

# Kritische Gedanken zur Kosmologie oder Weshalb ich meine, daß die Kosmologie von der Physik zur Naturphilosophie überwechseln sollte

Die Physik als „exakte“ Naturwissenschaft<sup>1</sup> verfügt über einen strengen methodischen Rahmen, für den zunächst einmal nach Popper Falsifizierbarkeit der Aussagen (Hypothesen, Theorien) gefordert wird, wobei aber auch die Falsifizierbarkeit selbst nur eine relative ist.

Um Hypothesen oder Theorien falsifizieren zu können, müssen Experimente durchgeführt bzw. Beobachtungen vorgenommen werden. Gelingt die Falsifikation nicht, gilt die Aussage einstweilen durch das Experiment bzw. die Beobachtung als gestützt (vorausgesetzt, die Durchführung ist nicht zu bemängeln).

Da sich physikalische Aussagen stets auf eine unbegrenzte Zahl von Fällen beziehen (worunter sowohl vergangene als auch – in der Mehrheit – künftige zu verstehen sind), ist Reproduzierbarkeit eine unabdingbare Forderung für Experimente, was bedeutet, daß (wenigstens im Prinzip) jeder Mensch zu jeder Zeit an jedem Ort eine physikalische Aussage überprüfen können müßte, und, sollten Abweichungen auftreten, auch diese wieder durch physikalische Aussagen restlos zu erklären sein müßten. Reproduzierbarkeit von Experimenten bzw. wiederholtes Auftreten von Beobachtbarem ist auch eine Voraussetzung für „Objektivierbarkeit“ durch Konsensbildung unter den damit befaßten Menschen (ich gehe dabei von der Annahme aus, daß es „Objektives an sich“ entweder nicht gibt, oder daß es von uns nicht als solches erkennbar ist).

Eingeschränkter sind die Möglichkeiten bei Beobachtungen von Phänomenen, die nicht durch menschliches Tun<sup>2</sup> bewirkt werden: Ein Gewitter wird man - prinzipiell - nicht zu jeder Zeit an jedem Ort beobachten können, aber es wird nur eines gewissen Abwartens bedürfen, um dann doch eines miterleben zu können.

Wie aber ist es bei weitaus selteneren Phänomenen? Eine relativ nahe Supernova wie 1987A beobachten zu können, wird den meisten Menschen während ihres ganzen Lebens nicht gelingen, weil eine solche nur wenige Male pro Jahrtausend auftritt. Aber immerhin können während eines der seltenen Ereignisse viele Menschen gleichzeitig die Beobachtungen machen, was für alle anderen, die dies nicht können, die Glaubwürdigkeit des tatsächlichen Auftretens erhöhen sollte.

Wenn aber Phänomene sowohl selten auftreten als auch sich der allgemeinen Sichtbarkeit entziehen, Kugelblitze etwa, dann sinkt die allgemeine Glaubwürdigkeit<sup>3</sup> - diese Phänomene werden nicht in den naturwissenschaftlichen Rahmen aufgenommen und fristen ein grenzwissenschaftliches Dasein.

Um ein gewisses Maß an Reproduzierbarkeit bzw. Häufigkeit des Auftretens eines Phänomens wird man also im Rahmen der Physik nicht herkommen; und das ist gut so, sonst wäre es mit ihrer „Exaktheit“ nicht weit her.

Nun ist es aber seit einem knappen Jahrhundert üblich geworden, auch Überlegungen über die „Welt als Ganzes“, das „Universum“, den „Kosmos“ und was es sonst noch an Synonyma dafür geben mag<sup>4</sup>, im Rahmen der Physik durchzuführen. Und es stellt sich hier für mich die Frage: Geht das überhaupt? Ist der methodische Rahmen der Physik dafür nicht viel zu eng?

Ihr methodisches Korsett trägt die Physik seit Galeilei und sie grenzt sich heute wesentlich *dadurch* von der Naturphilosophie ab, von der sie sich zu Kants Zeiten und nicht ohne dessen Zutun

---

<sup>1</sup> Darüber, daß auch diese „Exaktheit“ nur eine relative ist, siehe im Kapitel „Naturwissenschaft und Naturphilosophie“.

<sup>2</sup> Von behaupteten Paraphänomenen, die durch den menschlichen Geist bewirkt werden sollen, sehe ich hier ab.

<sup>3</sup> Es wird hier schon deutlich, daß „Glauben“ auch im Rahmen der Naturwissenschaften eine Rolle spielt.

<sup>4</sup> Ich werde mich, anders als üblich, in diesem Artikel der synonymen Verwendung solcher Begriffe anschließen, aber durch Hinzufügen von „Gänsefüßchen“ anzeigen, daß ich den jeweiligen Begriff im gegebenen Zusammenhang nicht ernst meine.

abgelöst hat, um sich als die „exakte“ Ausknospung der „unexakten“ Naturphilosophie zu verselbständigen.

Ich möchte später verdeutlichen, daß die Kosmologie weniger in den (engen) methodischen Rahmen der Physik paßt als vielmehr in den weiter gesteckten der Naturphilosophie, in dem sie seit deren Entstehen durch die Vorsokratiker im 6. vorchristlichen Jahrhundert auch beheimatet gewesen ist: Schließlich haben die Ionier Thales, Anaximander und Anaximenes die Kosmogonie und Kosmologie aus ihrer bis dahin mythischen Heimat herausgeholt, indem sie als Ursachen für das Geschehen in der Welt nicht Götter, sondern Kräfte eingeführt hatten, und damit die Diskussion auf einer anderen Ebene geführt als jener, ob Gott x oder Gott y für ein Phänomen verantwortlich sei.

Leider hat es im 20. Jahrhundert kaum eine eigenständige Naturphilosophie gegeben; vielmehr ist sie als Wissenschafts- und Erkenntnistheorie der Naturwissenschaften von deren Vertretern ziemlich unbeachtet geblieben. Was aber könnte Naturphilosophie in der heutigen Zeit leisten? Nun, es wird schmerzlich klar, daß sich aus einer von vielen zur Ersatzreligion hochstilisierten Naturwissenschaft und der ihr nachfolgenden Technik keine Ethik herleiten läßt. Es wird aber noch schmerzlicher bewußt, daß das Fehlen moralischer Begriffe im Umgang mit der Natur zu schwerwiegenden, vielleicht nicht mehr gutzumachenden Fehlern geführt hat. Naturphilosophie könnte also ein neues Verhältnis des Menschen zur Natur fundieren: Naturwissenschaft hat alles Menschliche aus ihren Prinzipien entfernt, um möglichst „objektiv“ zu sein. Vielen Naturwissenschaftlern scheint dies gar nicht bewußt geworden zu sein, zumindest (und vor allem) aber haben sie es unterlassen, den an sie „glaubenden“ Menschen dies klarzumachen. Naturphilosophie könnte hingegen alles Menschliche in ihre Grundlagen mit einbeziehen und somit die Natur (zu der ja auch der Mensch gehört, der sein Selbst aus der Naturwissenschaft ausgeschlossen hat) in einem viel weiter gefaßten Rahmen sehen, der dann sogar auch über jenen der antiken Naturphilosophie hinausginge. Und in diesem hätte auch die Kosmologie ihren historisch angestammten Platz.

Wollte man argumentieren, daß ja die Kosmologie mittlerweile ein sehr stark mathematisiertes Gebiet geworden sei: Nun, Newton hatte sein Hauptwerk, welches unter anderem die Gravitationstheorie enthält, noch als „Mathematische Prinzipien der Naturphilosophie“ bezeichnet. Man befände sich also nicht in schlechtester Gesellschaft.

Es folgt nun zunächst eine kurze Beschreibung des „kosmologischen Standardmodells“. Dies halte ich für notwendig, weil ohne diesen Überblick die anschließende Kritik unverständlich bliebe, die im Kapitel „Ergänzungen und Einwände“ erfolgt. Da auf den nächsten paar Seiten etliche Formeln auftauchen werden, empfehle ich dem Leser, der an physikalischen Formeln nicht interessiert ist, ganz einfach darüber hinwegzusehen und den dazugehörigen Text nur soweit zu beachten, daß der Zusammenhang nicht verlorenggeht. Im umgekehrten Fall bitte ich den an Formeln interessierten Leser um Verständnis, daß ihre Herleitungen fehlen. Da diese aber zumeist nicht trivial sind und den Rahmen des vorliegenden Buches sprengen würde, bitte ich darum, sie der einschlägigen Literatur (z. B. 1 und 2 des Literaturverzeichnisses) zu entnehmen.

## **1. KAPITEL:**

### **Die Grundlagen des kosmologischen Standardmodells (KSM):**

Physikalische Grundlage für kosmologische Modelle ist seit ihrer Veröffentlichung im Jahr 1915 die Allgemeine Relativitätstheorie (ART), die im wesentlichen eine Theorie der Gravitation ist und diese nicht, wie Newton es getan hatte, mittels Kräften, sondern geometrisch beschreibt: Massen „krümmen“ die Raum-Zeit<sup>5</sup>, die Krümmung der Raum-Zeit wiederum wirkt sich auf die Bewegung der Massen aus. Einer „Geodäte“, einer „kürzesten“ Linie in der gekrümmten Raum-Zeit entspricht der „freie Fall“ von Licht. In ihrer allgemeinsten Form lauten die Einstein-Gleichungen der ART:

<sup>5</sup> Wobei die „Krümmung“ als Abweichung von den geradlinig gedachten kartesischen Koordinatenachsen der Mathematik zu verstehen ist, welches in der Natur selbstverständlich nirgendwo realisiert ist.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad (6)$$

Da die Verteilung der Materie, ihre Energien und Impulse sowie die Geometrie des Raum-Zeit-Kontinuums einander bedingen, sind die Einstein-Gleichungen in ihrer allgemeinsten Form so kompliziert, daß sich daraus ohne Einschränkung keine Lösung ermitteln läßt, die als Grundlage für ein kosmologisches Modell dienen könnte.<sup>7</sup> Aus diesem Grund müssen vereinfachende Annahmen gemacht werden, deren wichtigste das sogenannte „kosmologische Prinzip“ ist, also die Annahme, daß im Raum alle Punkte gleichwertig seien (dies nennt man seine *Homogenität*) und daß in ihm auch alle Richtungen gleichwertig seien (dies nennt man seine *Isotropie*). Setzt man Homogenität und Isotropie für den gesamten Weltraum voraus, so stellt dies natürlich eine gehörige Vereinfachung der Raum-Zeit-Struktur dar und ebenso vereinfachen sich die Gleichungen der ART. Die spezielle Metrik der Raum-Zeit, die sich durch diese Einschränkung ergibt, wird „Robertson-Walker-Metrik“ (RWM) genannt.

Alle kosmologischen Modelle, für welche die beiden Voraussetzungen (ART und kosmologisches Prinzip) gemacht worden sind, werden allgemein „Friedmann-Modelle“<sup>8</sup> genannt. Es wird noch zu überlegen sein, mit welcher Berechtigung das kosmologische Prinzip das 20. Jahrhundert überdauert hat, aber in den 1920ern hat es jedenfalls diese relativ einfachen Modelle eines „Weltganzen“ ermöglicht, welche qualitativ die gleichen Aussagen machen, was einen „Weltanfang“<sup>9</sup> betrifft, sowie die Möglichkeiten, in Abhängigkeit von der Krümmung des Raumes alles zu überblicken bzw. alles zu erfahren (Horizonte; dazu später mehr). Für alle Friedmann-Modelle gilt die RWM, in der das raumzeitliche Linienelement  $ds$  folgendermaßen berechnet wird:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) \left( \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right) \quad (10)$$

Da unser Anschauungsraum nur dreidimensional ist, sind wir mit der Vorstellung der vierdimensionalen Raum-Zeit überfordert und müssen uns daher mit der Veranschaulichung der „Krümmung“ des dreidimensionalen Unterraumes relativ zum idealisiert vorgestellten „geraden“ Euklidischen Raum begnügen. Eine Folge des kosmologischen Prinzips ist, daß auch die Krümmung des dreidimensionalen Unterraumes an jedem Punkt dieselbe sein muß. Diese wird durch einen „Krümmungsparameter“  $k$  beschrieben, der sowohl größer als auch kleiner oder gleich Null sein kann.

Die 1922 gefundenen Friedmannschen Lösungen<sup>11</sup> der Einstein-Gleichungen der ART ergaben alle ein „dynamisches“ Universum. In seiner einfachsten Form konnte dieses (geometrisch gesehen) entweder „offen“ (entspricht dem Parameter  $k < 0$ ) oder „geschlossen“ ( $k > 0$ ) sein oder auch einem Grenzfall zwischen beidem entsprechen, den man „flach“ nennt ( $k = 0$ ). Physikalisch bedeutete dies einen Weltraum, der sich entweder unbegrenzt aufbläht („offen“), oder sich nach einer Expansionsphase wieder zusammenzieht („geschlossen“), oder nach einer wohl dosierten Expansion über unendlich lange Zeit „im Unendlichen“ stehen bleiben sollte („flach“).<sup>12</sup> Die Krümmung ist eine „innere“ Eigenschaft des Raumes, d. h. ein in diesem befindlicher Beobachter könnte im Prinzip durch Messungen (z.B. der Winkelsumme eines ausreichend großen Dreiecks) feststellen, welcher der drei Fälle zutrifft, was aber bisher noch nicht gelungen ist.

<sup>6</sup>  $G$  ist die Gravitationskonstante,  $R$  die Kontraktion von  $R_{\mu\nu}$ ;  $R_{\mu\nu}$ ,  $g_{\mu\nu}$  und  $T_{\mu\nu}$  sind Tensoren:  $R_{\mu\nu}$  gibt die Verteilung der Massen im „Universum“ an,  $T_{\mu\nu}$  deren Energien und Impulse;  $g_{\mu\nu}$  ist der metrische Tensor, der die Geometrie des „Universums“ beschreibt.

<sup>7</sup> „Auch zum Ende des 20. Jahrhunderts wissen wir noch nicht sehr viel über die Lösungen dieser Feldgleichungen.“ (Lit. 4, S. 227)

<sup>8</sup> Alexander Friedmann, russischer Physiker (1888-1925)

<sup>9</sup> Wenn sich eine derzeitige Expansion des Kosmos nachweisen läßt, dann gibt es in Friedmann-Modellen auch einen „Weltanfang“, und die RWM ist zu diesem „Zeitpunkt“  $t = 0$  singularär, was bedeutet, daß die Distanzen beliebiger Punkte des Raumes gegen Null gehen.

