

Weltall und Unendlichkeit

Grenzen der naturwissenschaftlichen Kosmologie

Bruno Binggeli

Erscheint in redigierter Form in: «Endlichkeit und Unendlichkeit», Vorträge der Aeneas-Silvius-Stiftung an der Universität Basel, Band LIII, hg. Urs Breitenstein, Schwabe Verlag, Basel 2023

Das Weltall gilt als Inbegriff der Unendlichkeit. Wer je das berühmte *Hubble Deep Field* oder eine andere tiefe Aufnahme des Weltraumteleskops aufmerksam betrachtet hat, ein Stück «leerer» Himmel von der Grösse einer Bleistiftspitze am ausgestreckten Arm, in welchem Tausende kleiner und kleinster Objekte zu sehen sind, Galaxien, die sich offensichtlich, perspektivisch verkürzt, entlang des Sehstrahls in der Tiefe übereinander stapeln, um schliesslich im Bildrauschen zu versinken, – der wird unwillkürlich in diese gähnende Schwärze hineingezogen und vermeint, der Unendlichkeit direkt ins Auge zu blicken (Abb. 1). Die Vorstellung, dass es dort draussen auch von Leben wimmeln muss, sogar von intelligentem Leben, ja von «galaktischen Zivilisationen», gesellt sich rasch hinzu. So will es auch die Populärkultur der Sciencefictions, und tatsächlich sind schon Tausende Planeten, die um andere Sonnen kreisen, entdeckt und ist die Suche nach extraterrestrischem Leben in vollem Gange. Diese Vorstellung entspricht im Wesentlichen der kühnen Vision Giordano Brunos von einem unendlichen und unendlich belebten Universum. Dem Denkmal für Giordano Bruno, leider nicht auf dem Petersplatz, sondern auf dem *Campo de' fiori* in Rom, wo der «ketzerische» Dominikanermönch im Jahr 1600 den Feuertod erleiden musste, wird, inmitten des lärmigen Markttreibens, allerdings wenig Beachtung geschenkt – Sinnbild der Selbstverständlichkeit, zu welcher uns das Bild des unendlichen und unendlich belebten Weltalls geworden ist. Offenbar können wir uns nichts anderes mehr vorstellen. Zu Recht?

Die Frage nach Leben im All ist ein anderes Thema. Was seine Dimension betrifft, so ist das Universum freilich unfassbar gross (viele Milliarden Lichtjahre, in Kilometern eine eins mit 22 Nullen) und ausserdem fast leer (die mittlere Dichte liegt unter einem Atom pro Km^3) und «ungemütlich» kalt (-270 Grad Celsius). Die «astronomischen Zahlen» sind sprichwörtlich – und doch: unendlich gross werden sie nicht! Wenn die Astronomen immer weiter entfernte Objekte beobachten, so dringen sie damit auch immer tiefer in die Vergangenheit vor, denn das Licht braucht Zeit, um zu uns zu gelangen. Dieser extensive «Fortschritt» (im buchstäblichen Sinn) kommt dann zu einem Ende, wenn das älteste Objekt, wenn der Ursprung des Universums selbst, erreicht ist – und das ist, konzeptionell, längst der Fall. Das heutige Standard-Big Bang-Modell der Kosmologie beschreibt das Universum der gegenwärtigen Epoche als unendlichen, euklidischen Raum, der auf grosser Skala homogen mit Galaxien gefüllt ist – durchaus im Sinn einer *aktualen*

Unendlichkeit. Die *beobachtende* Astronomie hingegen stösst auf einen *Sichtbarkeitshorizont* – definiert durch die maximale Lichtlaufdistanz seit Beginn der Welt, seit dem Big Bang vor ca. 14 Milliarden Jahren –, der absolut, auch mit bester Technik, nicht hintergangen werden kann. Somit haben wir es höchstens mit einer potentiellen Unendlichkeit zu tun, während uns der «Schrecken» und die Widersprüchlichkeit einer aktuellen Unendlichkeit – einer Unendlichkeit nicht der geistigen, sondern der *materiellen, physischen Welt* – erspart bleibt.

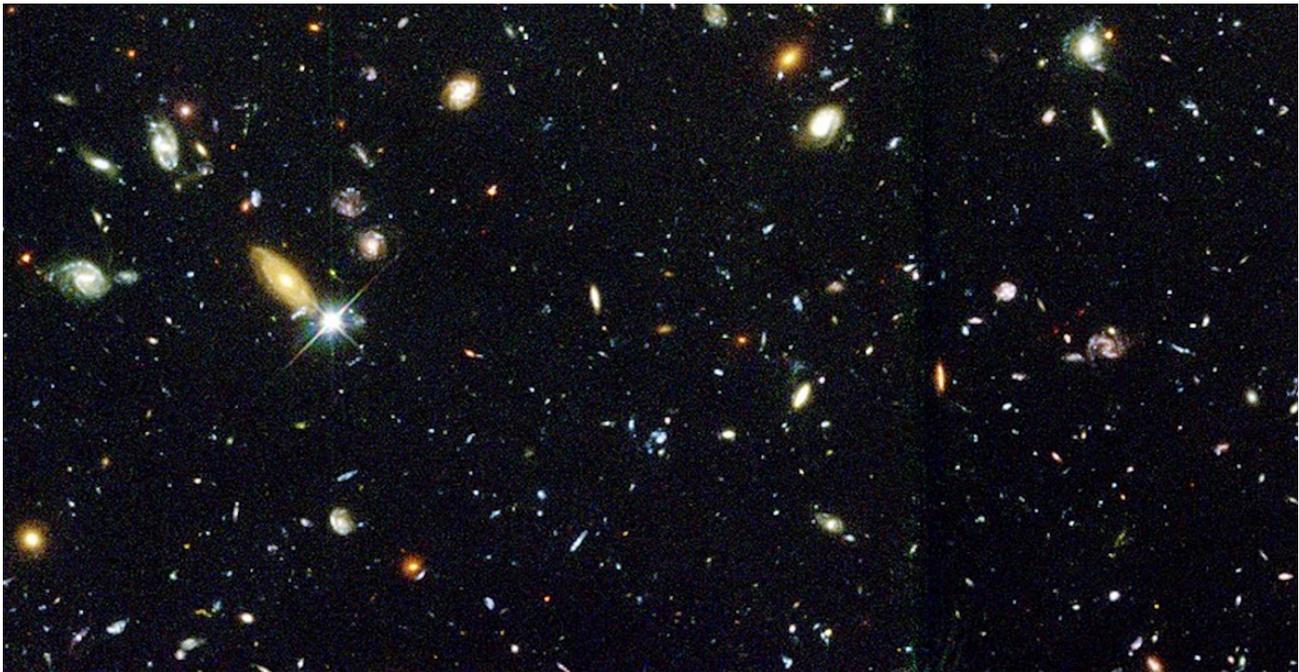


Abb. 1 Das *Hubble Deep Field* (Ausschnitt), ein winziges Stück Nachthimmel im Sternbild des Grossen Bären, das 1995 vom Hubble-Raumteleskop in einer rund einwöchigen Belichtung aufgenommen wurde. Der helle Stern links gehört zu unserer Milchstrasse, die restlichen Lichtflecken sind Galaxien in grosser Entfernung. Bild: NASA Space Telescope.

