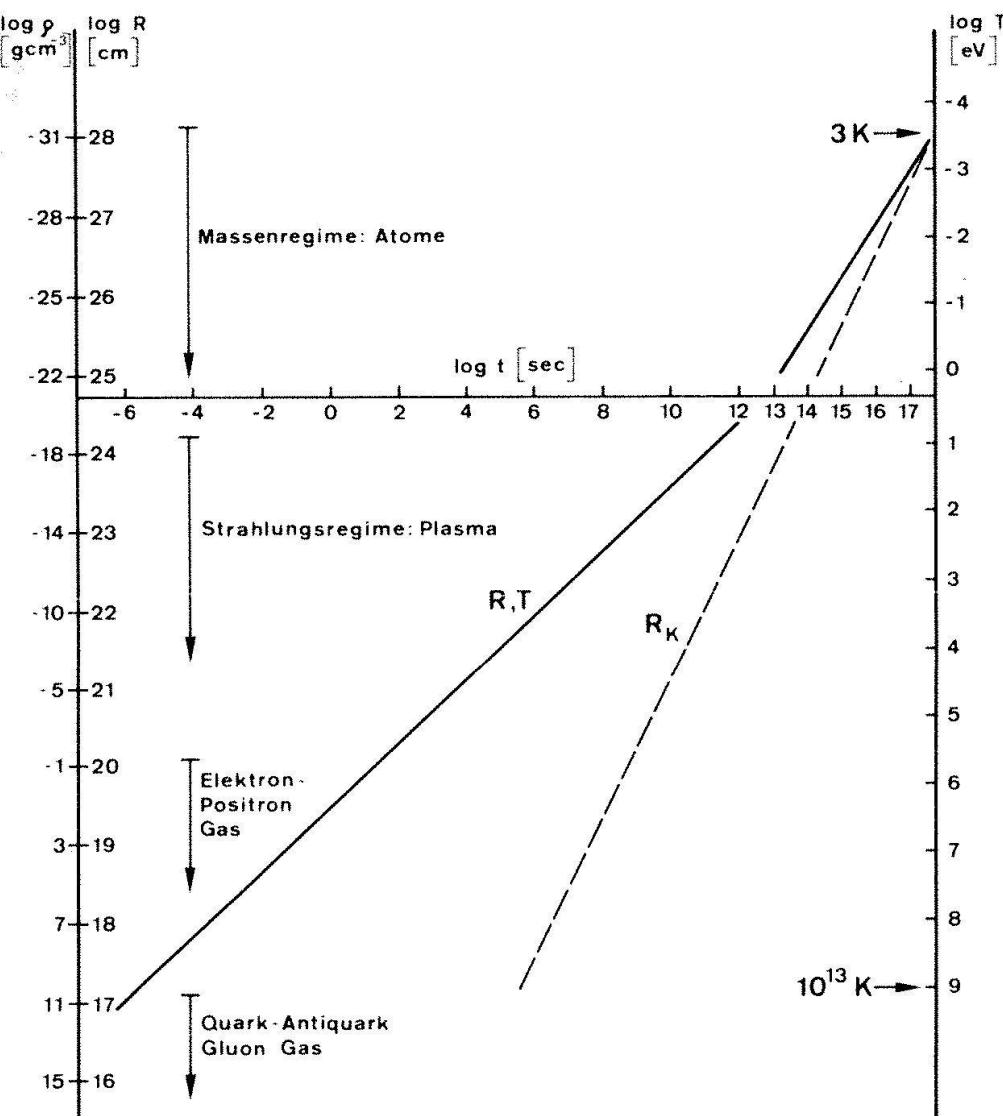


Abb. 4. Massenradius, Dichte, Temperatur und Kommunikationsradius als Funktion der Zeit in logarithmischer Darstellung. Die Ordinate links gibt den Logarithmus von  $R$  an und auch den Logarithmus der Dichte ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) einschliesslich des «Gewichtes» der Strahlung. Die Ordinate rechts zeigt den Logarithmus der Temperatur. Hier ist die Temperatur in Energie-Einheiten (Elektronenvolt) gemessen. Es ist die Energie der Wärmebewegung pro Teilchen. Ein Grad Kelvin ( $1 \text{ K}$ ) entspricht etwa  $10^{-4}$  Elektronenvolt.