<sup>10</sup> Dabei ist  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $t$  die Zeit,  $R(t)$  der später beschriebene Skalenfaktor für die „Größe des Universums“,  $k$  der im folgenden Absatz erklärte Krümmungsparameter;  $r$ ,  $\theta$  und  $\varphi$  sind die räumlichen Polarkoordinaten eines Punktes. Der vorgesetzte Buchstabe  $d$  bezeichnet infinitesimale Größen im Sinne der Differentialrechnung.

<sup>11</sup> Die Friedmannschen Lösungen sind nur eine Auswahl aus den unzähligen möglichen Lösungen der Einstein-Gleichungen, von denen allerdings die meisten so unwahrscheinlich wirken, daß man sie nicht annehmen mag.

<sup>12</sup> Durch geeignete Skalierung kann jedes  $k > 0$  zu  $k = 1$ , jedes  $k < 0$  zu  $k = -1$  gemacht werden, was in der Literatur auch häufige Anwendung findet.

Von  $k$  hängen auch die Horizonte ab: der „Sichtbarkeitshorizont“ (welchen Bereich kann ich zur Zeit  $t$  überblicken?) und der „Ereignishorizont“ (aus welchem Bereich werde ich, wenn ich lange genug warte, Kenntnis über Ereignisse erhalten?):

Für  $k \leq 0$  ist zu keiner Zeit die ganze Welt zu überblicken;  
wohl aber erfährt man, wenn man lange genug wartet, von jedem Ereignis.

Für  $k > 0$  hingegen ist es nach genügend langer Zeit (für genügend großes  $t$ ) möglich, den ganzen Raum zu überblicken;  
dafür aber ist die Möglichkeit, auch von jedem Ereignis zu erfahren, während der Kontraktionsphase eingeschränkt.

In der Formel für das Linienelement fällt noch  $R(t)$  auf. Dessen Bedeutung ist folgende: In einem dynamischen, also entweder expandierenden oder kontrahierenden „Universum“ ändern sich natürlich die Distanzen zwischen Punkten mit festen Koordinatenwerten. Zur Veranschaulichung dient dabei zumeist ein Ballon mit Längen- und Breitenkreisen, der aufgeblasen oder aus dem die Luft entlassen wird. Schnittpunkte dieser Linien ändern dabei ihre Koordinaten nicht, bleiben also in bezug auf die Kugel immer an denselben Stellen; wohl aber ändert sich ihr gegenseitiger Abstand. Es ist dies eines der besten Beispiele dafür, daß zwischen einer Strecke und deren Länge sehr wohl unterschieden werden muß. Um die zeitliche Änderung der Distanz  $D$  eines Koordinatenabstandes  $r$  auszudrücken, benutzt man einen „Skalenfaktor“  $R(t)$ :

$$D = R(t) \cdot r$$

Da  $r$  die Einheit 1 hat,  $D$  aber eine Länge ist, muß auch  $R(t)$  eine Länge sein, die sich mit der Zeit verändert. In gekrümmten Räumen kann man  $R(t)$  als Maß für die Krümmung verwenden und bezeichnet den Skalenfaktor manchmal auch gleich als „Weltradius“, was im „geschlossenen“ Fall veranschaulichend, im allgemeinen Fall aber nicht sachdienlich ist. Hier soll einstweilen ergänzend festgestellt werden, daß sich  $R(t)$  nicht direkt bestimmen läßt, daß sich damit aber andere Größen definieren lassen, die einer Beobachtung eher zugänglich sind.

Das kosmologische Prinzip und damit auch die RWM sind gemäß der Einstein-Gleichungen mit Materie nur dann verträglich, wenn diese als „ideale Flüssigkeit“ bzw. „ideales Gas“ (das bedeutet: miteinander nicht wechselwirkende Massenpunkte) vorliegt. Je nachdem, ob Materie oder Strahlung dominiert, herrschen unterschiedliche Drücke, und im Idealfall inkohärenter Materie<sup>13</sup> ist der Druck  $p = 0$ . Setzt man dies für das heutige materiedominierte „Universum“ voraus und nimmt man außerdem an, daß die „kosmologische Konstante“ (siehe Fußnote 13) verschwindet ( $\Lambda = 0$ ), so folgt daraus das einfachste aller Friedmann-Modelle<sup>14</sup>, das sogenannte „kosmologische Standardmodell“ (KSM):

$$k = H_0^2 R_0^2 (2q_0 - 1)$$

$R_0$  ist der Skalenfaktor  $R(t)$  zum heutigen Zeitpunkt.  $H_0$  und  $q_0$  werden im nächsten Abschnitt genauer besprochen. Hier nur so viel:  $H_0$  ist von der Größenart „Geschwindigkeit pro Länge“ und dient als Maß für die kosmische Expansion oder Kontraktion;  $q_0$  ist eine reine Zahl und steht für die Verzögerung der Expansion oder Kontraktion.

<sup>13</sup> Dazu stellt man sich das Universum als Teilchenwolke vor, innerhalb der keine Stöße auftreten, wobei die Galaxien den Teilchen entsprechen.

<sup>14</sup> Für die Friedmann-Modelle gilt allgemein folgende Gleichung:  $\ddot{R} + V(R) = -k$ . Dabei ist  $V(R)$  als effektives Potential für die zeitliche Änderung des Skalenfaktors  $R(t)$  zu interpretieren.

$$V(R) = -\frac{K_1}{R^2} - \frac{K_2}{R} + \frac{\Lambda}{3} R^2$$

mit  $K_1 = \frac{8\pi G c^2}{3} \rho_s R^4 = \text{konstant}$  für das „strahlungsdominierte Universum“ und

$K_2 = \frac{8\pi G c^2}{3} \rho_m R^3 = \text{konstant}$  für das „materiedominierte Universum“, wie wir es heute vorfinden.

Die „kosmologische Konstante“  $\Lambda$  bedeutet eine zusätzliche Vakuumenergie.

Mit der im „Universum“ enthaltenen Masse und Energie war (bei gegebener Gravitationskonstante) dessen Schicksal - im Unendlichen zu enden oder nach endlicher Expansion wieder zusammenzustürzen - von Anfang an festgelegt und braucht, wenn wir darüber Bescheid wissen wollen, von uns nur noch durch geeignete Beobachtungen ausfindig gemacht zu werden.

Nach langen, aber ergebnislosen Versuchen, herauszufinden, welcher der drei möglichen Fälle nun realisiert sei, neigt man heute der Ansicht zu, daß der „flache“ Grenzfall, wenn schon nicht genau getroffen, so doch ziemlich angenähert sein müßte: die Tatsache unserer eigenen Existenz spreche dafür („Anthropisches Prinzip“). In einem zu stark „offenen“ Weltraum wäre die Expansion so rasch vor sich gegangen, die Materie daher so rasch verdünnt worden, daß sich komplexe Gebilde wie Galaxien, Planetensysteme und besonders wir gar nicht hätten bilden können; in einem zu stark „geschlossenen“ Weltraum hingegen wäre für die Ausbildung ebendieser Strukturen wieder zu wenig Zeit geblieben, bevor sich alles wieder zu einem heißen Chaos zusammengezogen hätte.

Der Zustand „flach“ oder zumindest „näherungsweise flach“ wird dermaßen favorisiert, daß sogar seit Jahren nach einer geheimnisvollen „dunklen Materie“ gefahndet wird, welche die für den „flachen“ Zustand fehlende Masse im Weltraum zuschießt (dem „flachen“ Fall entspricht nämlich auch eine bestimmte Masse und - bei bekanntem Volumen des Raumes - eine mittlere Dichte im Weltraum, die von aller bis dato gesichteten Materie auch nicht näherungsweise erreicht wird).

Gehen wir davon aus, daß  $k \leq 0$  heute für weit wahrscheinlicher gehalten wird als  $k > 0$ , so bedeutet dies in der RWM, daß der für uns sichtbare Raum nicht schon der ganze ist. Wir haben aber wegen des kosmologischen Prinzips nicht damit zu rechnen, daß uns jenseits des Horizonts etwas Wichtiges entgeht, da ja dieses Prinzip nicht nur für den sichtbaren Teil des Kosmos, sondern für den gesamten vorausgesetzt worden ist. Wenn es also nicht darauf ankommt, ob wir den gesamten Kosmos überblicken oder nicht, so genügt es, die mittlere Dichte im für uns sichtbaren Bereich zu messen, die ja voraussetzungsgemäß gleich der Dichte in jedem anderen Bereich ist.

Eine ganz bestimmte „kritische“ Dichte  $\rho_c$ , die zur heutigen Zeit (gekennzeichnet durch den Index Null)

$$\rho_{c,0} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 5 \cdot 10^{-29} \text{ kg / m}^3$$

betragen sollte, würde dem „flachen“ Grenzfall entsprechen ( $k = 0$ ). Eine kleinere derzeitige Dichte ( $\rho_0 < \rho_{c,0}$ ) würde für ein „offenes Universum“ sprechen ( $k < 0$ ), eine größere Dichte ( $\rho_0 > \rho_{c,0}$ ) für ein „geschlossenes Universum“ ( $k > 0$ ).

Um nochmals zu den beim anthropischen Prinzip gemachten Bemerkungen zurückzukehren: Nach heutiger Vorstellung ist die derzeitige Dichte aus jener hervorgegangen, die unmittelbar nach dem „Weltanfang“ (zur „Planck-Zeit“  $10^{-43}$  Sekunden) geherrscht haben soll. Liegt die heutige Dichte nicht mehr als einen Faktor 10 von der kritischen Dichte entfernt, so sollte der Unterschied zur Planck-Zeit frühestens an der 60. Dezimalstelle aufgetreten sein.

Es würde mich nicht wundern, sollte der „flache“ Fall in seinem Endstadium, also ein „unendliches“, ruhendes Weltall, dereinst ebenso selbstverständlich sein wie es heute die Gleichheit von träger und schwerer Masse ist, über deren immense Ähnlichkeit man sich lange gewundert hat. Ein ähnliches „statisches“ Universum hatte ja schon Einstein angenommen und dafür in seine Gleichungen die bereits erwähnte „kosmologische Konstante“ eingebaut, was er nachher als seinen größten Fehler bezeichnet hat. Auch diese taucht aber in neueren Überlegungen wieder auf („Vakuumenergie“). Und eine Kontraktion durch Gravitation würde nicht erfolgen, wäre der Weltraum tatsächlich unbegrenzt, was nicht auszuschließen ist, da ja (siehe oben) der von uns beobachtbare Teil des Weltraums nicht auch schon der gesamte sein muß.

Nach dem Bekanntwerden der Friedmannschen Lösungen galt es jedenfalls, herauszufinden, ob nun eine Expansion oder eine Kontraktion des Weltraumes nachzuweisen sei.

## Die „Rotverschiebung“:

Es gilt heute als naturwissenschaftlich gesichertes Allgemeinwissen, daß der Weltraum expandiert; eine Erkenntnis, die auf Edwin Hubble, 1929, zurückgeht: Hubble beobachtete die Verschiebung von Spektrallinien ferner Galaxien (also solche außerhalb unserer „Lokalen Gruppe“ von Galaxien) und fand, daß diese umso stärker in Richtung Rot vorhanden ist, je weiter sich die Galaxie von uns entfernt befindet.

In der RWM spielt der Skalenfaktor  $R(t)$  nun auch für die Rotverschiebung eine Rolle, da das Produkt aus ihm und der Frequenz von Licht konstant bleibt:

$$R(t) \cdot f(t) = \text{konstant}$$

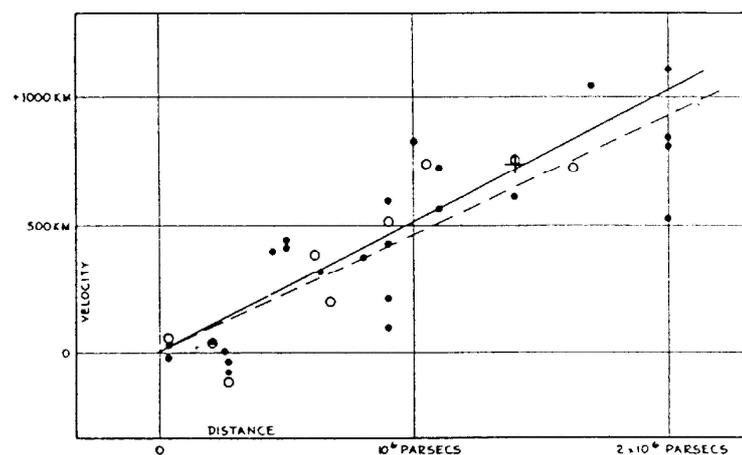
Daraus folgt, daß Licht, welches in einem expandierenden Raum - in dem ja  $R(t)$  wächst - zu einem früheren Zeitpunkt  $t_1$  mit hoher Frequenz  $f_1$  entsandt worden ist, bis zur heutigen Zeit  $t_0$  in seiner Frequenz  $f_0$  entsprechend abgesunken sein müßte. Dies entspräche aber (wegen  $c = f \cdot \lambda = \text{konstant}$ ) einer Zunahme der Wellenlänge  $\lambda$  und somit auch einer „Rotverschiebung“, da Rot am langwelligen Ende des sichtbaren Spektrums liegt.