Das ist mehr als die seit jeher beruhigende Einsicht in die *praktische* Unmöglichkeit, in endlicher Zeit ein potentiell unendlich grosses Weltall zu erkunden. Wir *sind* bereits an eine Grenze gestossen, und es ist eine *Erkenntnisgrenze*, die eine fundamental andere Sichtweise des Universums impliziert, oder zumindest zulässt. Auch im Mikrokosmos gibt es mit der «Heisenbergschen Unschärferelation» eine Erkenntnisgrenze, einen «Vorhang», der uns vor dem unendlich Kleinen «schützt». Und hier, auf dem Gebiet der Quantenphysik, haben die weltanschaulichen Konsequenzen der grundlegenden Subjekt-Objekt-Verwobenheit im Lauf der Jahrzehnte bereits in unserer Kultur Eingang gefunden, wenn auch vorwiegend im Bereich der «Esoterik». Doch wenn es um die Welt im Grossen geht, den Kosmos, dann scheinen wir unbeirrt an der Vorstellung der Grenzenlosigkeit und Unendlichkeit des Raums festzuhalten. Das mag verschiedene Gründe haben. Tatsache ist, dass wir uns, in der Vorstellung, übergangslos vom Raum unserer Umwelt in den «Weltraum» hinauszoomen können; schliesslich sehen wir Sterne und Galaxien, sei es «unbewaffnet» oder auf Teleskopaufnahmen, «mit eigenen Augen», während dies von Atomen und Elementarteilchen nicht behauptet werden kann; die Welt des ganz Kleinen bleibt

für uns stets abstrakt. Möglicherweise ist dem modernen Menschen auch die «Verlorenheit» im vermeintlich unendlichen Kosmos, die zweifellos zu seiner existentiellen Befindlichkeit gehört, so sehr in Fleisch und Blut übergegangen, dass er sie fast zwanghaft aufrecht erhalten und weiter kultivieren muss. Seit rund einem Jahrhundert sind durch Relativitätstheorie und Quantenmechanik jedoch die Grundlagen für einen radikalen Wandel des Weltbilds, einen Bewusstseinswandel, gelegt. Dass ein solcher Umschwung nur sehr langsam vonstatten geht, kennen wir aus der Geschichte.

«Von der geschlossenen Welt zum unendlichen Universum» (A. Koyré)

Die Rede ist natürlich von der «Kopernikanischen Wende», die nach Kopernikus benannt, aber nicht von diesem vollzogen wurde, denn sie dauerte ungefähr 300 Jahre, von ca. 1400 bis 1700. Im Kern ist es eine Wende «von der geschlossenen Welt zum unendlichen Universum» – so der Titel des bis heute unübertroffenen Klassikers von Alexandre Koyré (1980, original englisch 1957). Der Uebergang vom geozentrischen zum heliozentrischen System war zwar entscheidend für die Herausbildung einer physikalischen Dynamik (über Galilei und Kepler zu Newton), in seinen weltanschaulichen Konsequenzen jedoch weniger wichtig als die Zerschlagung der Sphären, denn noch immer «geht» für uns die Sonne «auf» und «unter», obwohl wir wissen, dass dies bloss eine Folge der Erdrotation ist. Aber dass wir nicht in einer kugeligen Matrjoschka von Planetensphären stecken, gefangen (aber auch geborgen) in einer geschlossenen Welt, fernab der göttlichen Transzendenz, sondern befreit (aber auch verloren) irgendwo im grenzenlosen All – das macht eben das Existential des neuzeitlichen und noch modernen Menschen aus.

Die Meriten der Kopernikanischen Wende können die Astronomen nur beschränkt für sich in Anspruch nehmen. Es sind ganz verschiedene Faktoren, die zum Umbruch des Weltbilds geführt haben. Bereits die hochmittelalterliche Scholastik, und dann vor allem Nikolaus von Kues (Cusanus) mit seiner kühnen Schrift der «gelehrten Unwissenheit» (1440), führte zu einer nachhaltigen Zersetzung der aristotelischen Autorität. Die Entwicklung der italienischen Renaissancemalerei, die in der Erfindung der Linearperspektive gipfelte, wo «Fluchtlinien» ins Unendliche reichen, war ebenfalls wegberaubend. Und schliesslich gab es astronomische Probleme mit dem ptolemäischen System der Epizykel, die Nikolaus Kopernikus lösen wollte, indem er das heliozentrische Modell von Aristarch von Samos wiederauferstehen liess. Genaugenommen steht die Sonne bei Kopernikus nicht exakt im Zentrum des Planetensystems, noch kommt er ganz ohne das Hilfsmittel der Epizykel aus, und selbst die Genauigkeit der Planetenpositionen wird gegenüber Ptolemäus nicht besser, aber das kopernikanische System ist konzeptionell einfacher, und am Ende «physikalisch» korrekter.

Interessant – und lehrreich für unsere gegenwärtige Umbruchzeit – ist nun zu sehen, wie die Protagonisten dieser Entwicklung zögerten, die vollen Konsequenzen aus dem neuen Konzept zu ziehen. Die tägliche Himmelsumdrehung war nun zwar als Folge der täglichen Erdrotation erkannt, so dass es keine Existenzberechtigung mehr für irgendwelche Sphären gab. Trotzdem hielt Kopernikus an den Sphären fest, zumindest an der Fixsternsphäre. Erst bei Thomas Digges in

England erscheint 1576 ein Diagramm, in welchem die Sterne nicht mehr an eine Sphäre gebunden, sondern frei im Raum jenseits davon verteilt sind. Aber es ist auch bei Digges nicht ganz klar, ob es sich wirklich um Sterne handelt oder vielmehr Heilige, die dort schon immer ihren «Wohnsitz» hatten. Dann kam Giordano Bruno, der zweifellos von Digges wusste, nun aber, mit poetischer Leidenschaft, die klarste und radikalste Konsequenz aus dem Heliozentrismus zog und die Unendlichkeit und unendliche Belebtheit des Kosmos postulierte. Und auch hier ist Vorsicht geboten. Sein Universum war (vor Galilei und Newton) noch kein «physikalisches» Universum, sondern eines, das immer noch den ätherischen Goldglanz des göttlichen Empyreums trug, von dem uns nun keine Sphäre mehr trennte. Brunos Weltsicht ist deswegen reinster Pantheismus, der folgerichtig von der Kirche aufs heftigste bekämpft wurde.