Jahre nach dem Urknall) eine Änderung eintrat. Um diese Zeit war die Temperatur etwa  $4000 \text{ }^\circ\text{K}$ ; das ist fast ein Elektronenvolt. Bei dieser und bei höheren Temperaturen kann es keine Wasserstoff- oder Heliumatome geben, sondern nur ein Plasma von Kernen und Elektronen. Die Wärmeenergie ist nämlich gross genug, um die Elektronen von den Kernen abzulösen. Ein Plasma ist für Licht undurchdringlich, es ist undurchsichtig, während Atome durchsichtig sind, wenn sie nicht in zu grossen Konzentrationen vorhanden sind. Vor diesem Zeitpunkt herrschte ein anderes Regime, das sogenannte Strahlungsregime. Nach diesem Zeitpunkt war die Massenenergie viel grösser als die Strahlungsenergie. Daher nennen wir die Periode von damals bis heute das Massenregime. Vor dem Zeitpunkt von  $10^{13}$  Sekunden befand sich die meiste Energie in der Lichtstrahlung, daher der Name Strahlungsregime.

Eine interessante Folge der Undurchsichtigkeit des Universums vor diesem Zeitpunkt besteht im folgenden: Was wir heute als Drei-Grad-Strahlung beobachten, ist, genau genommen, nicht die Strahlung des Urknalls selber, sondern die Strahlung, die um diesen Zeitpunkt - 300 000 Jahre nach dem Urknall - geherrscht hat. Denn erst nachher konnte sie frei und ungehindert durch den Raum dringen. Die Expansion des Raumes hat sie dann von einer Wärmestrahlung von  $4000 \text{ }^\circ\text{K}$  auf  $3 \text{ }^\circ\text{K}$  herabgesetzt. Was wir heute als diese Strahlung beobachten, wurde also 300 000 Jahre nach dem Urknall, d.h. vor fast zwanzig Milliarden Jahren, von entfernten Regionen ausgesandt. Das zeigt übrigens, dass der Urknall und die darauffolgende Entwicklung überall im ganzen Raum stattgefunden hat. Sonst könnte man ja nicht heute «Nachricht» von dieser Entwicklung aus allen Richtungen bekommen.

Ein weiterer wichtiger Zeitpunkt war 10 Sekunden. Damals war die Temperatur ungefähr eine Million Elektronenvolt (MeV). Vor dieser Zeit, also bei noch höheren Temperaturen, war der Raum nicht nur mit Lichtstrahlung erfüllt, sondern auch mit Elektronenpaaren, positiven und negativen. Die Erzeugung eines Paares bedarf gerade ein MeV und wenn die Temperatur ungefähr so hoch oder höher ist, dann füllt sich das Vakuum mit einem dichten Gas von Elektronen und Positronen. Wir haben dann ein erweitertes Strahlungsregime; nicht nur Licht, sondern auch, wenn wir das Strahlung nennen dürfen, Elektronen und Positronen im thermischen Gleichgewicht. Übrigens war zu jener Zeit die Gesamtdichte schon mehr als ein Kilogramm per Kubikzentimeter.

Der nächste wichtige Zeitpunkt ist eine Millionstelsekunde nach dem Urknall. Vor diesem Zeitpunkt war die Temperatur höher als eine Milliarde Elektronenvolt (GeV). Schon als die Temperatur etwa 100000 eV und höher war (weniger als 1000 Sekunden), waren die Heliumkerne in Protonen und Neutronen aufgelöst. Aber bei Temperaturen höher als ein GeV werden die Quarks nicht mehr innerhalb der Protonen und Neutronen festgehalten. Übrigens war damals die Dichte so gross, dass sich die Protonen und Neutronen überlappt hätten. Ausserdem war die Energie so hoch, dass viele neue Quark-Antiquark-Paare erzeugt wurden und ein dichtes, heißes Gas von Quarks und Antiquarks bildeten. Dieses Gas enthielt auch sehr viele Gluonen, die Quanten des Kraftfeldes, das zwischen den Quarks wirkt. Das Weltall war also vor diesem Zeitpunkt erfüllt von einem Quark-Antiquark-Gas hoher Dichte, einem Gluongas, einem Elektron-Positron-Gas und von der optischen Wärmestrahlung (Photongas).