Wenn es gelingt, Absorptionslinien im Licht ferner Galaxien eindeutig den Spektrallinien eines Elements zuzuordnen, dann kann man also von einer Linie die heutige Frequenz  $f_0$  messen und sie der aus dem Labor bekannten Frequenz  $f_1$  zum Zeitpunkt der Aussendung zuordnen, woraus man für den „Rotverschiebungsparameter“  $z$  folgende Zusammenhänge erhält ( $T$  = Temperatur in Kelvin):

$$z = \frac{f_1 - f_0}{f_0} = \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{R_0 - R_1}{R_1} = \frac{T_1 - T_0}{T_0}$$

Nun läßt sich, wie gesagt,  $R(t)$  nicht direkt beobachten, aber Hubble hatte gemeint, aus der Rotverschiebung von Galaxien und deren - unabhängig gemessenen - Distanzen einen linearen Zusammenhang zu erkennen:

Bild 1: Aus Hubbles Veröffentlichung 1929 (Lit. 12)



Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black dots and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

Seither ist die daraus ermittelte Größe unter dem Namen „Hubble-Zahl“<sup>15</sup> bekannt. Sie gibt an, um welchen Wert sich die Relativgeschwindigkeit zweier ferner Galaxien unterscheiden, wenn ihre Distanzen zu uns um 1 Megaparsec (etwa 3,26 Millionen Lichtjahre) verschieden sind. Oder, übertragen auf die RWM:

$$H_0 = \frac{\dot{R}_0}{R_0} \quad 16)$$

„Konstant“ ist die Hubble-Zahl bestenfalls dann, wenn man sie zu einem Zeitpunkt, z.B. dem jetzigen, auf alle Galaxien bezieht (der Index Null kennzeichnet auch die Größen zum jetzigen Zeitpunkt). Falls aber in unserem Kosmos eine abgebremste Expansion ablaufen sollte, dann wäre auch die Hubble-Zahl eine Funktion der Zeit und ihr Zahlenwert nähme ab. Man definiert in diesem Fall den „Verzögerungsparameter“

$$q_0 = - \frac{\ddot{R}_0 \cdot R_0}{\dot{R}_0^2}, \quad 17)$$

der für  $\rho_0 \approx \rho_{c,0}$  mit diesen Dichten folgenden Zusammenhang hätte:

$$2q_0 \approx \frac{\rho_0}{\rho_{c,0}}$$

Als Relation zwischen Rotverschiebung und Distanz der Quelle (zur Verbesserung der Übersichtlichkeit sind die Indizes Null weggelassen) erhält man:

$$z = \frac{1}{c}HD + \frac{1+q}{2c^2}(HD)^2 + \dots$$

In dieser Reihenentwicklung sind umso mehr Terme zu berücksichtigen, je größer z ist. (Mit den obigen Termen gilt die Formel nur für  $z < 0,5$ . Daraus ist zu ersehen, daß der häufig behauptete Zusammenhang „die Rotverschiebung ist proportional zur Entfernung“, also  $z = HD/c$ , nur für sehr nahe Objekte - kosmologisch gesehen natürlich - gilt.)

Man müßte nun für verschieden ferne Objekte z und, unabhängig davon, D messen, um daraus H und q ermitteln zu können. Gestaltet sich die Messung von z noch relativ einfach, so stößt jene von D auf gewisse Schwierigkeiten, wie ein Blick über die Stufen kosmischer Entfernungsmessung zeigt:

- Die noch relativ direkteste Methode der Entfernungsbestimmung von Sternen ist die Triangulation (Winkelmessung) mit dem Erdbahndurchmesser als Basis. Sie eignet sich bis ca. 100 Lichtjahren (Lj) Distanz und erfaßt einige tausend Sterne. Für sie gilt folgender Zusammenhang zwischen dem tatsächlich ausgesandten Energiestrom L (etwa des Lichts), der bei uns meßbaren Energiestromdichte I und der gemessenen Distanz D:

$$L = 4\pi I D^2$$

Unter diesen Sternen lassen sich nun Zusammenhänge herstellen zwischen L und ihrem Spektrum (z.B. bei Hauptreihensternen im Hertzsprung-Russell-Diagramm) oder zwischen L und der Periodendauer, mit der sich L verändert (wie bei den helligkeitsveränderlichen  $\delta$ -Cephei-Sternen).

- Unter der Voraussetzung, daß diese Zusammenhänge nicht nur in unserer Umgebung zutreffen, sondern beliebig verallgemeinerbar sind („Universalitätsprinzip“, siehe später), lassen sich dann auch für weiter als 100 Lj. entfernte Sterne mittels L und I Distanzen bestimmen:

<sup>15</sup> Auch „Hubble-Parameter“; weniger gut, aber oft verwendet: „Hubble-Konstante“.

<sup>16</sup> Dabei bedeutet  $\dot{R}_0$  die durch Differenzieren gewonnene 1. Ableitung von R(t) zum jetzigen Zeitpunkt.

<sup>17</sup>  $\ddot{R}_0$  ist die durch zweimaliges Differenzieren gewonnene 2. Ableitung von R(t) zum jetzigen Zeitpunkt.

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi I}}$$

Das erste der beiden Verfahren eignet sich für Sterne innerhalb unserer Galaxis, das zweite innerhalb unserer „Lokalen Gruppe“ von Galaxien, also für etwa 10 Millionen Lj. (aber beide selbstverständlich nur für Sterne, die auch einzeln wahrgenommen werden können, was vor allem bei fernen Doppelsternsystemen eine Unsicherheit ergibt).

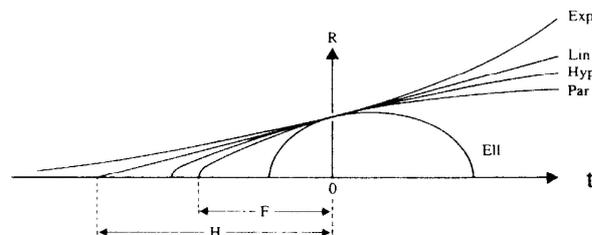
- Darüber hinaus trifft man die Annahme, daß für die jeweils hellsten Sterne in jeder Galaxie  $L$  gleich ist, bzw.
- daß für die jeweils hellsten Galaxien in großen Galaxienhaufen  $L$  gleich ist.

## „Weltalter“:

Für  $t \rightarrow 0$  geht  $R \rightarrow 0$  (Fußnote <sup>18</sup>), was nach unserem Verständnis bedeutet, daß die Entwicklung des „Universums“ mit unendlich großer Dichte und Temperatur begonnen haben müßte. Für diesen „Anfangszeitpunkt“  $t = 0$  hat sich der Name „Urknall“ („Big Bang“) eingebürgert. Der Urknall selbst bzw. seine unmittelbare Umgebung wird aus den physikalischen Betrachtungen ausgeschlossen, aber für die Entwicklung „danach“ bemüht man alle Theorien und Hypothesen der Teilchenphysik, also alles, was man mittels hochenergetischer Teilchen tatsächlich experimentell überprüft hat und auch alles darüber hinaus (z.B. die GUT's<sup>19</sup>), um schließlich bei der Materie anzulangen, die wir heute vorfinden und die uns in unserer Welt erst möglich macht.

Wie weit liegt dieser „Urknall“ zurück? Laut KSM ergibt sich das Weltalter zu  $t < 1/H_0$ . Das „<“-Zeichen kommt daher, daß in einem expandierenden Kosmos  $H$  früher größer gewesen sein muß. Der genauere Wert hängt von der Dynamik der Expansion, also von  $k$  ab. Nur Aussagen über die Frühzeit des Kosmos sind von  $k$  nahezu unabhängig, da die Kurven für  $R(t)$  praktisch zusammenfallen:

Bild 2: Zeitliche Entwicklung des Skalenfaktors  $R(t)$



Die „Elliptische Expansion“ gehört zu  $k > 0$ , die „Parabolische Expansion“ zu  $k = 0$ , die „Hyperbolische Expansion“ zu  $k < 0$ . Im Fall der „Exponentiellen Expansion“ besitzt die kosmische Konstante  $\Lambda$  einen positiven Wert.

$H$  ist die „Hubble-Zeit“, also jenes „Alter des Universums“, das sich (siehe die Gerade „Lin“) als Kehrwert der Hubble-Zahl  $H_0$  ergibt (0 ist die Jetztzeit).  $F$  ist die „Friedmann-Zeit für das Weltalter“, die sich aus dem KSM für den „flachen“ Fall ergibt ( $F = 2H/3$ ).

Für das „Weltalter“ wird zumeist ein Wert zwischen 10 und 20 Milliarden Jahren angegeben, bevorzugt werden 13,7 Milliarden Jahre.

<sup>18</sup> aber  $H \rightarrow \infty$  und  $q \rightarrow \infty$

<sup>19</sup> „Grand Unified Theories“, die in Fortsetzung der „elektroschwachen Theorie“ (einer Vereinheitlichung der elektrischen Kraft mit der schwachen Kernkraft) eine Vereinheitlichung dieser beiden Kräfte mit der starken Kernkraft erreichen wollten, aber wegen mangelnder Bestätigung die Bezeichnung „Theorien“ niemals verdient haben - sie sind bloße Hypothesen geblieben, ja gelten heute sogar weitgehend als falsifiziert, da der von ihnen vorhergesagte Protonenzerfall nicht beobachtet werden konnte.

## Hintergrundstrahlung:

Als eine der Stützen der Urknallhypothese gilt die sogenannte „kosmische Hintergrundstrahlung“<sup>20</sup>: Einige hunderttausend Jahre nach dem Ereignis „Urknall“ soll demnach durch Expansion die Energiedichte im Weltraum so weit abgesunken sein, daß die Temperatur nur noch wenige tausend Grad betrug. Bei den bis dahin herrschenden höheren Temperaturen gingen Elektronen und die Kerne der späteren Atome Wasserstoff und Helium noch keine dauerhaften Bindungen ein, die Elektronen waren weitestgehend frei und wechselwirkten beständig mit den Photonen, den Quanten des Lichts, wodurch diese in ihrer Richtung abgelenkt wurden und der Weltraum zwar strahlend hell war - aber in hoher Gleichmäßigkeit: es gab keine Richtungen, aus denen Licht kam und andere, in denen es finster war (hier erkennen wir das kosmologische Prinzip in idealerer Form als heute). Erst bei wenigen tausend Grad (angenommen: 4000 K) gelang es den Kernen, die Elektronen dauerhaft zu binden, wodurch der Weltraum für die Photonen nahezu frei war und sie über große Strecken dahinziehen konnten. Dieses in alle Richtungen unterwegs befindliche Licht hatte jene Wellenlängenverteilung, wie sie einer „Schwarzkörperstrahlung“ von etwa 4000 Grad entspricht, also mit einem Intensitätsmaximum bei einer Wellenlänge  $\lambda_{\max} \approx 1 \mu\text{m}$ . Mit der weiter fortschreitenden Expansion des Weltraums sank auch die Temperatur weiter ab und bewirkte, daß die  $\lambda_{\max}$  der heute beobachtbaren Hintergrundstrahlung in etwa das Tausendfache von damals beträgt, also im mm-Bereich liegt. Heute entspricht die kosmische Hintergrundstrahlung einer „Schwarzkörperstrahlung“ von 2,7 K. Diese Temperatur sollte nun der freie Weltraum haben.

Da diese Wellenlängenänderung wieder ein Effekt der kosmischen Rotverschiebung ist, kann  $z$  für die Hintergrundstrahlung berechnet werden mit

$$z = \frac{T_1 - T_0}{T_0} \approx \frac{4000 - 2,7}{2,7} \approx 1500$$

Dieser Wert ist weit größer als jener für ferne Galaxien ( $z \approx 4$ ), was laut kosmologischem Modell bedeutet, daß wir mit der Hintergrundstrahlung entsprechend weiter in die Vergangenheit zurückschauen, als wenn wir ferne Galaxien betrachten, die wir - so sagt man - so sehen, wie sie vor einigen Milliarden Jahren ausgesehen haben. (Dabei ist zu beachten, daß unser „Jetzt“ ein anderes ist als das ferner Galaxien. Das hat natürlich sofort die Frage nach der „Weltzeit“  $t$  zur Folge, auf deren Problematik ich im 2. Kapitel unter „Zur Metrik der Raum-Zeit“ zu sprechen kommen werde.) Mit der Hintergrundstrahlung sollten wir jedenfalls bis einige hunderttausend Jahre an den „Urknall“ heran zurückschauen können - aus noch früherer Zeit erhalten wir keine optische Information, weil ja damals der Kosmos noch nicht durchsichtig gewesen sein soll.

## Probleme des KSM und die inflationäre Phase:

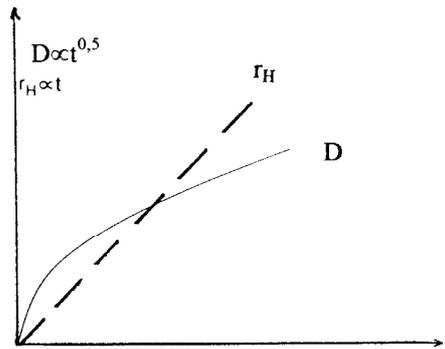
Der Radius des Ereignishorizonts bedingt die maximale Größe eines Gebietes mit kausalem Zusammenhang. Im KSM war während der strahlungsdominierten Frühzeit  $R(t)$  und damit auch die Distanz  $D$  irgendeines Abstandes zweier Koordiantenpunkte proportional zur Quadratwurzel der Zeit:

$$D \propto R(t) \propto t^{0,5}$$

Der Horizontradius hat sich aber nach dem Zusammenhang  $r_H \propto t$  entwickelt.

<sup>20</sup> Entdeckt 1965 von Arno Penzias und Robert Wilson (Bell Laboratories, USA)

Damit ergibt sich Bild 3:



Links vom Schnittpunkt der Kurven ist die Distanz größer als der Horizontradius und die Kausalität zwischen den Teilchen geht verloren. Damit ergibt sich zum Beispiel bei der Interpretation der kosmischen Hintergrundstrahlung ein Problem, da das heute sichtbare „Universum“ nach dem Standardmodell zum Zeitpunkt der Abkoppelung der Hintergrundstrahlung aus nicht weniger als  $60^3$  nicht kausal zusammenhängenden Gebieten bestanden haben müßte.<sup>21</sup> Die beobachtete Isotropie der Strahlung ist aber nur durch ein thermisches Gleichgewicht zu erklären. Geht man in der Zeit noch weiter zurück, dann kommt man so weit, daß kein Teilchen mehr mit einem anderen kausal zusammenhängt. Damit wird nicht nur die Definition einer Temperatur unmöglich, sondern auch die Anwendung der Physik überhaupt auf dieses „Universum“.<sup>22</sup>

Gehorcht die Entwicklung aber nicht dem KSM, sondern nimmt der „Weltradius“  $R(t)$  stärker zu („Inflation“), so wird das Integral im Nenner der Fußnotenformel größer und mit der Annahme einer entsprechend starken Inflation kann durchaus  $n < 1$  werden.

Dazu nimmt man an, daß die kosmologische Konstante  $\Lambda > 0$  ist, was bedeutet, daß man dem anfänglichen (als „falsch“ bezeichnete) Vakuum eine Energiedichte zuschreibt, die der Gravitation entgegengewirkt und damit die Expansion vorangetrieben hätte.