Bruno hatte wenig oder keinen unmittelbaren Einfluss auf die weitere Entwicklung der Kosmologie, er war seiner Zeit zu weit voraus und wurde erst sehr spät, vor allem in der deutschen Romantik (insbesondere von Schelling), rezipiert. Aber wir sehen bei ihm in der Anlage ein grundlegendes Denkmuster, auf das man, bis heute, immer wieder stösst: der Verlust des transzendenten Himmels (jenseits der äussersten Sphäre) wird wettgemacht durch die Transzendentalisierung des unendlichen Weltraums, oder einfach des grenzenlosen, leeren Raums. Schon Newtons «absoluter Raum» muss in diesem Licht gesehen werden. Henry More, aus der Schule der «Cambridger Platonisten», hatte im späten 17. Jahrhundert, noch vor Newton, auf die vollkommene Parallelität zwischen den Attributen des Raums und den traditionellen Attributen Gottes hingewiesen, darunter, natürlich, die Unendlichkeit. Bruno hatte allerdings nicht nur den Raum vergöttlicht, sondern alle im Raum befindlichen Welten, von denen es, nach ihm, ebenfalls unendlich viele gab; nur ein unendlich ausgefüllter Raum schien ihm der göttlichen Allmacht angemessen. Vor dem 20. Jahrhundert bestand aber keinerlei Evidenz für die Existenz anderer «Welten» als Kandidaten für ein kosmisches Plenum. Zur Zeit Newtons kannte man bloss Sterne, die offensichtlich weit ausserhalb des Planetensystems liegen mussten (die erste zuverlässige Bestimmung einer Sterndistanz gelang erstaunlicherweise erst im Jahr 1838!). Freilich stieg die Zahl der Sterne, mit der Anwendung immer grösserer Teleskope, vor allem durch Wilhelm Herschel im 18. Jahrhundert, einen nach England ausgewanderten, deutschen Musiker, schnell ins Unermessliche an. Aber das Sternenmeer schien nicht grenzenlos und homogen zu sein; eher war (und ist) es so, dass sich die Sterne primär zu einer grossen Scheibe hin konzentrieren, einer Struktur, die man schon immer als nebliges Band der «Milchstrasse» wahrnehmen konnte. Noch 1920 (!) bestand das damals bekannte Universum aus diesem grossen Sternsystem (das sogenannte «Kapteyn-Universum»), in dessen «Bauch» wir, etwas abseits vom Zentrum, mit der Sonne lagen – und aussen herum: grenzenloser, unendlicher, leerer Raum. Mit anderen Worten: Der unendliche Raum mochte etwas Sakrales oder etwas Profanes sein – die *materielle* Welt der Sterne und Planeten blieb endlich.

Bald nach 1920 öffnet sich nun aber das Tor zu den Galaxien, und damit (vermeintlich) zur materiellen Unendlichkeit. Ueber die Existenz anderer Sternsysteme ausserhalb der Milchstrasse war vorher schon ausgiebig spekuliert worden (namentlich von Kant), jetzt aber war das eine Beobachtungstatsache. Edwin Hubble, der hauptsächliche Protagonist dieser Entwicklung, führte bald nach dem Durchbruch ins Reich der «extragalaktischen Nebel» (wie er sie nannte) erste

Galaxienzählungen durch und kam zum Schluss, dass diese Systeme, nunmehr erkannt als die fundamentalen Bausteine des Universums, auf grosser Skala (statistisch gemittelt) isotrop und homogen verteilt sein mussten; und es gab keinen Grund anzunehmen, dass sich das Meer der Galaxien nicht weiter bis Unendliche erstrecken sollte. Damit sind wir endlich beim heutigen Bild des Universums angelangt; bereichert durch allerhand exotische Objekte wie Quasare, Neutronensterne, Schwarze Löcher etc., von denen Hubble noch nichts wissen konnte. – Jetzt erst stellte sich ganz konkret ein Problem mit der materiellen Unendlichkeit, ein Problem, von dem man vorher schon wusste und das sich um eine fast beschämend banale Frage dreht, nämlich: Warum ist es nachts dunkel?

Olbers' Paradoxon: Warum ist es nachts dunkel?

Das Argument ist denkbar einfach. Nehmen wir an, der Raum sei euklidisch (also grenzenlos und unendlich) und im statistischen Mittel homogen gefüllt mit Objekten konstanter Leuchtkraft (konstantem Energieausstoss in Form von Strahlung), gleichgültig ob es sich um Sterne oder Galaxien handelt, und gleichgültig wie dicht die Objekte liegen. Was würden wir beobachten? Wie dunkel oder hell wäre der Himmel? Offensichtlich würden wir in einem beliebigen Gesichtsfeld wenige nahe, helle Objekte sehen, dafür mehr und immer weiter entfernte und deswegen immer schwächere Objekte (nochmals Abb. 1), und so müsste man sich das bis ins Unendliche denken. Brächten die vielen schwachen Objekte gleichviel Licht «auf die Waage» wie die wenigen hellen? Das hängt einerseits davon ab, wie die Lichtintensität, die wir von einem Objekt empfangen, mit dessen Entfernung abnimmt, und andererseits, wie die Anzahl Objekte in einem Gesichtsfeld («Raumwinkel») mit deren Entfernung zunimmt. Nun, nach dem «photometrischem Gesetz» verringert sich die von einem Objekt empfangene Lichtmenge mit dem Quadrat seiner Entfernung, während die Anzahl Objekte in einem Entfernungs- oder Helligkeitsintervall – wie die Fläche einer dünnen Kugelschale – mit dem Quadrat der Entfernung zunimmt. Die gesamte Lichtmenge, die wir aus einem gewissen Distanzintervall erhalten, ergibt sich dann aus der Multiplikation der Anzahl Objekte (proportional zur Distanz im Quadrat) mit ihrer Helligkeit (*umgekehrt* proportional zur Distanz im Quadrat). Da sieht man schon, was passiert: die Helligkeitsabnahme wird durch die Zunahme der Objekte genau kompensiert, d.h. wir empfangen aus jedem Entfernungsintervall die gleiche Lichtmenge. Die unendliche Summe einer konstanten Grösse muss aber divergieren, d.h. selbst unendlich gross werden. Mit andern Worten: der Nachthimmel müsste gleissend hell sein! Oder anders formuliert: In jeder Richtung, wohin man auch blickt, stiesse man entlang des Sehstrahls auf die Oberfläche eines (noch so weit entfernten) Sterns; der Himmel wäre lückenlos übersät mit Sonnen!

Der Widerspruch zwischen diesem elementar einfachen Weltmodell und der Beobachtungstatsache der nächtlichen Dunkelheit ist bekannt unter der Bezeichnung *Olbers' Paradoxon*, benannt nach dem deutschen Astronomen und Arzt Heinrich Wilhelm Olbers, der das Problem 1823 formulierte. Unabhängig von Olbers war das Paradoxon schon 80 Jahre zuvor vom adeligen Lausanner Astronomen Jean-Philippe Loys de Chéseaux beschrieben worden. Und letztlich

geht das Argument auf Johannes Kepler zurück, der die Unendlichkeit der Welt nicht nur aus metaphysischen, theologischen Gründen so leidenschaftlich bekämpfte, wie sie von Giordano Bruno befürwortet wurde, sondern 1610 in seiner Antwort auf Galileis Entdeckungen auch bereits ganz rationale Einwände gegen die Unendlichkeit vorbrachte, die denen der späteren Gelehrten gleichen.

Das Paradoxon bedeutet natürlich, dass eine oder mehrere Annahmen des Modells falsch sein müssen. Entweder ist das Universum (1.) räumlich euklidisch, aber nicht homogen mit materiellen Objekten (Gestirnen) ausgefüllt; oder (2.) homogen besetzt, aber räumlich nicht euklidisch und nicht unendlich gross. Ausserdem wäre es (3.) möglich, dass das Licht der fernen Quellen systematisch absorbiert wird. Und schliesslich sind wir *implizite* von einem statischen, unveränderlichen Universum ausgegangen, was (4.) ebenfalls falsch sein könnte.