Als nach ein paar Millionstelsekunden die Temperatur unter ein GeV sank, verschwanden die Gluonen und die Quark-Antiquark-Paare, indem sie sich in Strahlung verwandelten; was übrig blieb waren die ganz wenigen überzähligen Quarks, die sich dann zu Protonen und Neutronen verbanden. Erinnern wir uns nämlich daran, dass es heute im Raum viel weniger Protonen oder Neutronen gibt als Photonen in der Drei-Grad-Strahlung. Die Zahl der Photonen war immer ungefähr dieselbe, nur waren in frühe-

ren Zeiten die Photonen viel «heisser», d. h. energiereicher. Die Anzahl der Gluonen und der Quark-Antiquark-Paare, die in der Zeit vor einer Millionstelsekunde existierten, war etwa ebenso gross. Es war also nur ein ganz kleiner Quarküberschuss, der sich dann zu Protonen oder Neutronen verband.

Hier möchte ich einen Punkt hinzufügen, der bisher vernachlässigt wurde. Bei Temperaturen höher als etwa 1 MeV werden auch viele Neutrinos erzeugt. Daher müssen wir noch ein weiteres Gas hinzufügen; es ist das Neutrino-Antineutrino-Gas. Da die Neutrinos nur sehr schwach mit der Materie wechselwirken, wurde das Universum schon früher für Neutrinos «durchsichtig» als für Licht. Daher ist das Weltall heute wahrscheinlich von einem Neutrino-Gas erfüllt, das sich etwa 100000 Jahre nach dem Knall freigemacht hat. Die Expansion müsste dann die Temperatur dieser bis jetzt zwar noch nicht beobachtbaren Neutrinostrahlung auf etwa 2 °K herabgedrückt haben.

Was an noch früheren Zeitpunkten als  $10^{-6}$  Sekunden stattfand, ist recht hypothetisch. Wenn wir noch näher zum Anfangspunkt rücken, werden die Temperaturen viel höher als 1 GeV. Wir wissen wenig über das Verhalten der Materie unter solchen Bedingungen.

Zusammenfassend möchte ich nochmals einen kurzen Überblick über die Geschichte des Weltalls geben, diesmal in der richtigen Reihenfolge, vom Anfang bis heute. Am Anfang so wie jetzt: immer war das Universum mit Licht erfüllt. Aber am Anfang war es ein Licht von ungeheurer Intensität und Temperatur, während es heute kaltes Licht ist. Wir wissen wenig, was zwischen 0 und  $10^{-6}$  Sekunden geschah. Dann aber finden wir - neben dem Licht - ein dichtes Gas von Quarks, Antiquarks, Gluonen, Elektronen und Positronen und Neutrinos. Nach zirka  $10^{-5}$  Sekunden hat sich das Gas so weit abgekühlt, dass sich die Quark-Antiquark-Paare vernichtet haben, die Gluonen verschwunden sind und dass sich die wenigen übriggebliebenen Quarks zu Protonen und Neutronen verbunden haben. Nach weiterer Ausdehnung und Abkühlung, etwa 10 Sekunden nach dem Anfang, haben sich die Elektron-Positron-Paare vernichtet, und nur wenige Elektronen sind übriggeblieben. Nach ein paar Minuten vereinigten sich die

Neutronen mit einem Teil der Protonen zu Helium-Kernen. So verblieb es relativ lange, bis ungefähr zum Jahr 300 000, als die Temperatur und die Dichte so tief waren, dass sich Atome (Wasserstoff und Helium) bilden konnten. So verblieb es im wesentlichen bis heute: die Temperatur der Strahlung fiel auf 3 °K, und in der Zwischenzeit haben sich Sterne und Galaxien gebildet. Hier endet unsere Skizze des Ursprungs des Weltalls.