Am Ende der Inflation (die für die Dauer von  $10^{-35}$  bis  $10^{-32}$  s nach dem „Urknall“ veranschlagt wird) soll die Energie des „falschen“ Vakuums nun wirklich (also reell) zur Verfügung gestanden sein und durch Aufwärmen des „Universums“ dessen Abkühlung durch die Inflation gerade kompensiert haben. Durch die Inflation sollte  $R(t)$  um 29 Größenordnungen angewachsen sein, womit das „Universum“ schon am Ende der inflationären Phase fast so flach gewesen sein sollte, wie es sich uns heute tatsächlich darstellt ( $k \approx 0$ ). Womit das „Flachheitsproblem“ ebenfalls gelöst wäre.

<sup>21</sup> Die Anzahl der Kausalitätslängen zum Abkoppelungszeitpunkt der Hintergrundstrahlung ( $t = t_{ab}$ ) ergibt sich zu

$$n = \frac{\int_{t_{ab}}^{t_0} \frac{dt}{R(t)}}{\int_{t_{Planck}}^{t_{ab}} \frac{dt}{R(t)}}$$

Der Zähler wird bestimmt von der Entwicklung von  $R(t)$  nach der Abkoppelung der Hintergrundstrahlung, also im „materiedominierten Universum“. Nach dem KSM gilt dafür  $R(t) \propto t^{2/3}$ . Der Nenner jedoch hängt von der Entwicklung des frühen, also „strahlungsdominierten Universum“ ab. Übernimmt man hier vom KSM  $R(t) \propto t^{0,5}$ , so erhält man  $n \approx 60$  und hat das erwähnte Problem.

<sup>22</sup> Mit dem Horizontproblem eng verbunden ist das „Problem der Monopole“: Das derzeitige Teilchen-Standardmodell (und damit sind wir am anderen Ende der physikalischen Größenskala) geht von der Existenz von Higgs-Bosonen als „Urväter“ aller anderen Fundamentarteilchen aus. Als topologische Effekte des frühen Higgs-Feldes sollten magnetische Monopole entstanden sein, von denen laut Standardmodell der Teilchenphysik mindestens ein Monopol pro Horizontvolumen  $r_H^3$  die Quantelung der elektrischen Ladung erklärt. Laut KSM würde dies aber zu einer Monopolverteilungsdichte führen, die um mehrere Größenordnungen über jener der Protonen und Neutronen liegt, was aufgrund der Tatsache, daß noch nie ein magnetischer Monopol beobachtet worden ist, unannehmbar ist. Abhilfe schafft hier die inflationäre Phase.

Gerade, was die Frühzeit des „Universums“ und somit auch die inflationäre Phase betrifft, gehen die Vorstellungen der Kosmologen noch so weit auseinander, ist die Auswahl des anzunehmenden Higgs-Potentials noch so willkürlich, daß sich diesbezüglich ein eigener Punkt bei den Einwänden erübrigt.

## **2. KAPITEL:** **Ergänzungen und Einwände:**

Das KSM (mit seinen Erweiterungen) kann, wenn schon nicht als Synthese, so doch als eine „operationale Bewältigung“ einer Aporie<sup>23</sup> aufgefaßt werden, die Immanuel Kant in „Prolegomena“ veröffentlicht hat:

These: Die Welt hat der Zeit und dem Raum nach einen Anfang (eine Grenze).

Antithese: Die Welt ist der Zeit und dem Raum nach unendlich.

In diesem Kapitel werde ich zunächst zu verschiedenen Punkten des KSM Ergänzungen anbringen, die mir notwendig erscheinen, um darauffolgende Einwände besser verständlich zu machen. Aufgezeigt werden soll dabei, daß auch die „operationale Bewältigung“ nicht einwandfrei gelungen ist.

Das KSM ist ja nur ein Spezialfall unter den Friedmann-Modellen, von denen es unzählige, mehr oder weniger obskur erscheinende, gibt. Praktisch ist derzeit ein Modell kaum zu widerlegen, wenn es eine kosmologische Rotverschiebung und eine kosmische Hintergrundstrahlung beinhaltet.

### **Zur ART:**

In der ART sind Raum, Zeit und Masse untrennbar miteinander verbunden. Das Raum-Zeit-Kontinuum wird in seiner Geometrie durch die vorhandenen Massen bestimmt. Beim „Urknall“ sollen laut KSM mit der im Universum vorhandenen Masse Raum und Zeit selbst erst entstanden sein, und zwar aus einer Singularität. Dies ist ein mathematisch (nicht aber physikalisch!) konsistent durchgeführtes Modell, bei dem die Frage nach Raum und Zeit vor dem „Urknall“ nicht sinnvoll ist. (Da aber auch „sinnlose“ Fragen gestellt werden, komme ich darauf noch im letzten Punkt dieses Kapitels zurück.)

Die ART hat schon recht bald nach ihrer Veröffentlichung großes Aufsehen erregt, eben weil ihre kosmologische Anwendbarkeit erkannt worden ist und dieses Thema offenbar zum tiefsten Interessenskreis vieler Menschen zählt. Und ein Artikel in der „New York Times“ über dieses Thema hat erst den Anstoß dazu gegeben, daß Einsteins Name so richtig populär geworden ist und auch heute noch fast jedem als erster einfällt, wenn es um berühmte Physiker, Naturwissenschaftler, Theoretiker, Denker schlechthin oder auch um das Thema Intelligenz geht.

Von der Gestaltung her gilt die ART als eine der schönsten und vollkommensten Theorien im physikalischen Rahmen. Experimente dazu waren lange Zeit hindurch von so großen Meßfehlern begleitet, daß die meist winzigen Effekte kaum zur Geltung kommen konnten (z.B. bei der Ablenkung von Sternenlicht, das während Sonnenfinsternissen nahe der Sonne vorbeifußte und dabei in einen Bereich stärker gekrümmten Raumes gelangte). So galt lange Zeit die Drehung der Bahnachse des Merkur als die wesentlichste Stütze der ART (obwohl es nur ein kleiner Teil des Effekts gewesen war, den die ART der Newtonschen Gravitationstheorie vorausgehakt hatte). Allmählich aber konnten mit raffinierteren Meßmethoden neuartige Experimente durchgeführt werden: Unterschiede im Gang von Atomuhren, von denen eine auf der Erde verblieb, während eine andere im Flugzeug mitgeführt wurde, und die vorhergesagte Effekte nicht nur der speziellen, sondern auch der allgemeinen Relativitätstheorie bestätigten; die „Rotverschiebung“ von Licht, das gegen die Gravitation der Erde ansteigt; die Laufzeitverlängerung von Radarstrahlung, die auf dem Weg zur und von der Venus nahe an der Sonne vorbei muß (ein Effekt, welcher der Ablenkung des

<sup>23</sup> Eine Aporie ist ein Widerspruch, der logisch nicht aufgelöst werden kann.

Sternenlichts nicht unähnlich ist, aber doch viel genauer gemessen werden kann); Auffälligkeiten im Verhalten von Doppelsternsystemen, die mit Hilfe der ART erklärt werden konnten (Lit. 8).

Insgesamt stützen also bereits etliche Experimente und Beobachtungen diese Theorie und durch noch keines ist sie falsifiziert worden, so daß die ART als gutes Fundament für die Kosmologie angesehen werden kann (wiewohl vielleicht nicht als einziges; dazu aber später mehr).

### Zum kosmologischen Prinzip:

Auf besonders schwachen Beinen steht dagegen das kosmologische Prinzip. Wäre der Raum wirklich ideal homogen und isotrop, dann müßte es in allen Richtungen, in die wir blicken, stets gleich hell (oder gleich dunkel) sein, was aber ganz offensichtlich nicht der Fall ist.

Auch müßte überall die gleiche Dichte herrschen, was - in den Mikrokosmos hinein fortgesetzt - bedeuten würde, daß es nicht einmal Atome geben dürfte, von uns natürlich ganz zu schweigen; aber damit auch niemanden, der in irgendeine Richtung blicken könnte, was bedeutet:

#### **Das kosmologische Prinzip ist per definitionem strukturefeindlich.**

Kann man aber uns und unsere unmittelbare Umgebung (Erde und Sonne) als kosmologischen Kleinkram abtun, so galt ursprünglich der Sternenraum des nächtlichen Himmels als Musterbeispiel für Homogenität und Isotropie: Egal, in welche Richtung man blickt, überall schaut der Sternenhimmel ziemlich gleich aus (Isotropie). Und stellt man sich vor, man hüpfte von Stern zu Stern, dann hätte man von überall einen ähnlichen Anblick des Sternenhimmels (Homogenität). Läßt man also den Unterschied zwischen Sternen und interstellarem Raum nicht gelten, sondern mittelt über große Sternräume, dann sei, so sagte man, das kosmologische Prinzip durch die Beobachtung des nächtlichen Himmels bestätigt.

Für mich aber war dieses Prinzip höchst sonderbar schon beim erstenmal, als ich darüber las. Schließlich stammt es aus einer Zeit vor den großen Spiegelteleskopen und bevor noch klar war, daß die kleinen nebeligen Flecken eigene Galaxien sind; als man noch geglaubt hat, dies alles gehöre zu unserem eigenen System: Wie konnte man da angesichts der Milchstraße (der Eindruck dieses milchigen Bandes am Nachthimmel entsteht dadurch, daß wir relativ weit vom galaktischen Zentrum entfernt sind und somit in einer Ebene auf den Großteil unserer Galaxienscheibe blicken, während sich in anderen Richtungen eher freier Raum erstreckt), wie also konnte man an eine Gleichwertigkeit der Blickrichtungen im Raum auch nur denken? Innerhalb einer Galaxie ist die Materieverteilung überhaupt höchst inhomogen, da in Richtung des galaktischen Zentrums die Sterne dichter beisammen sind.

Diese Situation besserte sich erst, als man erkannt hatte, daß auch die kleinen Nebel Galaxien sind wie unsere, und als man mit großen Teleskopen immer mehr und mehr davon erkennen konnte, ließ sich wohl auch dafür plädieren, daß im Weltraum die Galaxien ziemlich gleichmäßig verteilt seien, und man müsse nur den Maßstab groß genug wählen, dann würden kleine Inhomogenitäten im subgalaktischen Bereich wegfallen.

Als man jedoch die Rotverschiebung dazu benutzte, um Distanzen zu bestimmen, wurde im Laufe der Zeit klar, daß sich die Materie im Weltraum flockiger gab, als den Kosmologen lieb sein konnte:

- Einerseits deshalb, weil für die Ausbildung immer größerer Strukturen aus einer homogenen Anfangsverteilung (und etwas anderes anzunehmen, würde dem kosmologischen Prinzip widersprechen<sup>24</sup>) auch immer mehr und mehr Zeit veranschlagt werden muß, was zu Schwierigkeiten mit der heutigen Abschätzung des „Weltalters“ führen könnte.

<sup>24</sup> Man muß sich das überhaupt auf der Zunge zergehen lassen, daß einerseits auf eine homogene Anfangsverteilung Wert gelegt wird, andererseits aber über Strukturbildung daraus nachgedacht wird, welche die anfängliche Homogenität zerstört; aber wir, die wir solche Strukturen sind und auf bzw. in solchen Strukturen leben, haben aus der Verteilung dieser Strukturen auf die Homogenität geschlossen, die eben aufgrund deren Entstehung zerstört worden ist ...

- Andererseits aber deshalb, weil der erwähnte Maßstab immer größer gewählt werden muß, um Inhomogenitäten darunter verschwinden zu lassen. So stieg die Größe bekannter kosmischer Strukturen von Galaxien (typische Ausdehnung etwa  $10^5$  Lichtjahre) über Galaxienhaufen ( $10^7$  Lj) zu Galaxiensuperhaufen ( $10^8$  Lj) und aus solchen gebildeten Wänden mit großen eingeschlossenen Hohlräumen mit Durchmessern von einigen  $10^8$  Lichtjahren. Und mag dies auch noch deutlich kleiner sein als die kolportierte Größe des „Universums“ von etwa  $10^{10}$  Lj - mit der nächstgrößeren Struktur, sollte man eine solche erkennen, wäre es wohl endgültig um die Homogenität geschehen; und wegen des kosmologischen Prinzips nicht nur um die des sichtbaren Teils des Weltraumes.

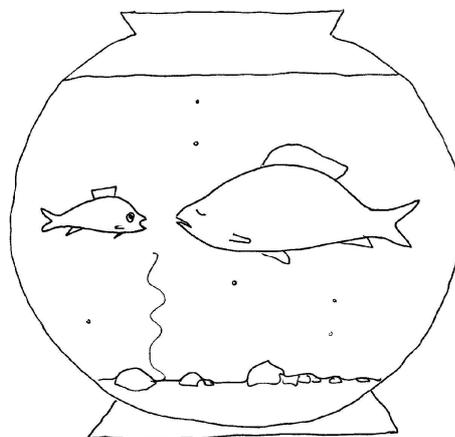
Welche Bedeutung mag wohl eine Maßstabslänge haben, die so groß ist wie die Gesamtgröße des sichtbaren Weltraums, aber zugegebenermaßen zur Strukturfeindlichkeit des kosmologischen Prinzips paßt?

Ist es erlaubt, zur „Rettung“ des kosmologischen Prinzips eine große Maßstabslänge zu verwenden, zur Feststellung der Raumkrümmung (einer „inneren Eigenschaft“ des Raumes) aber eine andere, kleinere? Also alles so zu drehen, wie man es gerade braucht?

Und was die behauptete Isotropie betrifft, so überlege ich folgendes: Angenommen, wir lebten in einer Galaxie am Rande der „Großen Mauer“ (einer erst vor wenigen Jahren entdeckten Ansammlung von Galaxienhaufen, die sich über mehrere Hundertmillionen Lichtjahre erstreckt) und sähen auf der einen Seite in die Mauer hinein und hätten also viele nahe Galaxien vor uns, auf der anderen Seite aber in einen großen Leerraum und bekämen nur sehr ferne Galaxien zu sehen: Hätten unsere Wissenschaftler dann auch mit derselben Unbekümmertheit das kosmologische Prinzip postuliert?<sup>25</sup>

Hinzu kommt noch, daß wegen der Dreidimensionalität unseres Anschauungsraumes Beobachtungen bestenfalls eine *räumliche* Homogenität und Isotropie erschließen lassen könnten, während die Verallgemeinerung auf das Raum-Zeit-Kontinuum rein formal ist.