Die erste Möglichkeit (also euklidischer Raum, aber inhomogen gefüllt) bedeutet in der einfachsten Form, dass das Sternenmeer, die Milchstrasse, irgendwo abbricht, und so sah es, wie oben bemerkt, zu Beginn des 20. Jahrhunderts auch aus. Aber es gibt eine subtilere Form der Inhomogenität, die darin besteht, dass das Universum zwar bis ins Unendliche mit Materie, mit Gestirnen ausgefüllt ist, aber eben in einer *hierarchischen* Ordnung, bei der die Objekte in einer selbstähnlichen Struktur ineinander verschachtelt sind – konkret: Sterne in Sternhaufen, Sternhaufen in Haufen von Sternhaufen, Haufen von Sternhaufen in Superhaufen, und so unendlich weiter. Das würde dazu führen, dass die mittlere Materiedichte, von jedem Punkt aus gemessen, mit der Entfernung abnimmt und somit die katastrophale Lichtdivergenz, d.h. das Olbers'sche Paradoxon, vermieden wird. Eine solche Theorie wurde 1908 vom schwedischen Astronomen Carl Ludwig Charlier ins Feld geführt und bis kurz vor Hubbles Entdeckung der Galaxien noch von Einstein diskutiert. Schon vor Charlier wurde ein durchgehend hierarchischer Weltaufbau, nicht nur im Grossen, sondern auch im Kleinen, durch den irischen Physiker und Schriftsteller Edmund Edward Fournier d'Albe äusserst populär. Aber die Theorie verlor nach Hubble rasch an Geltung und ging regelrecht vergessen, – nur um in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts neu aufzuerstehen. Den entscheidenden Schub dazu lieferte der polnisch-französisch-amerikanische Mathematiker Benoit Mandelbrot mit seiner «fraktalen Geometrie». Es entstand ein regelrechter *hype*; plötzlich schien so ziemlich alles eine fraktale Struktur zu besitzen, – natürlich auch das ganze Universum. Das war gar nicht so abwegig, denn zumindest die räumliche Verteilung der Galaxien, die man mit Hilfe der vom späteren Nobelpreisträger James Peebles in den 70er Jahren entwickelten «Korrelationsfunktion» untersuchte, zeigte über weite Bereiche eine deutliche Selbstähnlichkeit oder «Skalenfreiheit». Wo diese mit wachsender Dimension aufhören würde, und ob überhaupt, war lange nicht klar, denn die damals bekannten grössten Strukturen im Universum, flache Superhaufen von Galaxien von ca. 300 Millionen Lichtjahren Durchmesser, entsprachen auch gerade der «Vollständigkeitsgrenze» der dreidimensionalen Galaxienkarten. Erst in den 90er Jahren, dank technologischem Fortschritt, wurden die Galaxienkarten so «tief» und genügend vollständig, dass man das hierarchische Modell verwerfen konnte. Man sah (und sieht) nun deutlich auf diesen Karten, dass sich das netzartige Muster von Superhaufen endlos zu wiederholen scheint; die hierarchische Struktur reicht nicht bis ins Unendliche, sie bricht mit den Superhaufen ab; es gibt keine grösseren Strukturen als Superhaufen. Somit bleibt die Homogenität des Weltalls, gemittelt

über grosse Skalen, zusammen mit der Isotropie, unangefochten das wichtigste Fundament der ganzen Kosmologie. Dieses sogenannte «Kosmologisches Prinzip» bleibt zwar grundsätzlich eine Annahme, aber wir haben keinen Grund, leichtfertig davon abzurücken. Die *räumliche* Inhomogenität des Universums ist im Moment keine valable Lösung des Olbers'schen Paradoxons.

Olbers und Chéseaux hatten eine andere Erklärung für die Dunkelheit des Nachthimmels – historisch die allererste, auch wenn sie oben als 3. Möglichkeit gelistet wurde – : Zwischen den Sternen könnte ein absorbierendes Material liegen, welches das Licht ferner Sterne für den Beobachter genügend schwächen oder gar löschen würde. Tatsächlich enthält das interstellare Medium viel absorbierenden Staub, was allerdings erst Mitte des 20. Jahrhundert klar wurde. Staub bildet sich in den dünnen, kühlen Atmosphären von Riesensternen, während einer Spätphase der Sternentwicklung, welche auch die Sonne in ca. 7 Milliarden Jahren durchlaufen wird; von der Sternatmosphäre gelangt der Staub über einen «Sternwind» schliesslich in das umgebende Gas, – übrigens ein Prozess, dem wir unser Leben verdanken, denn Staubkörner sind das Ausgangsmaterial für die Planetenbildung. Aber die massgeblichen Bausteine des Universums sind ja die Galaxien, nicht die Sterne, und der Raum zwischen den Galaxien, der *intergalaktische* Raum, ist im Wesentlichen staubfrei. Alles dies war den beiden Gelehrten natürlich nicht bekannt. Und doch wurde ihr Argument schon sehr früh durch die Einsicht widerlegt, dass sich der Staub in einer unendlichen «Lichtflut» erhitzen und auflösen würde. So oder so fällt auch diese Erklärung der nächtlichen Dunkelheit aus.

Die eleganteste und «sicherste» Lösung des Olbers'schen Paradoxons wäre dann gegeben, wenn der Raum selbst, das kosmische Gefäss der Gestirne, endlich wäre. Dann wäre es ganz gleichgültig, ob die Gestirne homogen oder inhomogen verteilt sind, oder ob ihr Licht absorbiert wird. Das Ringen um die Möglichkeit eines «positiv gekrümmten», also endlichen, nicht-euklidischen Universums (Nummer 2 in der obigen Liste), anfänglich favorisiert, lange Zeit offen gelassen, schliesslich verworfen, macht einen Grossteil der Geschichte der Kosmologie des 20. Jahrhunderts aus.

«Cosmology: A search for two numbers» (A. Sandage) – Kampf um das «beste» Weltmodell

Eine nicht-euklidische Geometrie für Flächen wurde in den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts, unabhängig voneinander, von Carl Friedrich Gauss in Deutschland, Nikolai Lobatschewski in Russland und János Bolyai in Ungarn entwickelt. Nicht-euklidische, «gekrümmte» Flächen sind unserer Anschauung ohne Weiteres zugänglich. Man nehme einen Kinderballon oder Spielball zur Hand und zeichne auf diesem ein Dreieck ein, und sofort bemerkt man, dass die Summe der Winkel im «bauchigen» Dreieck grösser als 180° sein muss, – Charakteristikum einer «positiv» gekrümmten Fläche. «Sattelflächen» hingegen, wo die Dreieckssumme weniger als 180° beträgt, sind «negativ» gekrümmt, und ebene, «euklidische» Flächen haben die Krümmung null. Man beachte, dass nur eine positiv gekrümmte Fläche endlich sein kann; ein Spielball etwa hat eine Gesamtfläche von soundsovielen Quadratzentimeter; während die Fläche eines Sattels (nicht eines