## Die ungelösten Probleme

Bisher haben wir die Geschichte des Universums nach rückwärts in der Zeit verfolgt bis etwa  $10^{-6}$  Sekunden. Es ist wohl am Platze, nochmals zu betonen, wie unsicher und hypothetisch unsere Schlussfolgerungen waren. Außerdem stehen wir vor grundlegenden Problemen, die bisher noch gar nicht beantwortet sind. Diese Probleme lassen sich in vier Gruppen einteilen: A: Das Horizontproblem; B: Was geschah vor  $10^{-6}$  Sekunden? C: Der Ursprung des Protonenüberschusses; D: Die kritische Materiedichte; E: Was war vor dem Urknall?

Wir beginnen mit dem ersten Problem: Es wurde bereits betont, dass die Drei-Grad-Strahlung uniform und homogen ist; sie ist von allen Richtungen die gleiche. Es ist heute das erste Mal, dass jene Stellen, die uns die Drei-Grad-Strahlung senden, überhaupt mit uns in Kontakt sind, dass wir von ihnen oder sie von uns etwas «wissen» konnten. Noch weniger konnten die Stellen je in Verbindung gewesen sein, die uns die Drei-Grad-Strahlung aus entgegengesetzter Richtung zustrahlen. Wieso haben sie dieselbe Dichte und Temperatur, wieso ist das alles uniform? Es sieht so aus, als ob am Anfang jemand – ich will den Namen nicht nennen – bestimmt hat, dass die Dichte überall dieselbe sei. Es kann auch sein, dass die Naturgesetze so beschaffen sind, dass am Anfang nur ein und dieselbe Dichte möglich war. Das wäre eine wissenschaftlich befriedigende Lösung. Aber nachdem wir nicht wissen, was vor  $10^{-6}$  Sekunden geschehen ist, können wir eben auf diese Frage keine Antwort geben, denn um die Zeit «Null» herum muss eine Physik gültig sein, die Energieaustausche behandeln kann, welche weit über denen liegen, die wir bis heute studiert haben. Und

daher wissen wir nicht, wie die Gesetze sind, und wir können weder bejahen noch verneinen, dass es nur eine mögliche Dichte geben hat.

Diese Homogenität des Weltalls ist eine ganz grosse Frage. Es ist eigentlich dieselbe Frage, warum alles gleichzeitig angefangen hat, warum also der Urknall auf der ganzen unendlichen Welt im selben Moment geschah. Wenn dem nicht so wäre, würde man von einigen Regionen eine andere Strahlung bekommen, als von anderen. Dies ist noch ein grosses Geheimnis.

Nun zum zweiten Problem: Was geschah vor  $10^{-6}$  Sekunden? Die ehrlichste Antwort wäre: Wir wissen gar nichts. Aber die Wissenschaftler lieben es, zu spekulieren und Hypothesen aufzubauen. Es handelt sich um Temperaturen höher als 100 GeV. Es könnte ja sein, dass das Quark und das Elektron nicht wirklich elementar sind. Erinnern Sie sich an die bedingte Elementarität. Die Quarks und die Elektronen könnten ja aus Infraquarks und Infraelektronen bestehen. Bei genügend hoher Temperatur würde dann ein Gas aus diesen Teilchen und deren Antipartnern existiert haben.

Es gibt jetzt Hypothesen, die alle Naturkräfte auf eine einzige (neben der Schwerkraft) reduzieren wollen. Die heute geläufige unter diesen Theorien ist die sogenannte Grand Unification-Theory. In dieser Theorie gibt es keine Infra-Quarks oder Infra-Elektronen. Sie gibt dafür recht überzeugende Gründe an, nämlich: die jetzt bekannten Teilchen scheinen sich in eine schöne Ordnung einzurichten, in welcher kein Platz für die Infra-Quarks oder Infra-Elektronen wäre. Aber wer weiß, ob diese Einteilung die richtige ist. Wenn also keine Substruktur vorhanden ist, dann erzählt uns diese Theorie, dass bei  $10^{15}$  GeV, das ist  $10^{-36}$  Sekunden nach dem Urknall, alle Wechselwirkungen in eine einzige übergehen. Außerdem sollte es auch noch Feldquanta von ungeheuer hoher Masse geben, die einer Energie von zirka  $10^{15}$  GeV entsprechen. Falls das wahr sein sollte, wären diese Teilchen schon im Weltall vorhanden gewesen, als die Temperatur solche Werte erreichte. Außerdem kommt die Theorie zu einem weiteren überraschenden Schluss: das Proton ist nicht unveränderlich. Es zerfällt in Mesonen und Elektronen, aber im Durchschnitt erst nach  $10^{32}$  Jahren; das ist