Bild 5: Das kosmologische Prinzip



„DAS UNIVERSUM, MEIN KIND, IST  
EINE GROSSE KUGEL VOLL WASSER.“

### Zur Metrik der Raum-Zeit:

Die Metrik gibt an, wie weit (raum-zeitlich) ein Punkt von benachbarten Punkten entfernt ist. Jemand, der sich in der Relativitätstheorie auskennt, wird aber sofort einwenden, daß dies ja nicht für alle Beobachter gleich sein müsse, und tatsächlich macht es für einen Beobachter, der sich in der von der Metrik beschriebenen Raum-Zeit befindet, einen Unterschied, ob er geodätisch (also „frei fallend“) ist, oder ob Kräfte auf ihn wirken. Ein solcher „innerer“ Beobachter kann sinnvollerweise raum-zeitliche Aussagen überhaupt nur dann machen, wenn er über die Metrik schon Voraussetzungen getroffen hat. Da das mit der RWM schon geschehen ist, so sind also nur noch Aussagen möglich, die mit der RWM übereinstimmen!

<sup>25</sup> Da es für den gesamten „Kosmos“ gelten soll, muß es für alle darin befindlichen Beobachter mit derselben Selbstverständlichkeit gelten.

Den eigentlichen Überblick über die Metrik der gesamten Raum-Zeit könnte aber wohl nur ein hypothetischer „äußerer“ Beobachter haben, den es aber per definitionem nicht geben kann, da ja der Begriff Universum nichts außer sich zulässt (außerdem stellt die Aussage „außerhalb“ eine räumliche Relation dar; Kosmologen des Standardmodells binden aber die Entwicklung der Raum-Zeit strikt an die Entwicklung des „Universums“, also kann es auch keinen Raum außerhalb geben und damit auch keinen äußeren Beobachter). Selbstverständlich aber wäre dann auch nur dieser „äußere“ - und somit nicht existente - Beobachter in der Lage, Aussagen über raum-zeitliche Distanzen zu machen. So wäre also der Begriff „Durchmesser des Universums“ bestenfalls für einen solchen „äußeren“ Beobachter von unmittelbarer Bedeutung. Für einen realen, das heißt „inneren“ Beobachter hingegen sind Strecken, die so groß sind, daß sie sich der direkten Meßbarkeit mit Maßstäben oder Triangulation entziehen, nicht als Längen meßbar, sondern bloß als Zeiten, die er für das Durchlaufen der Strecken benötigt. Hat er aber eine solche Zeit ermittelt, was sagt sie ihm dann? Auch wenn er die Relativgeschwindigkeit zum Weltpunkt A, von dem er abgereist ist, kennt: eine unmittelbare Ermittlung der Distanz zwischen A und B ist ohne weitere Annahme über deren zwischenzeitliche Relativbewegung nicht, also eigentlich unmöglich.<sup>26</sup> Außerdem ergäbe eine solche Distanz noch keinen Zusammenhang mit den Systemzeiten von A und B. Daraus folgt also: Kosmische Distanzen sind für einen „inneren“ Beobachter eigentlich nicht meßbar. Somit kann er daraus auch keine Aufschlüsse über die tatsächliche Metrik der Raum-Zeit gewinnen. Vielmehr muß er (siehe oben) bereits Voraussetzungen über die Metrik getroffen haben, um Angaben über Distanzen überhaupt machen zu können - allerdings kann er dann damit die gemachten Voraussetzungen nicht mehr überprüfen.

Um jetzt den Skalenfaktor bzw. „Weltradius“  $R(t)$  und damit auch die „Weltzeit“  $t$  ein wenig zu kritisieren, braucht man sich nur zu vergegenwärtigen, daß uns die Relativitätstheorie (und zwar sowohl die Spezielle als auch die Allgemeine) gelehrt hat, sorgfältig zwischen den Zeiten verschiedener Systeme zu unterscheiden. Das KSM aber setzt sich aufgrund der gemachten Voraussetzungen elegant darüber hinweg und präsentiert uns eine „absolute“ Weltzeit, wie sie bei Newton gang und gäbe war, aber seit Einstein aus der Mode gekommen ist. An dieser Stelle wird besonders deutlich, wie wenig die Physik, die nicht am „Universum“, sondern an der uns zugänglichen Welt entwickelt worden ist, mit der Kosmologie zusammenpaßt (auch wenn vorgegeben wird, sie gehörten zusammen):

Um die Relation von Dingen zueinander erfassen zu können, haben wir wohl irgendwann einmal die Vorstellung „Raum“ entwickelt (ob als Individuen oder als Art, ist in diesem Zusammenhang unwesentlich); um Veränderungen erfassen zu können, haben wir die Vorstellung „Zeit“ entwickelt. Raum und Zeit sind also Konstrukte unserer Hirne (oder uns metaphysisch vorgegeben), ohne daß es uns aber gelänge, diese Begriffe zu definieren. Die Nicht-Definierbarkeit einerseits und andererseits der Umstand, daß wir nicht umhin können, diese Begriffe jeglicher physikalischen Tätigkeit vorauszusetzen, sie also in einer „exakten“ Wissenschaft zu verwenden, bilden eine Aporie (siehe Fußnote 22). Ihre operationale Bewältigung besteht darin, daß wir Einheiten zur Messung definieren und Meßvorschriften festlegen, wie damit zu verfahren sei. Damit können wir messen und als „sicher“ geltende (das heißt zwar falsifizierbare, aber durch ausreichend viele stattgefundenen Überprüfungen nicht falsifizierte) *prediktive* Theorien entwickeln. Diese entstehen aus einem Wechselspiel von Hypothesen und Experimenten. *Konsistente* Theorien, die aus prediktiven Theorien konstruiert werden, selbst aber nicht überprüfbar sind, sind somit auch nicht widerlegbar. Zu ihnen sind alle kosmologischen Modelle zu zählen. Da nach Popper aber Falsifizierbarkeit eine Voraussetzung für naturwissenschaftliche Hypothesen und Theorien ist, sollte die Kosmologie nicht zu den Naturwissenschaften gezählt werden.

Bei der Bildung konsistenter Theorien geht man allerdings von der unbegründeten Annahme aus, die Natur werde schon so sein, wie wir sie uns vorstellen, auch auf Gebieten, die uns messend nicht zugänglich sind. Daß unsere Begriffe Raum und Zeit auch auf das „Universum“ und seinen Ursprung angewendet Sinn machen, ist also keineswegs selbstverständlich. Wie soll die Aussage „Beim Urknall sind mit der im Universum enthaltenen Masse Raum und Zeit erst entstanden“ (siehe bei Ergänzungen zur ART) mit den Konstrukten unserer Hirne noch zu verstehen sein? Ich erachte

<sup>26</sup> Soll mit diesem Manöver zur Distanzermittlung die Rotverschiebung überprüft werden (diese Notwendigkeit werde ich noch besprechen), so ist natürlich auch eine Einbeziehung von Rotverschiebungsänderungen in die Berechnung unzulässig.

daher diese Aussage für unphysikalisch und finde, daß die Zeit  $t$  in  $R(t)$  für Beobachter im „Inneren“ des „Universums“ keinen Sinn macht. Einem „äußeren“ (absoluten) Beobachter, der unser gesamtes „Universum“ zu jedem Zeitpunkt  $t$  so sehen kann, wie es zu diesem Zeitpunkt „ist“, also ohne die zeitlichen Verzögerungen durch Lichtlaufzeiten, die wir hinnehmen müssen, würden wir die Aussage vielleicht als sinnvoll zugestehen - aber diesen äußeren Beobachter kann es ja definitionsgemäß und laut RWM gar nicht geben und daher macht sie schlußendlich ja doch keinen Sinn (ganz abgesehen davon, daß sich ein absoluter Beobachter wohl kaum unserer Zeit bedienen müßte)<sup>27</sup>. Blicke noch die Möglichkeit, in  $R(\cdot)$  einen anderen Entwicklungsparameter als die Zeit zu verwenden, aber erstens wäre dies noch unanschaulicher und zweitens ist eben die Zeit der in der Physik übliche Entwicklungsparameter, worin wieder die Kluft zwischen Physik und Kosmologie zu erkennen ist.<sup>28</sup>

## Zum Druck im Weltraum:

Die Annahme, daß der Druck im Weltraum Null sei, entspricht der eines „idealen Gases“, bei dem man statt realer Teilchen Massenpunkte voraussetzt, die überhaupt nicht miteinander wechselwirken und aufgrund fehlender Zusammenstöße auch einen Druck im Inneren des Gases vermeiden. Im Kosmos entsprächen den Massenpunkten des idealen Gases in etwa die Galaxien.<sup>29</sup>

Dazu einige Überlegungen:

- Sind Bilder von einander durchdringenden Galaxien nicht ein Widerspruch zu dieser Annahme, oder, anders gefragt: Wenn wir in einer solchen Galaxis lebten, hätten wir dann auch so einfach diese Annahme gemacht?
- In einem idealen Gas herrscht Unordnung und Strukturlosigkeit im Gegensatz zum Kosmos, in dem sich, wie oben beschrieben, immer mehr und immer größere Strukturen entdecken lassen.
- Bleiben wir kurz beim Modell des idealen Gases: Dieses eignet sich zwar zur Beschreibung einfacher physikalischer Zusammenhänge, keineswegs aber zur Beschreibung wesentlicher Teile unserer Wirklichkeit. Daß es dann keine Wolken, keinen Regen, nicht Tau, Reif und Schnee gäbe, könnte man ja noch hinnehmen, obwohl zumindest der Regen für das Leben auf der Erde von absoluter Wichtigkeit ist; aber daß wir dann auch nicht atmen könnten, weil die Massenpunkte des idealen Gases ja definitionsgemäß auch nicht wechselwirken, würde wohl kaum jemanden kalt lassen.

Von der gleichen Qualität, mit der sich mit Hilfe des idealen Gases die Wirklichkeit beschreiben läßt, ist für mich auch die Annahme eines strukturlosen „Kosmos“<sup>30</sup> - nämlich gar keiner. Irgendwie erinnert mich dies an einen Rückfall in das mechanistische Zeitalter von Laplace, als man die Welt als eine große Maschine ansah und zum Beispiel Lebendiges als unbedeutende Störung des großartigen Weltbildes abtat. Aber schon Eddington fand, daß die Welt weniger einer großen Maschine gleiche als vielmehr einer großen Idee.

<sup>27</sup> In der RWM hätten für einen „äußeren“ Beobachter alle Uhren im Weltraum dieselbe Zeitanzeige. Während also für ihn zwei Ereignisse zu den „Weltzeiten“  $x_0$  und  $dx_0$  am selben Raumpunkt den zeitlichen Abstand  $dx_0$  haben, ist dieser für einen inneren Beobachter durch  $(g_{00})^{0.5} \cdot dx_0$  gegeben. Im „flachen“ Raum ist  $g_{00} = 1/(1 - v^2/c^2)$  und somit ergibt sich die Formel für die Zeitdilatation in der Speziellen Relativitätstheorie. Die Funktion der Metrik (hier der RWM) ist also die, daß ein (mit der RWM eigentlich unvereinbarer, also nicht existenter) „äußerer“ Beobachter ermitteln könnte, welche Eigenzeit ein innerer Beobachter benötigen würde, um von einem Weltzeitpunkt zum anderen zu kommen. Kosmologen stellen sich also mit ihrer Methode auf den Standpunkt eines von ihnen selbst für unmöglich bezeichneten „äußeren“ Beobachters, was wiederum zeigt, daß sie mit den Physikern wenig gemeinsam haben.

<sup>28</sup> Vermutlich wird der Zeitbegriff in unserem Sprachgebrauch ähnlich unscharf und vielfältig verwendet wie der Informationsbegriff, den ich für den fundamentalsten einer fernen Physik (oder neuen Naturphilosophie) halte.

<sup>29</sup> Insbesondere ergibt sich daraus keine Möglichkeit einer rotierenden Materie, da „Punkte nicht rotieren“ (Galaxien aber sehr wohl!)

<sup>30</sup> Man möge einmal auf die eigentliche Bedeutung des Wortes achten: die Griechen bezeichneten mit Kosmos die „geordnet gedachte Welt“.

- Und letztlich finde ich, daß die Annahmen von Massenpunkten einerseits und einer homogenen Verteilung (im kosmologischen Prinzip) andererseits überhaupt nicht zusammenpassen.

## Zur „Rotverschiebung“:

Im 1. Kapitel ist die kosmologische Rotverschiebung als metrischer Effekt beschrieben worden. Versucht man, ihr eine physikalische Erklärung zu geben, so kann man sagen, daß das Licht gegen die Gravitation ankämpfen muß, welche auch für die Verlangsamung der Expansion verantwortlich ist, womit die kosmische Rotverschiebung der Art nach eine „Gravitationsrotverschiebung“ wäre. Demgegenüber wird aber die Rotverschiebung im populärwissenschaftlichen Bereich zumeist als „Doppler-Effekt“ erklärt. Machen wir in diesem Zusammenhang einen Blick zurück auf Edwin Hubble, der in seiner Veröffentlichung „A Relation Between Distance and Radial Velocity Among Extra-Galactic Nebulae“ aus dem Jahr 1929 nirgendwo den „Doppler-Effekt“ erwähnt hat. Die dem heutigen KSM zugrundeliegende Metrik (RWM) war ihm damals unbekannt, da sie erst aus dem Jahr 1935 datiert. Wohl aber schreibt er von der „Möglichkeit, daß numerische Daten in die Diskussion der allgemeinen Raumkrümmung eingebracht werden können“ und zur Spektralverschiebung: „In der de Sitter-Kosmologie ergeben sich Spektralverschiebungen aus zwei Quellen: einer scheinbaren Verlangsamung („slowing down“) der atomaren Vibration und einer generellen Streuungstendenz materieller Partikel.“

Wie leicht zu erkennen ist, haben RWM und KSM die Art und Weise, wie man über den Kosmos spricht, grundlegend verändert. Hubbles wesentlichste Aussage in seiner damaligen Veröffentlichung war aber die im Titel stehende Relation zwischen Distanzen und Radialgeschwindigkeiten extragalaktischer Systeme. Jedesmal, wenn ich mir Bild 1 anschau, wundere ich mich darüber, wie Hubble aus den Meßpunkten einen Linearzusammenhang erkennen konnte und mutmaße, daß er diesen erkennen *wollte*, da sein Schlußsatz lautet: „.. und es darf .. unterstrichen werden, daß die in der vorliegenden Untersuchung aufgefundene Linearrelation eine erste Annäherung, einen beschränkten Entfernungsbereich repräsentierend, darstellt.“ So vorsichtig, wie Hubble sich ausgedrückt hat (erste Annäherung; beschränkter Entfernungsbereich) sind seine Epigonen schon längst nicht mehr.