konkreten Pferdesattels, sondern eines theoretischen Gebildes dieser Geometrie) oder einer Ebene (ebenfalls nicht als konkrete Tischfläche zu denken) unendlich gross wird. Unbegrenzt (ohne Rand, an den man stossen würde) sind sie alle, aber endlich ist nur die in sich geschlossene, positiv gekrümmte, ballonartige Fläche. Um die Mitte des 19. Jahrhunderts wurde das Konzept der Krümmung einer Fläche durch Bernhard Riemann, einen Schüler von Gauss, auf Räume beliebig grosser Dimensionen erweitert. Hier wird es schwieriger mit der Anschauung. Einen gekrümmten dreidimensionalen Raum können wir uns nicht wirklich vorstellen; der Raum unserer Anschauung ist euklidisch. Es blieb vorläufig auch bei einer rein mathematischen Angelegenheit, obwohl einige (wie Gauss) die Möglichkeit eines nicht-euklidischen Weltraums durchaus in Betracht zogen. Eine physikalische Anwendung des Konzepts der Raumkrümmung, und somit eine Verknüpfung mit der realen Welt, war der «Allgemeinen Relativitätstheorie» (der Gravitationstheorie) Albert Einsteins im neuen Jahrhundert vorbehalten.

Beim Versuch, Gravitationseffekte in seine 1905 formulierte, neuartige Bewegungstheorie («Spezielle Relativitätstheorie») einzubauen, welche auf der absoluten Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen «Inertialsystemen» (nicht beschleunigten Bezugssystemen) beruht, sah sich Einstein genötigt, den euklidischen Raum auf nicht-euklidische Räume auszuweiten. In seiner Gravitationstheorie, eingepackt in den berühmten «Einsteinschen Feldgleichungen» (1915), übernimmt die lokale Raumkrümmung im Prinzip die Rolle des lokalen Schwerfeldes. Schwere Massen «krümmen» den umgebenden Raum fast unmerklich in der Weise, dass andere Massen angezogen werden und sich entsprechend bewegen, ganz ohne «Schwerkraft». Die Frage war natürlich, ob es eine *globale* Raumkrümmung gäbe, die, falls positiv, ein endliches Universum zulassen würde. Noch vor der allgemeinen Lösung der Feldgleichungen für ein isotropes, homogenes Universum durch den russischen Mathematiker und Geophysiker Alexander Friedmann (1922) und den belgischen Jesuiten Georges Lemaître (1927), postulierte Einstein 1917 auf Grund seiner Gleichungen ein statisches, endliches Universum. Zu diesem Zweck führte er einen Extra-Term, den sogenannten Λ -Term ein (Lambda). Diese «kosmologische Konstante», wie sie später genannt wurde, sollte eine abstossende gravitationelle Wirkung entfalten, um die gewöhnliche, anziehende bzw. zusammenziehende Wirkung der Materie zu kompensieren und ein statisches Weltall zu ermöglichen. Ohne diese Kompensation würde die endliche, in sich gekrümmte Weltkugel zusammenschrumpfen wie ein Ballon, dem die Luft ausgeht. Die Lösung von Friedmann und Lemaître hingegen war (ohne Λ -Term) dynamisch und führte zu einem expandierenden oder kontrahierenden Universum. Das schien zu dieser Zeit unplausibel oder unvorstellbar. Erst als die Amerikaner Edwin Hubble und Milton Humason 1929, durch Rotverschiebungsmessungen am damals grössten Teleskop in Südkalifornien, für Galaxien eine lineare Korrelation zwischen Entfernung und «Fluchtbewegung» nachwiesen (die sogenannte «Hubble-Humason-Beziehung»), gewann die Idee eines dynamischen, konkret: expandierenden Universums rasch Anerkennung (Hubble selbst blieb allerdings skeptisch). Einstein soll später gegenüber dem russisch-amerikanischen Physiker George Gamow, einem weiteren «Patriarchen» der modernen Kosmologie, geäussert haben, die Einführung des Λ -Terms zwecks Konstruktion eines statischen Universums sei «die grösste Eselei seines Lebens» gewesen. (Ironischerweise hatte Einstein im Nachhinein keineswegs unrecht mit seiner «Eselei», denn das heutige Standard-Modell der

Kosmologie wird sogar dominiert durch den Λ -Term!) Und auch an der Endlichkeit des Universums mochte Einstein nicht mehr unbedingt festhalten, denn ihm wird auch das folgende Bonmot zugeschrieben (mit etwas unsicherer Quellenlage): «Zwei Dinge sind unendlich, das Universum und die menschliche Dummheit; aber beim Universum bin ich mir noch nicht ganz sicher.» In der Tat blieb dieser Fall (das Universum betreffend) bis gegen Ende des letzten Jahrhunderts, also weit über Einsteins Lebenszeit hinaus, unsicher.

Die Friedmann-Lemaître-Gleichungen, die aus den Einsteinschen Feldgleichungen für ein isotropes, homogenes Universum folgen, umfassen eine ganze Schar von «Weltmodellen». Jedes Weltmodell beschreibt die zeitliche Entwicklung der räumlichen Dimension des Universums. Ohne Λ -Term, der zunächst vernachlässigt wurde, gab es grundsätzlich zwei bzw. drei Möglichkeiten: (1.) ein räumlich «geschlossenes» (positiv gekrümmtes), *endliches* Universum (ähnlich dem Einsteinschen), das ebenfalls zeitlich beschränkt ist, insofern die Expansion irgendwann zu einem Halt kommt und in eine Kontraktion übergeht, (2.) ein räumlich «offenes» (2a: euklidisches, oder 2b: negativ gekrümmtes), *unendliches* Universum, das auch zeitlich ewig währt, indem die Expansion (2a) erst im Unendlichen zum Stillstand, oder (2b) selbst im Unendlichen nicht zum Stillstand kommt. Bei allen diesen Weltmodellen hat das Universum einen singulären Ursprung im «Urknall» (*Big Bang*). Welches dieser Weltmodelle der Realität am besten entspricht – dies war nun die Aufgabe der beobachtenden Astronomie, die damit, mangels technischer Möglichkeiten, zunächst gänzlich überfordert war.