$10^{22}$  mal länger als das Alter des Weltalls. Das ist zwar eine lange Zeit, aber wenn man sehr viele Protonen hat, dann zerfallen doch ein paar innerhalb der Lebensdauer eines Menschen. Man versucht heute diesen Zerfall zu messen, und es wird sich bald herausstellen, ob es wahr ist oder nicht.

Nun kommen wir zum dritten ungelösten Problem: der Protonenüberschuss. Er beruht auf der Beobachtung, dass es heute im Universum zwar Materie, aber wenig oder gar keine Antimaterie gibt. Erinnern wir uns, dass es vor  $10^{-6}$  Sekunden ein dichtes Gas von Quarks und Antiquarks gab, das sich dann bei Abkühlung durch gegenseitige Vernichtung von Teilchen und Antiteilchen in Strahlung verwandelte. Aber es blieben Quarks übrig, um die Protonen und Neutronen zu bilden. Es waren also ein bisschen mehr Quarks im Gas als Antiquarks. Nur ein ganz klein bisschen, denn, wie wir hörten, ist die Anzahl der Nukleonen nur ungefähr ein Milliardstel der Anzahl der Quarkpaare im heissen Gas. Woher kommt aber dieser Überschuss?

Man würde erwarten, dass der Uransfang völlig symmetrisch ist. Warum sollte am Anfang Materie vor Antimaterie bevorzugt worden sein und warum um nur so wenig? Es könnte ja sein, dass «jemand» damals ein bisschen mehr Materie als Antimaterie in die Suppe hineingeworfen hat. Dagegen nimmt man doch gerne an, dass am Anfang völlige Symmetrie geherrscht hat. Aber wie kann ein kleiner Überschuss zustande kommen, wenn am Anfang keiner da war? Eine der Bedingungen muss wohl sein, dass die sogenannte «Baryonenzahl» nicht konstant ist. Was ist diese Zahl? Im wesentlichen die Zahl der Quarks minus die Zahl der Antiquarks. Wenn das Universum in völliger Symmetrie begonnen hat, d.h. mit ebensoviel Quarks wie Antiquarks, so war die Zahl am Anfang gleich Null. Diese Zahl ändert sich natürlich nicht, wenn Quarks und Antiquarks sich gegenseitig vernichten. Wenn aber Quarks übrigbleiben, so ist die Zahl nicht mehr Null. Also muss sie sich verändert haben, falls am Anfang völlige Symmetrie geherrscht hat. Interessanterweise hat das etwas mit dem Zerfall der Protonen zu tun. So ein Zerfall ist ja auch eine Änderung der Baryonenzahl. Nehmen wir an, das Proton würde z. B. in ein Positron und in Photonen zerfallen. Die drei

Quarks, aus denen es besteht, würden dann verschwinden und die Baryonenzahl hätte sich vermindert. Wenn es also wirklich einen Protonenzerfall gibt, so müsste man nicht mehr an der exakten Konstanz der Baryonenzahl festhalten. Aber, um einen kleinen Überschuss der Materie von einem symmetrischen Uransfang zu erhalten, müssen Prozesse existieren, die die Materie vor der Antimaterie etwas bevorzugt. Nur ganz wenig, denn es handelt sich ja nur um  $10^{-9}$ . Tatsächlich gibt es gewisse Anzeichen, dass die Naturgesetze in bezug auf Materie und Antimaterie nicht ganz symmetrisch sind. Es besteht also eine gewisse Hoffnung, den Überschuss erklären zu können. Aber man hat heute noch keine Methode, die erlaubt, das wirklich zu rechnen.