Zurück zum „Doppler-Effekt“: Ein solcher kann die Rotverschiebung auch im KSM nicht sein, und zwar aus zwei Gründen:

- 1) Der Doppler-Effekt beruht auf einer Relativbewegung zwischen Quelle und Beobachter *im* Raum. Aufgrund des kosmologischen Modells expandiert aber *der* Raum; die Galaxien werden zwar vom sich dehnenden Raum mitgenommen, behalten aber ihre Koordinaten bei. Sollte eine zusätzliche Relativbewegung im Raum stattfinden, so würde diese einen Doppler-Effekt bewirken, welcher sich der kosmischen Rotverschiebung überlagern und die Messung von  $H_0$  stören würde (wie dies ja auch die Gravitationsrotverschiebung aufgrund jener Massen tut, aus deren Anziehungsbereich sich das Licht „freikämpfen“ muß).
- 2) Der optische Doppler-Effekt ist ein Effekt der Speziellen Relativitätstheorie, setzt also voraus, daß sich Quelle und Beobachter in ein und demselben Inertialsystem befinden. In der RWM sind aber Inertialsysteme auf so kleine Gebiete beschränkt, daß innerhalb dieser  $z \approx 0$  ist, was aber gerade für die z-Messung nicht sehr tauglich erscheint.<sup>31</sup>

Ein universelles Inertialsystem gibt es aber in der RWM nur in einem einzigen Fall, nämlich dem „flachen“, wenn die Expansion bereits zum Stillstand gekommen ist ( $k = 0$ ;  $\dot{R}_0 = 0$ ). Genau in diesem Fall gäbe es jedoch gar keine Relativgeschwindigkeit durch Expansion mehr zwischen Galaxienhaufen und somit auch keine Rotverschiebung. Der „Hubble-Effekt“ (daß die

<sup>31</sup> Zwei solcher „lokaler“ Inertialsysteme in einem expandierenden Kosmos könnten sich aufgrund der RWM sogar mit Überlichtgeschwindigkeit relativ zueinander bewegen, falls ihr Abstand voneinander groß genug wäre. Grund: Die Lichtgeschwindigkeit als obere Grenzgeschwindigkeit bezieht sich nur auf Systeme, die miteinander kausal verbunden sind, was aber nicht der Fall ist, wenn ein System jenseits des Ereignishorizonts eines anderen liegt.

Rotverschiebung mit der Entfernung zunimmt) wäre äußerst unwahrscheinlich, sollte er aufgrund von Relativbewegungen im Raum zustandekommen mit einer Ausnahme: wenn der „Urknall“ eine Explosion im bereits vorhandenen und sich durch sie relativ wenig beeindrucken lassenden Raum ereignet hätte (also einer Art „absolutem Raum“ im Newtonschen Sinn, der aber mit der RWM unvereinbar ist und für uns im früher erwähnten Sinn erst dann bedeutsam wird, wenn er Dinge enthält, die wir zueinander in Beziehung setzen können). Entweder also, man entschließt sich dazu, die Interpretation als Doppler-Effekt aufzugeben, oder man akzeptiert die letztgenannten Bedingungen.

Kann die Rotverschiebung wirklich nur auf die bisher beschriebenen Weisen zustandekommen? Bisweilen geistert eine Hypothese umher, in der von der „Alterung des Lichts“ die Rede ist, was nichts anderes bedeuten soll, als daß die Frequenz des Lichts eine Funktion der Zeit  $f(t)$  sein könnte. Nichts anderes folgt ja aus der RWM, aber im Zusammenhang mit  $R(t)$ : Nur, wenn  $R(t)$  konstant ist, dann ist es laut RWM auch  $f(t)$ . Eine Änderung der Frequenz wäre in diesem Fall ein Effekt, der weder aus der RWM noch aus sonst einer Theorie folgt, aber selbstverständlich nicht auszuschließen ist, da wir wohl kaum behaupten können, bereits über alles Wissen zu verfügen (daß dies nicht der Fall ist, zeigt ja hoffentlich dieser Artikel deutlich). Wir können aber einen solchen in der Physik unbekanntem Effekt weder voraussetzen, noch hat er Chance auf eine Bestätigung durch Messung: man würde nämlich jeden Effekt, der nicht als Doppler-Effekt erklärbar ist, als kosmologischen Effekt erklären.<sup>32</sup> Jeder andere möglicherweise vorhandene Effekt würde in diesem untergehen, zumindest in der jetzigen Phase ungenügender Meßtechniken, was den Kosmos in seiner Ganzheit angeht. Außerdem widerspräche ja eine solche nicht kosmologisch begründete Änderung der Frequenz wegen  $E = h \cdot f$  entweder der Energie-Erhaltung oder aber der Konstanz des Wirkungsquants, die aber beide durchaus als physikalische Dogmen gelten dürfen. Andererseits aber wäre dadurch der „Hubble-Effekt“ eine Selbstverständlichkeit, nur eben aufgrund der größeren Laufzeiten bei größeren Entfernungen.

Da sich im letzten Absatz wieder die kosmische Entfernungsmessung in eine wichtige Position gebracht hat, soll diese noch einer kritischen Betrachtung unterzogen werden: Wie unschwer einzusehen ist, wird die Bestimmungsstufe von Stufe zu Stufe unsicherer, da immer weniger einleuchtende Annahmen gemacht werden müssen. Ist aber für geringe Distanzen, für welche die kosmische Metrik noch kaum von der Euklidischen abweicht, die aus  $L$  und  $l$  ermittelte Distanz  $D_L$  noch ziemlich gleich der „tatsächlichen“ Distanz  $D$ , so müssen für entferntere Objekte Korrekturen aufgrund der RWM angebracht werden (was aber die Kenntnis sowohl von  $k$  als auch von  $R_0$  voraussetzt - über die wir nicht verfügen!). Ermittelt man auf diese Weise  $D$  und - unabhängig davon -  $z$ , so sollte dies die Parameter  $H$  und  $q$  festlegen: Man trägt  $z$  über  $D$  auf (eventuell auch ihre Logarithmen), ermittelt aus der linearen Näherung  $z \approx HD/c$  den Wert für  $H$  und aus den Abweichungen von der linearen Näherung für große  $D$  den Wert für  $q$ . Wie ungenau diese Methode aber noch ist, zeigt der derzeit gültige Zahlenwert für  $q$  mit  $q = 0,5 \pm 0,5$ , wohingegen der Wert für  $H$  mit 25 bis 100 km/s-Mpc schon eine vergleichsweise sagenhafte Genauigkeit erreicht hat.

### zu: Relativbewegungen, welche von der kosm. Expansion unabhängig sind:

Alle Objekte der „Lokalen Gruppe“ von Galaxien führen eine Eigenbewegung aus, die nicht zur kosmologischen Expansionsbewegung paßt. *Unsere* Eigenbewegung relativ zum kosmischen Hintergrund ermittelt man aus einem Dopplereffekt in der kosmischen Hintergrundstrahlung. Sie ergibt sich zu ca. 400 km/s (600 km/s ... Bewegung unserer Galaxis relativ zum kosmischen Hintergrund; 230 km/s ... Bewegung unserer Sonne um das galaktische Zentrum; 30 km/s ... Bewegung der Erde um die Sonne).

Dafür, daß innerhalb unserer lokalen Gruppe von der kosmologischen Expansion unabhängige Eigenbewegungen stattfinden können, gibt es ein näherungsweise Modell von Einstein und Straus (1945): Man denkt innerhalb der RWM einen kugelförmigen Raum materiefrei geräumt und diese Materie als relativ kleine Kugel in die Mitte dieser Vakuole gesetzt.<sup>33</sup> In der Umgebung dieser

<sup>32</sup> Dies würde auch - könnte man sie überhaupt durchführen - Labormessungen betreffen, da sich ja Licht immer auf Geodäten bewegt, egal, ob im Labor oder im freien Weltraum.

<sup>33</sup> Was allerdings wiederum eine Maßnahme gegen das kosmologische Prinzip darstellt.

Materiekugel gilt dann die sogenannte „Schwarzschild-Metrik“, welche auch die Raum-Zeit-Metrik in der Umgebung Schwarzer Löcher ist. Am Rand der Vakuole muß die Schwarzschild-Metrik in die RWM übergehen. Ein solches Modell liefert für zu kleine Massen in der Vakuole unannehmbar Ergebnisse, z.B. würde die Erdvakuole auch die Sonne enthalten, die Sonnenvakuole würde die nächsten Fixsterne enthalten; aber eine Vakuole um die Masse unserer lokalen Galaxiengruppe würde auch tatsächlich nur diese enthalten und keine weiteren Galaxienhaufen. Und innerhalb dieser Vakuole würde - wegen der fehlenden RWM - vor allem die kosmische Expansion nicht wirksam sein! Trotzdem zeigen aber auch andere Galaxienhaufen eine ähnliche Eigenbewegung wie wir, woraus man auf eine große Ansammlung dunkler Materie mit bis zu  $10^5$  Galaxienmassen schließt, die unseren Galaxienhaufen sowie auch unsere Nachbarn mit ihrem starken Gravitationsfeld bereits mehrere Milliarden Jahre hindurch anzieht und „Großer Attraktor“ genannt wird.

### zum „Weltalter“:

Versucht man, Aussagen über den „Anfang“ des Universums zu machen, also eigentlich Kosmogonie zu betreiben, so stößt man an mehr als eine physikalische Grenze:

- Zunächst eine Grenze, welche aus der Physik selbst kommt: die „Planck-Zeit“ von ca.  $10^{-43}$  Sekunden wird allgemein als das kleinste physikalisch sinnvolle Zeitintervall aufgefaßt. Nun wird aber Kosmologie zeitlich nicht in Vorwärts-, sondern in Rückwärtsrichtung betrieben: also vom Jetzt ausgehend in immer frühere Zeiten zurückzuschließen, was aus heutiger Sicht sinnvoll sein könnte - falls es diesen „Anfang“ „jemals“ gegeben hat - bis  $10^{-43}$  Sekunden an diesen „Anfang“ heran; was „davor“ gewesen sein könnte, entzieht sich sowohl der formalen Darstellbarkeit als auch der entsprechenden sprachlichen Sagbarkeit.
- Dann eine Rahmengrenze: Reproduzierbarkeit bzw. wiederholte Beobachtbarkeit wird gefordert. Wir können aber den „Anfang“ weder ein zweites Mal herbeiführen noch ein zweites Mal beobachten, womit die Forderung für die Aufnahme von Phänomenen in den Bereich der Naturwissenschaften nicht erfüllt ist. (Es ist fast schon überflüssig, darauf hinzuweisen, daß wir ja den „Anfang“ auch beim ersten Mal nicht beobachten konnten.)

Aussagen über den „Anfang“ des Universums scheinen also im Rahmen der Naturwissenschaften prinzipiell nicht möglich und daher auch nicht sinnvoll zu sein. Dessenungeachtet wird heute viel vom „Urknall“ geredet und geschrieben, was schon vielen Autoren zu gutem Einkommen verholfen haben dürfte.

Urknallhypothetiker gehen davon aus, daß die Raum-Zeit endlich ist, da sie vor endlicher Zeit (zu einer „Zeit“ also, zu der es die Zeit noch gar nicht gab) in einem „Urknall“ genannten Ereignis nichtphysikalischer Art entstanden ist und seither expandiert.<sup>34</sup> Man geht aber auch davon aus, daß durch Gravitation der im Weltraum enthaltenen Massen die Expansion allmählich verlangsamt wird, wie es ja auch in den „Friedmann-Lösungen“ zum Ausdruck kommt. Im „geschlossenen“ Fall könnte es sogar zu einer Umkehr der Expansion, also zu einer Kontraktion kommen, die schließlich in einem „Endknall“ enden würde. So wie Raum und Zeit erst mit dem „Urknall“ entstanden sein sollten, müßten sie dann auch mit dem „Endknall“ verschwinden.

Bisweilen vernimmt man dazu in populärwissenschaftlichen Publikationen, wie man sich das „Universum“ zur „Planck-Zeit“ nach dem „Urknall“ vorstellen könne: als Objekt etwa von der Größe einer Orange, in dem sich die gesamte Energie befinde, die auch im heutigen Weltraum enthalten sei - mitsamt den Energieäquivalenten der heutigen Massen. Wer kann mit Recht solche Aussagen machen? Hat irgend jemand auch nur näherungsweise Erfahrung mit einer solchen Energie-/Massendichte gemacht? Läßt sich der Zustand der Materie oder was immer die Orange gefüllt haben mag, physikalisch - und das heißt immer noch messend überprüfbar - beschreiben? Wenn (im Popperschen Sinn) eine solche Aussage nicht durch Messungen falsifizierbar ist, gehört sie auch nicht in den Bereich der Naturwissenschaften - und deshalb meine ich, daß die

<sup>34</sup> Siehe dazu das Kapitel „Gegen den Urknall als Ereignis“.

Naturphilosophie der angemesseneren Bereich für solche Spekulationen wäre. Herbert Pietschmann meint dazu, daß, obwohl es sich bei kosmologischen Urknall-Modellen lediglich um konsistente Theorien handelt, „sie gerade dadurch eine vertiefte Bedeutung erhalten. Das mag auch der Grund sein, warum sich die Gemeinschaft der Physiker auf solche Erklärungsmodelle schnell einigen konnte.“<sup>35</sup> Demgegenüber vertritt Geoffrey Burbidge, aus dem Dunstkreis der einstmals konkurrenzierenden, aber von der Mehrheit der Kosmologen abgelehnten „Steady-state-Theorie“ kommend, die keineswegs überraschende Meinung, die Urknall-Kosmologie sei eine Art Modeartikel geworden („a bandwagon of thought“), die Glaube ebenso widerspiegelt wie objektive Wahrheit.