Dazu kam noch ein alternatives, konkurrierendes Weltmodell zum Friedmann-Lemaître-Formalismus hinzu, das ganz ohne Anfangssingularität auskam: das sogenannte *Steady-state*-Modell der Kosmologie, das Ende der 40er Jahre von britischen Astrophysikern, namentlich Fred Hoyle, entwickelt wurde. Gemäss diesem Modell sollte sich das Universum in einer Art «Fließgleichgewicht» befinden, was die permanente Schöpfung von Materie aus dem Nichts zwischen den Galaxien erforderlich machte, um den Effekt der «Ausdünnung» durch die kosmische Expansion zu kompensieren. Das *Steady-state*-Modell war in den 50er Jahren äusserst populär, weil es mit seiner nicht nur räumlichen, sondern auch zeitlichen Homogenität (man sprach vom «perfekten kosmologischen Prinzip») unter ästhetischen Gesichtspunkten gegenüber dem «hässlichen» Urknall überlegen schien (tatsächlich war es Fred Hoyle selbst, der sich in einer BBC-Radiosendung mit dem Unwort *Big Bang* über seine Gegner lustig machte; das Schimpfwort mauserte sich danach zum *terminus technicus*). Schon Ende der 50er Jahre geriet das *Steady-state*-Modell jedoch in Schwierigkeiten, da weit entfernte (also auch weit in der Vergangenheit gesichtete) Objekte anders aussahen als nahe (heutige) Objekte derselben Klasse, was eindeutig auf eine kosmische Entwicklung hindeutete. Den Todesstoss für das Modell ohne Urknall und ohne Entwicklung erbrachte die Entdeckung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds durch die amerikanischen Radioastronomen Arno Penzias und Robert Wilson im Jahr 1963 – nach der Hubble-Humason-Beziehung die zweite Säule der beobachtenden Kosmologie, auf welcher das Standard-*Big Bang*-Modell ruht. Der kosmische Mikrowellenhintergrund ist ein Relikt aus der heissen, dichten Frühzeit des Universums, eine Art schwaches Nachglühen des Urknalls. Spätestens seit dieser Entdeckung sind die Friedmann-Lemaître-Modelle zur Beschreibung der kosmischen Raum-Zeit-Geometrie (wieder) weitgehend unangefochten.

Vor der Wiederauferstehung des Λ -Terms wurde die Schar dieser Weltmodelle lediglich durch zwei Parameter bestimmt: (1.) die Ausdehnungsrate des Universums, die sogenannte «Hubble-Konstante», und (2.) die Abweichung von der Linearität der Hubble-Humason-Beziehung bei grossen Entfernungen durch die gravitationelle Bremswirkung der Materie, der sogenannte «Bremsparameter». Waren diese zwei Parameter bestimmt, so war das «beste» Weltmodell gefunden, mithin die Frage nach der Endlichkeit oder Unendlichkeit des Weltalls entschieden. Deshalb die Ueberschrift dieses Abschnitts nach dem Titel eines berühmten Artikels des amerikanischen Astronomen Allan Sandage (1970): *Cosmology: A search for two numbers*.

Sandage war Schüler und Nachfolger von Hubble auf dem Gebiet der beobachtenden Kosmologie. Das 1949 in Betrieb genommene 5m-Spiegelteleskop auf *Palomar mountain*, bis in die 70er Jahre das weltgrösste Teleskop, war nicht zuletzt für diese Aufgabe, d.h. die Bestimmung der kosmologischen Parameter, gebaut worden, und Sandage war in seiner Benutzung die dominierende Figur für Jahrzehnte. Ich erzähle das deswegen so ausführlich, weil wir am ehemaligen Astronomischen Institut der Universität Basel zum Teil Mitarbeiter von Sandage und in dieses Programm involviert waren, in erster Linie natürlich Gustav Andreas Tammann, der nachmalige Direktor unseres Instituts, der von Anfang der 60er Jahre bis in die 90er Jahre hinein mit Sandage an der Bestimmung der Hubble-Konstante arbeitete. Sandage und Tammann fanden konsistent einen relativ niedrigen Wert für die Konstante, andere Gruppen fanden höhere Werte. Es entspann sich eine lange Auseinandersetzung zwischen Sandage-Tammann und «den andern»; wir fieberten mit. Der heute meist akzeptierte Wert liegt, wie sollte es anders sein, irgendwo in der Mitte.

War schon die Bestimmung der Ausdehnungsrate des Universums schwierig, so erwies sich die Festlegung des Bremsparameters als schier unmöglich. Sandage benutzte die hellsten Haufengalaxien als «Standardkerzen», um die Entwicklung der Raumgeometrie, d.h. den Bremseffekt der Materie zu bestimmen. Mit Hilfe des 5m-Teleskops gelang es ihm, bis in grösste Entfernungen vorzudringen; dadurch stiess er aber auch in die tiefste Vergangenheit vor, was eine komplizierte Korrektur der beobachteten Helligkeiten dieser Standardkerzen nötig machte, denn hellste Haufengalaxien unterliegen verschiedenen Entwicklungseffekten. Kleine Unsicherheiten in den Helligkeitskorrekturen brachten das «beste» (durch statistische Ausgleichsrechnung bestimmte) Weltmodell buchstäblich «ins schleudern».

Eine andere Möglichkeit, den Bremsparameter zu bestimmen, besteht prinzipiell in der Bestimmung der lokalen, mittleren Massendichte, denn es die Massendichte, welche gravitativ zur Abbremsung der kosmischen Expansion führt. Das scheint einfach genug zu sein. Die Astronomen bräuchten «bloss» in einem grossen Raumgebiet die Galaxien zu zählen und die resultierende Zahlendichte mit der mittleren Masse einer Galaxie zu gewichten. Leider hat sich herausgestellt, dass die gewöhnliche Materie, aus der die Galaxien, Sterne, Planeten und auch wir selber bestehen, lediglich ca. 20% der gesamten Materiedichte des Universums ausmacht – der grosse Rest ist unsichtbar und wird einfach als «dunkle Materie» bezeichnet. Das Problem der «dunklen Materie» besteht nun seit 1933 (!), als der schweizerisch-amerikanische Astronom Fritz Zwicky erstmals auf einen Widerspruch zwischen der Bewegung von Haufengalaxien und ihrer sichtbaren Masse stiess. Trotz grösster Forschungsanstrengungen ist bis heute nicht klar, um welche Materieform es sich bei

der «dunkeln Materie» handelt. Somit war (und ist) auch dieser Weg zur Bestimmung des Bremsparameters versperrt bzw. bleibt mit unbefriedigend grossen Ungenauigkeiten in den Galaxienmassen behaftet.

Während Jahrzehnten galt auf Grund all dieser Beobachtungsprobleme, und natürlich auch der divergierenden Resultate verschiedener Forschungsgruppen, das Universum abwechselnd mal «geschlossen» und endlich, mal «offen» und unendlich – ganz nach dem Spiel mit den Blumen, deren Blütenblätter reihum ausgezupft werden: sie liebt mich, sie liebt mich nicht, sie liebt mich etc. Allerdings ging die Tendenz mit den Jahren eindeutig in Richtung «offenes» (also unendliches) Weltmodell. Und andere Ungereimtheiten liessen immer mehr Theoretiker nach der Wiedereinführung des Λ -Terms in die Friedmann-Lemaître-Gleichungen rufen; was auch geschah. Nun war die Schar möglicher Weltmodelle viel grösser geworden, und die Kopplung zwischen räumlicher Struktur (positiv versus negativ gekrümmt) und zeitlichem Verhalten des Universums (Umkehr der Expansion versus ewige Expansion) weggefallen. Die Vielfalt der theoretischen Modelle schien zu explodieren, doch gleichzeitig wuchsen auch die Möglichkeiten der beobachtenden Astronomie, nicht nur durch den Bau immer grösserer Teleskope, am Boden und in Erdumlaufbahn, sondern vor allem durch die Entwicklung der digitalen Fotografie, die wir heutzutage mit aller Selbstverständlichkeit in unseren Handys benutzen, – die zu Beginn der 80er Jahre aber unerhört neu war und die analoge Fotografie (die Fotoplatten) dank weit überlegener Empfindlichkeit relativ schnell verdrängte.