Nun kommen wir zum vierten Problem, der kritischen Materiedichte. Wie wir früher erwähnten, ist die heutige mittlere Dichte der Materie im Weltall nicht sehr gut bekannt. Sie liegt aber nahe an einem Wert, den man die «kritische Dichte» nennt. Wenn die tatsächliche Dichte über diesem Wert läge, so würde die Expansion des Universums ein Ende nehmen. Die Massen wären dann so dicht, dass die Schwerkraft die weitere Expansion zu einem gewissen zukünftigen Zeitpunkt zum Stillstand bringen und dann die Bewegung umkehren und sich das Universum wieder zusammenziehen würde. Die Dichte würde dann wieder anwachsen, bis nach einer gewissen Zeit der hochkonzentrierte Anfangszustand wieder erreicht wäre und der ganze Prozess von vorne beginnen und sich vielleicht endlos wiederholen könnte. Wenn aber die tatsächliche Dichte unterhalb der kritischen Dichte liegt, so gibt es kein Ende der Ausdehnung. Selbst im kritischen Fall geht die Ausdehnung asymptotisch auf Null, aber sie kehrt sich nicht um. Es sieht fast so aus, als läge die Wirklichkeit nahe an dieser Grenze. Die Dichte scheint immer noch geringer als kritisch zu sein, aber es besteht ja neuerdings die Möglichkeit, dass die Neutrinos eine kleine Masse haben. Dann würde das Neutrinosgas, das wahrscheinlich den Weltraum füllt, schon ganz beträchtlich zur Massendichte beitragen. Man muss sich nun fragen, warum die Natur gerade so eine Massendichte gewählt hat, dass die Ausdehnung sich nicht umdreht, sondern nach unendlicher Zeit zum Still-

stand kommt; eine Frage, die heute noch keine Antwort hat. Vielleicht liegt die Antwort wieder in der Form der noch unbekannten Naturgesetze, die am Anfang bei extrem hohen Temperaturen geherrscht haben.

Nun komme ich zur letzten, mehr philosophischen Frage: Was war vor dem Urknall? Falls die Massendichte höher lag als die kritische Dichte, ist das Problem etwas anderes. Man könnte sagen, dass sich das Universum periodisch ausdehnt und zusammenzieht. Vor dem letzten Urknall, aus dem unser Universum stammt, hatte sich also ein früheres zu einer hohen Konzentration zusammengeballt. Die Hypothesen des periodischen Universums begegnen allerdings einigen Problemen, die mit der Frage verknüpft sind, ob die Zusammenballung jedesmal dieselbe Ursituation herstellt oder ob die Entropie des Universums nicht doch jedesmal etwas grösser wird. Dann kommt man wieder zum Problem eines wirklichen Anfangs, des ersten Urknalls. Wenn die Massendichte unter oder bei der kritischen Dichte liegt, dann war der Urknall vor zirka  $2 \times 10^{10}$  Jahren der wirkliche Anfang der Welt. Die Frage, was vorher war, hat keinen konkreten Inhalt. Alles, was wir wissenschaftlich beschreiben

können, fand nachher statt. Dies möge manchem als eine unzulängliche Antwort erscheinen, aber es ist die einzige wissenschaftliche Antwort, die man auf diese Frage geben kann.

Am Anfang dieses Symposiums wurde bemerkt, wie stark unser Thema mit anderen menschlichen Geistesrichtungen zusammenhängt, mit philosophischen, mythologischen und religiösen Belangen. Es trifft uns sozusagen ins Herz. Daher kann man über dieses Thema nicht nur wissenschaftlich reden, sondern, in komplementärer Weise, auch in poetischer und emotioneller Sprache. Tatsächlich hat ja die judäo-christliche Tradition die Entstehung des Weltalls in einer Art beschrieben, die nicht ganz verschieden ist von dem, was hier erzählt wurde. So sagt doch die Bibel über den Anfang der Dinge: «Und Gott sprach, es werde Licht, und es ward *Licht*. Und Gott sah, dass das Licht gut war.»

*Anschrift des Verfassers:*

Prof. Dr. V.F. Weisskopf  
Massachusetts Institute of Technology  
Cambridge, MA 02139 (USA)