Nun scheuen ja die Autoren solcher Hypothesen davor zurück, ihren fachlichen Veröffentlichungen Bilder zur Veranschaulichung beizugeben - dort bleibt es beim mathematischen Formalismus, bestenfalls einem Diagramm. Nicht so aber, wenn diese Autoren mit ihren Thesen auch Geld verdienen wollen und mit Büchern an die breitere Öffentlichkeit gehen. Dann findet man doch zur besseren Vorstellbarkeit hier und da ein Bildchen, das den „Kosmos“ in seinem frühesten „Zustand“ zeigt - und zwar von außen! Von jenem Außen also, nach dem nicht gefragt werden darf; von einem Raum aus, der damals noch gar nicht entstanden war, wie man so sagt. In dem sich daher auch kein Beobachter befinden konnte - und wenn er sich hätte befinden können (als ein „nicht zum Universum Gehöriger“ also), dann hätte er von dieser Orange nichts gesehen - absolut nichts, weil ja noch die gesamte Energie im Inneren der Orange war; kein Lichtstrahl hätte den Beobachter erreichen können - und wenn er ihn erreicht hätte, dann wäre er sozusagen in den sich (worin? <sup>36</sup>) ausdehnenden „Weltraum“ hineingeraten, und was er da „gesehen“ hätte, wage ich gar nicht zu träumen.

Ich frage mich, wozu man mit solchen Darstellungen die Frage nach dem „Außen“ herausfordert, um sie dann, wenn sie ausgesprochen wird, als unsinnig und nicht zu stellend abzutun. (In filmischen Darstellungen bekommt man den „Big Bang“ unter Umständen auch noch akustisch vermittelt, so wie es ja auch im Weltraum dauernd kracht, wenn die Sternenkrieger einander bekämpfen!)

Die seriösesten Bücher dieser Art zeigen vor der Orange noch ein Bildchen mit einem Fragezeichen - für mich das Sinnbild auch für alles danach.

Das soll aber nun nicht heißen, daß ich gegen Erklärungen für die breite Öffentlichkeit bin (zu der ich ja auch gehöre) oder gar gegen bildhafte Darstellungen. Ganz im Gegenteil! Genau dies sollte auf allen wissenschaftlichen Gebieten gefordert werden und nicht nur dort, wo sich etwas damit verdienen läßt. Schließlich finanziert ja üblicherweise die breite Öffentlichkeit die Forschung - also sollte sie auch entsprechend über deren Ergebnisse informiert werden. Dies würde bedeuten, daß sich die Wissenschaftler nicht hinter ihrem „Fachchinesisch“ verbergen könnten, sondern von Zeit zu Zeit darüber nachdenken müßten / sollten, wie sie dieses in die Umgangssprache übersetzen. Daß dies trotz aller damit verbundenen Mühsal prinzipiell möglich sein müßte, liegt auf der Hand: Schließlich bedarf es zur Definition eines jeglichen Begriffes anderer, vorher definierter Begriffe, zu deren Definition wieder andere, vorher definierte Begriffe verwendet worden sind, usw., bis schließlich die unterste Definitionsebene auf Begriffen der Alltagssprache aufbauen muß, weil es keine anderen Begriffe mehr gibt, von deren Allgemeinverständlichkeit man ausgehen kann. Also muß auch letztendlich jedes wissenschaftliche Ergebnis in die Alltagssprache „übersetzbar“, auf sie reduzierbar sein - und zwar ohne Verlust an Exaktheit. Wahrscheinlich aber wäre dann das Ergebnis so komplex, daß sich kein „Alltagsmensch“ damit beschäftigen würde. Gefragt sind daher Wissenschaftler, die den richtigen Mittelweg finden, um Ergebnisse ihrer Wissenschaften „dem Volk“ zu vermitteln, ohne aber Widersprüche wie den oben geschilderten geradezu zu provozieren.

## Und was war „davor“?

<sup>35</sup> Lit. 10, Seite 270

<sup>36</sup> Die Frage nach dem Außen und Vorher wird von Standardkosmologen nicht zugelassen. Raum und Zeit sind laut diesen erst beim „Urknall“ entstanden und expandieren seither. Worin aber? Ist es nicht als Armutzeugnis einer Wissenschaft zu werten, wenn sie gerade jene Fragen, welche Menschen im Zusammenhang damit stellen, als unsinnig abtut? Aber letzte Fragen sind von der Naturwissenschaft nicht beantwortbar - vielleicht doch eher von einer neuen Naturphilosophie? Oder nur von Religionen?

Wie bereits erwähnt, fällt die Zeit  $10^{-43}$  Sekunden an den Urknall heran gänzlich aus dem physikalischen Bereich heraus. Dennoch finden sich immer wieder Leute, die Spekulationen darüber anstellen, was zum Zeitpunkt des „Urknalls“ geschehen sein könnte bzw. was diesen hervorgerufen haben könnte.

Hat man einige Zeit lang Gott zumindest noch die Schöpferrolle zuerkannt, während man ihn mit der Durchsetzung der naturwissenschaftlichen Methode zunehmend aus dem Lauf der Welt herausgehalten hat, so wird nun auch schon an seiner Rolle als „Knöpfchendrucker“ für den „Urknall“ gezweifelt. Stephen Hawking, der mit Hilfe eines „zeitlichen Vorlaufes“(!) vor dem „Urknall“ diesen unangenehmen Zeitpunkt umgehen möchte, ist von der Fähigkeit seines mathematischen Modells so überzeugt, daß er aus seinem Bestseller „Eine kurze Geschichte der Zeit“ eigentlich eine Schrift gegen die Notwendigkeit Gottes gemacht hat. Dabei erinnert mich die Häufigkeit, mit der er Gott erwähnt, obwohl es ihm doch darum geht, dessen Unnotwendigkeit plausibel zu machen, an Douglas Adams Roman „Per Anhalter durch die Galaxis“, in dessen 6. Kapitel der Streit um die Nichtexistenz Gottes dazu führt, daß sich mit einem Bestseller des Titels „Na, lieber Gott, das war's dann wohl“ viel Geld verdienen läßt.

Nun aber zum modernsten kosmologischen Kapitel, der „Quantenkosmologie“. In ihr dürfen zwar Fragen, die laut KSM unsinnig sind, doch gestellt werden, aber die Beschäftigung damit erfolgt auf eine höchst anzweifelbare Art: Orte können nicht genauer als auf  $10^{-35}$  m (die „Planck-Länge“) und Zeiten nicht genauer als auf  $10^{-43}$  s (die „Planck-Zeit“)<sup>37</sup> angegeben werden. Nicht nur soll es dadurch unmöglich sein, einen absoluten Nullpunkt für die Zeit festzulegen, Raum und Zeit sollen in diesen Größenordnungen (und somit auch im allerfrühesten „Kosmos“) überhaupt ihre Unterscheidbarkeit verlieren und als eine Art „Raum-Zeit-Schaum“ existieren, innerhalb dessen Ereignisse weder räumlich noch zeitlich festlegbar sind (inwieweit es dann überhaupt noch sinnvoll sein kann, dabei von „Ereignissen“ zu reden, bleibe dahingestellt). Immerhin dient manchen „Quantenkosmologen“ (= „Vorurknallhypothetikern“) dieser Schaum, in dem also nichts festgelegt werden kann, dazu, bezüglich der Anfangsphase des „Universums“ von „Zeitlosigkeit“ zu reden, die dann auch gleich dazu benutzt werden kann, als unendlicher Zustand herzuhalten, in dem halt dann „irgendeinmal“ der „Urknall“ unseres „Universums“ passierte und sich jenes, nach „Ablauf“ der „Anstandszeit“ von  $10^{-43}$  s, der physikalischen Erforschung zur Verfügung stellte.

Selbstverständlich kann dieser Schaum auch gleich noch für anderes mißbraucht werden: Wer sagt denn, daß nur *ein* „Urknall“ in ihm stattfinden konnte, woraus also nur *ein* „Universum“ entsprang? Ebenso gut könnten es doch unendlich viele sein, was die Antwort gäbe auf die leidige Frage, warum unser „Universum“ gerade jene günstigen Bedingungen aufweist, die für unser Zustandekommen Voraussetzung sind: Wir leben halt in dem einen von unendlich (oder zumindest sehr, sehr) vielen „Universen“, in dem diese günstigen Bedingungen vorhanden sind; „anderswo“ mag es lebensunwerter sein.

Hier findet offensichtlich ein Trickstück statt, da ein „Etwas“, das nicht in Raum und Zeit „stattfindet“, als ebenso transzendental einzustufen ist, wie es ein Schöpfergott oder die mystische Einheit ist. Aber es geht noch weiter: Was soll „auslösend“ sein für einen „Urknall“? Nun, ganz einfach: Der Raum-Zeit-Schaum enthält ein „Quantenvakuum“, in dem ständig „Fluktuationen“ stattfinden: Virtuelle (also nicht wirklich nachweisbare) Teilchen-Antiteilchen-Paare entstehen und vergehen in ihm unaufhörlich. Dabei spielt das Produkt aus Energie und Zeit eine Rolle:  $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$  (darin ist  $\Delta t$  die Existenzdauer des Teilchen-Antiteilchen-Paares und  $\Delta E$  die während  $\Delta t$  bestehende Abweichung vom Mittelwert der Vakuumenergie).

<sup>37</sup> Max Planck (1858 - 1947) entdeckte die nach ihm benannte Naturkonstante „Wirkungsquant“ (mit  $h$  bezeichnet) und daß sich aus ihr, gemeinsam mit der Gravitationskonstante  $G$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c$  fundamentale Werte für die physikalischen Grundgrößen Länge, Zeit und Masse bilden lassen: „Planck-Länge“, „Planck-Zeit“ und „Planck-Masse“ (einige  $10^{-8}$  kg), wobei man für Länge und Zeit meint, damit eine absolute Meßbarkeitsgrenze gefunden zu haben, während man der doch relativ großen Masse eine andere Bedeutung gibt: Sie soll das Massenäquivalent  $m = E/c^2$  jener Energie  $E = hf$  sein, die ein Photon haben müßte, um damit nach der Unbestimmtheitsbeziehung  $\Delta p \cdot \Delta x \geq h/4\pi$  Ortsangaben auf  $\Delta x =$  „Planck-Länge“ genau durchführen zu können (wobei  $\Delta p$  die Genauigkeit der Impulsmessung bezeichnet).

Im „Quantenvakuum“ aber gibt es gar keinen Zeitablauf, da Raum und Zeit doch erst mit dem „Urknall“ zu existieren beginnen sollten. Das  $\Delta t$  in obiger Formel aber ist ein Intervall unserer Zeit, setzt also den Zeitbegriff bereits voraus, wie das ja auch für Fluktuationen (dieses Wort bezeichnet Vorgänge!) der Fall ist.

Die physikalische Grenze wird also in quantenkosmologischen Modellen so oft überschritten (andere „Universen“ wären einer Beobachtung vollkommen unzugänglich und fallen deshalb aus dem physikalischen Rahmen), daß sie nicht einmal als naturwissenschaftliche Hypothesen gelten können, sondern bloß als phantasievolle Ideen à la science-fiction, die einen entzücken, amüsieren oder sonstwas können, einem nach Erkenntnis strebenden Menschen aber keineswegs weiterhelfen.

### **3. Kapitel:** **Schlußbemerkungen:**

Das in der Physik angewendete „Universalitätsprinzip“ ist eine Voraussetzung für naturwissenschaftliche Tätigkeit und besagt, daß die jeweils von der Mehrheit der irdischen Physiker anerkannten Sätze über die Natur an allen Orten und zu allen Zeiten gültig sind. Zur Aporie wird dieses Prinzip dadurch, daß es sich dabei einerseits um eine unbedingt notwendige Voraussetzung handelt (Sätze über die Natur sollen ja möglichst allgemeingültig sein, und die Angabe einer Gültigkeitsgrenze müßte erst wieder erklärt werden<sup>38</sup>); andererseits kann diese Voraussetzung aber unmöglich überprüft werden.

Angesichts eines so stolzen Prinzips kommt mir aber doch bisweilen die Idee, daß die Physiker, die gerade die Erde und ihre nächste Umgebung einen Augenblick lang (in kosmischen Zeiten gedacht), so einigermaßen kennengelernt haben, und nun versuchen, ihr Wissen auf die fernsten Bereiche des Weltalls und auf alle Vergangenheit und alle Zukunft anzuwenden, vielleicht doch ein wenig in Lao Ze's Brunnenfrosch und Eintagsfliege zu erkennen sind, mit denen man aufgrund ihrer Begrenztheiten nicht über die Welt bzw. über das Jahr reden könne. Und noch eine weitere Idee drängt sich mir angesichts dieses Prinzips auf: Welch faszinierende Fernwirkung (von Physikern längst nicht mehr gedacht) durchzuckt doch das ganze „Universum“ in Raum und Zeit, wenn sich hier auf Erden die von der Mehrheit der irdischen Physiker anerkannten Sätze ändern!

Aber Spaß beiseite. Naturwissenschaftliche Erkenntnis besitzt drei Grenzen:

- Die technologische Grenze (bedingt durch den jeweiligen Stand der Technik)
- Die methodologische Grenze (sie liegt in der Natur der Methode begründet; so kann es etwa wegen der Relativitätstheorie keine größere Geschwindigkeit geben als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und wegen der Unbestimmtheitsbeziehungen der Quantenphysik keine beliebig genauen Messungen)
- Die ontologische Grenze (sie ist gegeben durch den in der Naturwissenschaft existenten Denkrahmen, wozu auch die Axiome der Logik gehören; durch diesen Denkrahmen werden Forderungen erhoben wie Reproduzierbarkeit, Quantifizierbarkeit, Analysierbarkeit, Eindeutigkeit, Widerspruchsfreiheit, kausale Begründbarkeit)

Abgesehen davon, daß auch schon die Quantenphysik einigen dieser Forderungen nicht gerecht wird, kann ich auch in der Kosmologie davon nichts bemerken. Sie überschreitet zumindest die technologische und die ontologische Grenze ganz eindeutig.

Wenn die Kosmologie im Rahmen der Physik verbleiben soll, so muß sie sich wohl oder übel in deren methodisches Korsett zwängen und sich die Frage gefallen lassen, wie man denn die Expansion des Weltraums (wenigstens im Prinzip) direkter messen könnte als über die Rotverschiebung (weil, wie schon oben gesagt, dieser Zusammenhang zutreffen kann, aber nicht muß).

<sup>38</sup> Allerdings gibt es so etwas wie eine „Sicherheitsgrenze“ für die Gültigkeit der Sätze über die Natur: Sie umschließt jenen räumlichen und zeitlichen Bereich, in dem die Sätze überprüft sind.