Und nun hatte man mit den «Supernovae» auch eine neue, fast perfekte Standardkerze zur Verfügung, mit deren Hilfe die kosmische Raum-Zeit-Struktur «vermessen», konkret: der Bremsparameter endlich bestimmt werden konnte. Bei einer Supernova explodiert ein Stern am Ende seines Lebens und kann dabei so hell wie eine ganze Galaxie werden. Für eine bestimmte Klasse dieser Objekte stellte sich heraus, dass die Maximalhelligkeit des Lichtverlaufs mit recht grosser Genauigkeit konstant ist – eine ideale Eigenschaft, um als Standardkerze zu dienen. Die Idee, solche Supernovae zur kosmologischen Distanzbestimmung zu benutzen, geht auf Fritz Zwicky zurück. Keine komplizierten und dabei unsicheren Korrekturen wie bei den hellsten Haufengalaxien wären dabei notwendig. Gustav Tammann war ein Pionier in der Anwendung dieser Methode, und wir alle, seine damaligen Doktoranden und Mitarbeiter vom Basler Astronomischen Institut, waren in diesem Zusammenhang, zwischen 1984 und 1986, an Beobachtungen von Supernovae am *Las Campanas* Observatorium in Chile beteiligt. Andere führten später diese Arbeit weiter und, unter Benutzung des Hubble-Raumteleskops und anderer Grossteleskope, schliesslich zur Vollendung. Zwei grossen Forschungsgruppen, einer amerikanischen und einer europäischen (unter Mitwirkung von Bruno Leibundgut, einem ehemaligen Studenten Tammanns), gelang praktisch gleichzeitig, knapp vor der Jahrtausendwende, der grosse, später mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnete Durchbruch: die Bestimmung des Bremsparameters und damit des Weltmodells. Das Resultat jedoch war ganz unerwartet und schockierend – : der Bremsparameter erwies sich als *negativ*! Eine negative Bremsung bedeutet eine Beschleunigung – das Universum dehnt sich offenbar immer schneller aus! Und verantwortlich dafür ist die kosmologische Konstante Λ , diese abstossende Kraft, deren Energie, man nennt sie «Vakuumenergie» oder auch «dunkle Energie», diejenige Energie, welche in der Materie steckt, in der gegenwärtigen kosmischen Epoche deutlich

überwiegt (70% «dunkle Energie» versus 30% materielle Energie, davon das meiste «dunkle Materie»). Wie die «dunkle Materie» bleibt auch die «dunkle Energie» völlig rätselhaft in ihrer Natur und ist im Grunde nicht viel mehr als ein Platzhalter in den Gleichungen – eigentlich keine befriedigende Situation.

Und die Raumkrümmung? Sie ist null – *das Universum ist euklidisch!* Das gilt natürlich nur im Mittel auf grossen Skalen; lokal, in der Nähe von Massen, ist der Raum gekrümmt. Aber dennoch ist das Ende dieser langen Geschichte bemerkenswert, fast etwas enttäuschend. Da wurde während Jahrzehnten einem Laienpublikum in Vorträgen die faszinierende Möglichkeit eines in sich gekrümmten, ballonartigen Universums nahe gebracht (man fliegt mit einer Rakete immer geradeaus in den Weltraum und gelangt, «von hinten», wieder zum Ausgangspunkt zurück, etc.), und dann stellt sich am Ende heraus, das Universum ist – wie eh und je – euklidisch, in der zweidimensionalen Analogie «flach» wie ein Blatt Papier.

Bleibt damit auch das Olbers'sche Paradoxon ungelöst?

Die Lösung: ein neuer «Welthorizont»

Die Lösung des Paradoxons wurde schon in der Einleitung vorweggenommen, und sie ist natürlich schon lange bekannt und spätestens seit der Kanonisierung des Urknallmodells durch die Entdeckung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds vor nunmehr 60 Jahren allgemein anerkannt. Die Annahme einer ewigen Unveränderlichkeit des Weltalls war und ist falsch; dies hatten wir oben als 4. Lösungsmöglichkeit des Olbers'schen Paradoxons aufgelistet. Das Universum hat eine Geschichte, einen Ursprung; es mag räumlich homogen sein, aber es ist *zeitlich inhomogen*. Und über die Kopplung von Raum und Zeit, bedingt durch die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit, übersetzt sich die zeitliche Inhomogenität in eine räumliche Inhomogenität, wird die Endlichkeit des Weltalters zur Endlichkeit des *Weltraums*. Konkreter ausgedrückt: wenn die Welt ein bestimmtes Alter besitzt, so kann uns das Licht nur Kunde von Regionen bringen, die es während dieser Zeit durchheilen konnte. Dadurch entsteht ein Sichtbarkeitshorizont, ein neuer «Welthorizont», der uns vor der potentiell «unendlichen Lichtflut» schützt.

Dies allein erklärt die Dunkelheit des nächtlichen Himmels noch nicht ganz, es braucht einen zusätzlichen Faktor. Käme das Licht aus den prinzipiell sichtbaren Regionen nämlich *unverändert* bei uns an, so hätten wir Tag und Nacht einen intensiv strahlenden, orange-roten Himmel über uns. Nicht die Sterne oder Galaxien sind das Problem, sondern das «primordiale» Licht, das ca. 400'000 Jahre nach dem Urknall durch die Bildung erster Atome in alle Richtungen emittiert wurde. Nur dank der Expansion des Universums, die alles Licht «zerdehnt», gegen grössere Wellenlängen hin verschiebt (die sogenannte «Rotverschiebung»), verliert dieses intensive, damals im sichtbaren Bereich strahlende «Nachglühen» des Urknalls so viel Energie, dass es uns bloss noch in der Form eines ganz schwachen, unsichtbaren Mikrowellenhintergrunds erreicht – und der Nachthimmel dunkel bleibt. Die Lösung von Olbers und Chéseaux (Nummer 3): dass unterwegs etwas mit dem Licht passiert, war also gar nicht so falsch. Nur braucht es keinen absorbierenden Staub zur Schwächung des Lichts; die Ausdehnung des Alls besorgt das von allein. Beide Faktoren zur Lösung

des Olbers'schen Paradoxons, der Sichtbarkeitshorizont und die Rotverschiebung, wurzeln letztlich in derselben Tatsache eines *dynamischen* Universums. Da unser Interesse hier primär der Frage nach der Endlichkeit oder Unendlichkeit des Weltraums gilt, scheint mir der Sichtbarkeitshorizont, oder «Welthorizont», von grösserer weltanschaulicher (philosophischer) Bedeutung zu sein als die Schwächung des Lichts. Die Begrenzung der Sichtbarkeit, und daraus die Begrenzung der empirischen Erkenntnismöglichkeit in Bezug auf den Raum, ist so fundamental, dass ich das Argument nochmals «von vorn» entwickeln möchte.