Die Längenmessung mittels Maßstabes hängt offensichtlich von der verwendeten Meterdefinition ab und ist daher nicht eindeutig. Die beiden letzten Definitionen beziehen sich beide auf das Licht: Die frühere stellte das Meter als ein bestimmtes Vielfaches der Wellenlänge einer bestimmten Spektrallinie dar; die heute gültige bezeichnet das Meter als einen bestimmten Teil der Länge jener Strecke, die das Licht in 1 Sekunde im Vakuum zurücklegt, wobei die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit vorausgesetzt wird.

Wenn der Raum zwischen den Punkten A und B expandiert und diese Punkte bezeichnen Anfang und Ende eines Meters, das man unter Verwendung der erstgenannten Definition festgelegt hat, so

- wächst bei wiederholter Verwendung von einmal ausgesandtem Licht die Länge dieser Maßeinheit um denselben Faktor, um den sich auch  $R(t)$  ändert, was heißt: Maßzahlen von Längenmessungen würden sich niemals ändern. (So verhält sich ja auch die kosmische Hintergrundstrahlung: einmal erzeugt, ändert sich ihre Wellenlänge um denselben Faktor, um den sich wegen  $R(t)$  auch kosmische Distanzen ändern, so daß sich bei einer Maßstabbildung mittels der Hintergrundstrahlung keine Maßzahländerungen bei kosmischen Distanzmessungen ergäben.)
- ändern sich Maßzahlen, wenn zu verschiedenen Zeiten der Maßstab mit stets frisch ausgesandtem Licht neu festgelegt wird: Unter der Annahme, daß die fundamentalen Naturkonstanten wirklich zeitlich konstant sind, ändern sich auch die Atome nicht und somit bleibt auch die Wellenlänge des stets frisch emittierten Lichts zeitlich konstant. Solcherart zu verschiedensten Zeiten festgelegte Maßstäbe sollten dann untereinander gleich sein, während sich aber kosmische Distanzen verändern.

Etwas heikler wäre die Situation, wenn man für die Messungen einen materiellen Maßstab verwendete: Würde auch dieser die Raumdehnung mitmachen? Zunächst könnte man mit nein antworten und argumentieren, daß nur solche Teilchen (beim Licht: Photonen) von der Expansionsbewegung mitgenommen werden, die keiner Wechselwirkung unterliegen. Betrachtet man nach Einstein die Gravitation als „Krümmung“ der Raum-Zeit, das heißt also als deren geometrische Eigenschaft, so ist sie keine Wechselwirkung und daher macht das Licht die Expansion mit, da es ja bloß auf dem kürzesten Weg zwischen A und B verläuft. Körper hingegen, die ja durch elektromagnetische Wechselwirkung zusammengehalten werden, sollten daher die Expansion nicht mitmachen und somit zeitlich veränderliche Maßzahlen anzeigen. Wenn man so argumentiert, legt man aber seinen Finger auf einen der wundesten Punkte der heutigen Physik: Gilt die Gravitation wirklich nicht als Wechselwirkung? Dann gäbe es auch keine Vereinheitlichung mit den „anderen“ Wechselwirkungen, keine „Theory of Everything“ und auch keine Gravitonen<sup>39</sup>, die bei einer quantenfeldtheoretischen Beschreibung der Gravitation auftreten müßten. Bis heute sind die Allgemeine Relativitätstheorie, der ja die Idee der Krümmung der Raum-Zeit entstammt, und die Quantentheorie, welche die Wechselwirkungen quantenfeldtheoretisch beschreibt, unvereinbar - und nur diese Unvereinbarkeit würde die Messung der Expansion durch Maßzahländerung mittels eines materiellen Maßstabes ermöglichen.<sup>40</sup>

Nach meinem Dafürhalten ist aber die Natur *eine*, zerfällt also nicht wirklich in jene Teile, die sich durch die Allgemeine Relativitätstheorie einerseits beziehungsweise durch die Quantentheorie andererseits beschreiben lassen. Sollte es also jemals zu einer übergeordneten Theorie kommen, welche die beiden heute noch unvereinbaren Theorien unter ihre Fittiche bringt, wäre dann die Expansion mit materiellen Maßstäben feststellbar oder nicht??

Eine andere Idee:

Würde die Lichtgeschwindigkeit allmählich abnehmen, so wären auch die Abstände der Elektronen von den Atomkernen davon betroffen, da sie ja der elektrischen Wechselwirkung unterliegen,

<sup>39</sup> Gravitonen ergeben sich aus der ART durch Linearisierung der nichtlinearen (!) Gleichungen und anschließende Quantisierung.

<sup>40</sup> Auch ohne das Vorhandensein einer solchen übergeordneten Theorie wird heute in Kosmologenkreisen durchaus angenommen, daß in der Frühzeit des „Universums“, zumindest unmittelbar nach einem „heißen Urknall“ die Gravitation den Gesetzen der Quantenphysik unterworfen gewesen ist.

welche aufgrund der Quantenelektrodynamik von virtuellen Photonen übertragen wird, die mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs sind! Eine Abnahme der Lichtgeschwindigkeit würde somit auch Atomdurchmesser vergrößern - und damit auch die Länge von materiellen Maßstäben. Wie im vorigen Punkt bereits angedeutet, würden sich somit bei Verwendung materieller Maßstäbe Maßzahlen im Weltraum tatsächlich nicht ändern. Dazu muß ich allerdings anmerken, daß unter den etablierten Physikern schon der bloße Gedanke an die Möglichkeit einer zeitlichen Nichtkonstanz der Lichtgeschwindigkeit einem Sakrileg gleichkommt.

Das Universum, das, wie schon der Name besagt, alles umfaßt<sup>41</sup>, ist für uns einmalig - unabhängig davon, wie bizarr es tatsächlich sein mag oder von uns gesehen wird. In diesem „Einmalobjekt“ können wir uns zwar umsehen und versuchen, uns darin zurechtzufinden - allgemeine Überlegungen über das Ganze können aber nicht „objektiv“ sein, da wir weder das Ganze überblicken können müssen noch Vergleichsmöglichkeiten mit einem zumindest „zweiten Universum“ haben; die anhand des *ersten* gewonnenen Erfahrungen daher nicht anhand eines *zweiten* (besser: mehrerer) vergleichen und somit objektivieren können. „Objektivität“ über das Ganze kann also nur dadurch zustandekommen, daß Menschen einen gewissen Konsens darüber finden, als was oder wie sie das Ganze sehen wollen. Tatsächlich ist diese Sichtweise massiv zeit- und kulturabhängig und wird vor allem tradiert oder, wie es derzeit in der wissenschaftsgläubigen Welt üblich ist, als Quasi-Konsens<sup>42</sup> einer relativ kleinen Gruppe von Wissenschaftlern dem staunenden Volk eingeredet.

Ich behaupte also: Aussagen über das Universum (als Ganzes) können nicht objektiv sein und passen daher nicht in den physikalischen Rahmen, in dem ja „Objektivität“ gefordert wird.

Wir sollten aber auch nicht vergessen, daß stillschweigend noch eine ganze Menge anderer Voraussetzungen gemacht worden sind, die im Rahmen der Physik als selbstverständlich gelten (wieso eigentlich?): die Konstanz der „Naturkonstanten“ (c, h, G) und vor allem der Energie. Bloß, weil im Laufe der wenigen Jahre, in denen Menschen Messungen durchführen, eine solche Konstanz näherungsweise festgestellt worden ist (die Meßfehler sind viel zu groß, um zu erwartende kosmologische Änderungen in so kurzen Zeitintervallen festzustellen), besteht noch lange keine Berechtigung, sie für alle Zeit vorauszusetzen. Daß es dennoch - des „Universalitätsprinzips“ wegen - getan wird, zeugt von einer tiefgreifenden Beschränkung der heutigen Naturwissenschaft, die mit dem Festhalten an „Dogmen“ aber Gefahr läuft, sich damit selbst einen möglichen Fortschritt zu erschweren oder ganz unmöglich zu machen. Die Kirche mag mit ihren Dogmen leben. Naturwissenschaftler und auch Naturphilosophen aber sollten dies nicht tun.

Um auch ein wenig „Volkswisheit“ anzuwenden: Es strebt der (westlich denkende) Mensch, solange er lebt; und er irrt, solange er strebt. Und so wird er wohl stets mit einem unvollkommenen Weltbild auskommen müssen. Aber die Chance zur Verbesserung ist ja wohl immer gegeben.

Die Begeisterung der Kosmologen des 20. Jahrhunderts wird verständlich, wenn man bedenkt, daß sie erstmals in der Geschichte der Kosmologie überhaupt die Möglichkeit zu einer formalen Beschreibung gehabt haben. Über dieser Begeisterung sollte man aber auch nicht vergessen, daß die Randbedingungen sehr unklar sind, was den Wert solcher Modelle stark relativiert. Für mich ist

<sup>41</sup>Wobei man unterscheiden muß zwischen dem Universum im kosmologischen Sinn (= die gesamte materiell-energetische Welt für den nach Wissen strebenden Menschen „westlicher Denkungsart“) und dem Universum im mystischen Sinn (= die Einheit von allem für den nach Erfahrung strebenden Menschen „östlicher Denkungsart“, der die Einheit von allem nur durch das mit ihm Einswerden erfahren kann; dieses mystische Universum ist letztlich unbegrenzt, unveränderlich, unabhängig von Ursache und Wirkung und somit dem dualen Denken des Menschen „westlicher Art“ prinzipiell unzugänglich. (Typische Beispiele für duales Denken: „Da ich - dort der Rest der Welt“; die „Umwelt“ sozusagen - als gehörte man nicht selbst dazu. Oder: „Hier die Welt - dort Gott“ für jemanden, der Gott als Schöpfer gerade noch gelten läßt, aber ablehnt, daß er mit der Welt ist.)

<sup>42</sup> Innerhalb der Gruppe der Kosmologen gibt es durchaus erhebliche Auffassungsunterschiede, die auch in der Literatur zutage treten. Was für den interessierten Laien leider fehlt - und was ich allen Autoren zum Vorwurf machen muß - ist die klare Abgrenzung zwischen jenen allgemein anerkannten Grundlagen, die von allen als verbindlich angesehen werden, und den Beliebigkeiten auf jenen Gebieten, die der Spekulation noch Tür und Tor offen lassen, wie etwa der Auswahl einer bestimmten Lösung der Einstein-Gleichungen oder der Wertschätzung einer bislang ungenau gemessenen „Konstanten“ (z.B. der Hubble-Zahl), woraus sich durchaus unterschiedliche Entwicklungen für die Frühzeit des Universums konstruieren lassen. Was ich mir wünsche: Eine jedem Buch bzw. jeder Veröffentlichung vorangestellte Auflistung aller Voraussetzungen, die gemacht worden sind. Das wäre dem Leser (und somit letztlich der Öffentlichkeit und damit den eigentlichen Financiers der Forschung) gegenüber ehrlich und ist somit einzufordern.

somit der „Urknall“ nichts anderes als ein Schöpfungsmythos, der mit naturwissenschaftlichem Vokabular erzählt wird. Nicht mehr und auch nicht weniger.

Abschließen möchte ich den Artikel mit einem Einwand, den ich schon in „Naturwissenschaft und Naturphilosophie“ gebracht habe und der auch bereits zu Beginn dieses Artikels angeklungen ist:

Aus allen kosmologischen Modellen läßt sich (wie auch aus der gesamten naturwissenschaftlichen Tätigkeit) keine Ethik herleiten. Da wir aber als Menschen nach einer Moral für unser Handeln fragen (dürfen), scheint für uns eine unüberbrückbare Kluft zwischen - um es mit den Worten Descartes' auszudrücken - „res extensa“ (Materie) und „res cogitans“ (Geist) zu klaffen; wir werden uns der Zweigleisigkeit bewußt, in der wir denken müssen - und sehnen uns doch nach Vereinheitlichung.

Mag also die heutige Kosmologie der Versuch einer „operationalen Bewältigung“ des Themas aus naturwissenschaftlicher Sicht sein - mit vielen Mängeln, wie ich hoffentlich (wenn auch gewiß sehr unvollständig) habe zeigen können - , eine zufriedenstellende Bewältigung des doch überkomplexen Themas ist sie nicht.<sup>43</sup>

Deshalb meine ich, daß eine neue Naturphilosophie, ausgestattet mit einer größeren Vielfalt an Methoden (von denen die naturwissenschaftliche Methode nur eine sein könnte), untersuchen sollte, ob sie imstande wäre, dies zu leisten.<sup>44</sup>

Erwin Kohaut ©  
Wien, 1997

---

<sup>43</sup> Da der Begriff Universum (wie ich ihn zu verwenden pflege, daher diesmal ohne „Gänsefüßchen“) nichts außer sich zuläßt, enthält es - um ein anschauliches Beispiel zu wählen - selbstverständlich auch meine Ideen und Phantasien. Die kosmologischen Modelle (wie ja auch alle naturwissenschaftlichen Theorien) aber enthalten nicht einmal mich. Diese Sätze bitte ich den Leser auf sich zu beziehen.

<sup>44</sup> Siehe dazu auch den Artikel „Naturwissenschaft und Naturphilosophie“.

Literaturliste:

- 1) Torsten Fließbach, Allgemeine Relativitätstheorie, Bibliographisches Institut, 1990
- 2) Hans Stephani, Allgemeine Relativitätstheorie, Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1991
- 3) Leon Lederman / David Schramm, Vom Quark zum Kosmos, Spektrum Bibliothek, 1989
- 4) Karl Lanius, Mikrokosmos-Makrokosmos, Beck
- 5) Hans-Heinrich Voigt, Das Universum, Reclam, 1994
- 6) Gerhard Börner, The Early Universe, Springer, 1993
- 7) Astronomisches Jahrbuch 1997: Wieviele Universen gibt es?
- 8) Spektrum der Wissenschaft, 6/1996: Neutronendoppelsterne
- 9) Stephen Hawking, Eine kurze Geschichte der Zeit, Rowohlt, 1988
- 10) Herbert Pietschmann, Phänomenologie der Naturwissenschaft, Springer, 1996
- 11) Douglas Adams, Per Anhalter durch die Galaxis, Ullstein, 1988
- 12) Edwin Hubble, A relation between distance and radial velocity among extragalactic nebulae, Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. 15, 169 - 173
- 13) Erwin Kohaut, Naturwissenschaft und Naturphilosophie; erschienen in „AHS“, herausgegeben von der Gewerkschaft Öffentlicher Dienst im Zeitraum 5/1996 bis 5/1997