Viele werden unter einem sternübersäten Nachthimmel schon einmal den faszinierenden Gedanken gehabt (oder gehört bekommen) haben, dass mancher Stern da oben vielleicht schon erloschen ist, während uns die Kunde davon noch nicht erreicht hat; noch nicht erreichen *konnte*; denn das Licht bewegt sich, mit rund 300'000 Km/s, zwar sehr schnell, aber nicht unendlich schnell. Alle Himmelsobjekte erscheinen uns prinzipiell so, wie sie in der Vergangenheit waren; wie sie jetzt gerade sind, können wir – jetzt – prinzipiell nicht wissen. Schon den Mond sehen wir nicht in seinem jetzigen Zustand, sondern mit rund einer Sekunde Verzögerung; er liegt eine «Lichtsekunde» von uns entfernt. Bei der Sonne sind es bereits 8 «Lichtminuten», bei den Planeten einige «Lichtstunden». Die nächsten Sterne sind bereits «Lichtjahre» entfernt, und entsprechend braucht ihr Licht Jahre, um zu uns zu gelangen. Ein Objekt in x Lichtjahren Distanz sehen wir so, wie es vor x Jahren war (bei nicht zu grossen, kosmologischen Distanzen); sein heutiger Zustand kommt für uns erst in weiteren x Jahren «ans Licht». Mit wachsender Entfernung wächst auch die «Rückschauzeit», und so wird die beobachtende Astronomie im Grunde zur Geschichtsforschung; wobei wir nicht unsere eigene Geschichte erforschen können, sondern nur die Geschichte anderer, entfernter Raumgebiete, die sich aber von unserer lokalen kosmischen Heimat nicht prinzipiell unterscheiden. Nahe Galaxien sind Millionen Lichtjahre entfernt; das Licht, das wir heute von ihnen empfangen, wurde losgesandt, als noch kein Mensch auf Erden wandelte. Man muss aber sehr weit in die raum-zeitliche Tiefe «bohren», um Effekte der *kosmischen* Entwicklung zu bemerken; nahe Galaxien gleichen noch unserer Milchstrasse. Bei einigen Milliarden Lichtjahren, d.h. Milliarden Jahren Rückschauzeit – zur Zeit, als die Sonne mit ihren Planeten entstand, oder noch davor – sehen (bzw. sahen!) die Galaxien deutlich anders aus; sie erscheinen kleiner, ungeordneter, intrinsisch heller und befinden (befanden) sich offenbar in einer frühen Entwicklungsphase. Solche Objekte findet man auf sehr tiefen Aufnahmen mit dem Raumteleskop (nochmals Abb. 1). Bei einer fortgesetzten «Tiefenbohrung» in den Nachthimmel würde man, bildlich gesprochen, irgendwann in eine Epoche gelangen, in der es noch keine Sterne oder Galaxien gab, nur unsichtbares Wasserstoffgas. Und bei einer Rückschauzeit von gegen 14 Milliarden Jahren würde man an die ebenfalls unsichtbare «Wand» des kosmischen Mikrowellenhintergrunds stossen, und kurz danach endlich an die Grenze der rückschaubaren Welt: das räumliche Abbild des singulären Weltbeginns.

Das Bild des Universums, das wir in dieser Weise erhalten – mit Betonung auf *Bild*, denn wir sprechen hier vom Standpunkt des reinen Beobachters – , stellt sich somit wie folgt dar (siehe Abb. 2, rechts): Alle Objekte, die wir in einer bestimmten Vergangenheit bzw. Rückschauzeit beobachten, liegen in derselben Entfernung, entsprechend der Distanz, die das Licht in dieser Zeit durchheilen konnte. Also befinden sich diese Objekte auf der (gedachten) Oberfläche einer Kugel; eine bestimmte kosmische Ära definiert eine Kugelfläche (Sphäre) mit einem bestimmten Radius (der

Lichtlaufdistanz). Das Ergebnis ist eine raum-zeitliche Abfolge von konzentrischen Sphären wachsender Grösse mit uns Beobachtern (wenn man will: der Erde) im Zentrum, dem «hier und jetzt», und mit dem (freilich bloss gedachten) «Bild» des Big Bangs als letzte, äusserste Sphäre, sozusagen als «Schlussstein» oder «Rand» der beobachtbaren «Weltkugel». Dort fällt die Rückschauzeit mit dem Weltalter von 14 Milliarden Jahren zusammen; weiter zurück bzw. hinaus geht es nicht.

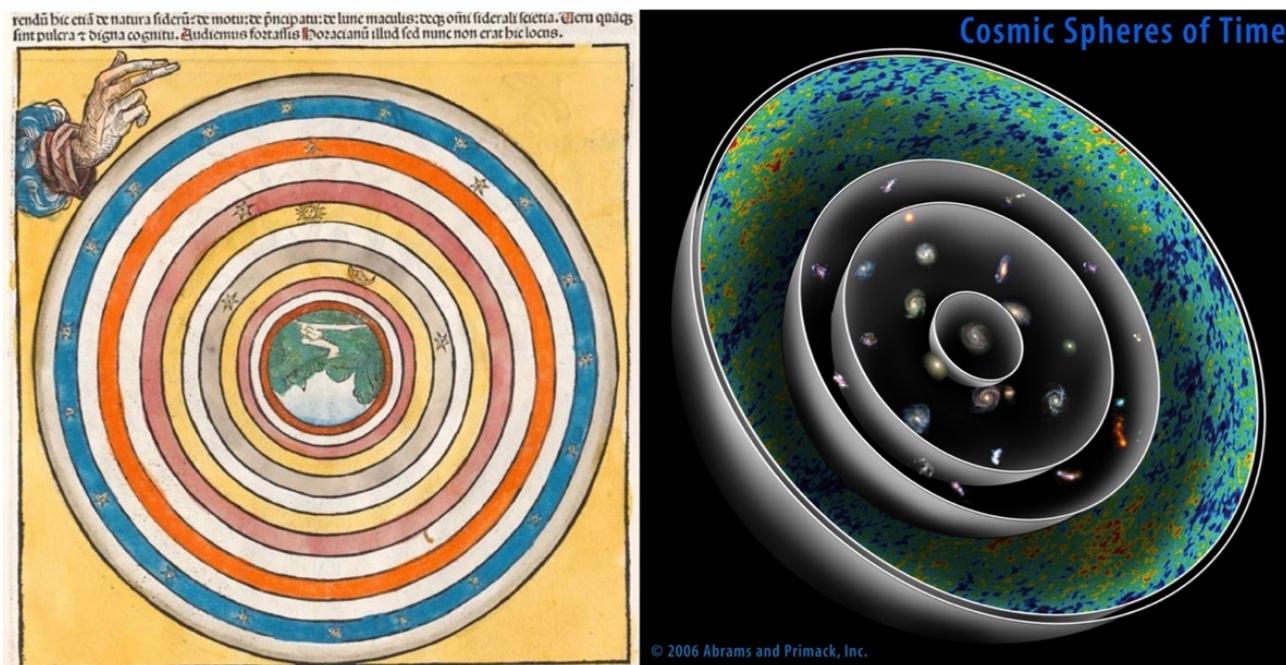


Abb. 2 Links: Schema des mittelalterlichen Weltgebäudes aus der Schedelschen Weltchronik (1493). Im Zentrum die Erde, konzentrisch umgeben von Planetensphären, vom Mond bis zum Saturn, abschliessend die Fixsternsphäre. Ausserhalb liegt der (goldgrundierte) göttliche Umraum, jenseits von Raum und Zeit. Rechts: Schema des Big Bang-Universums, vom Standpunkt des Beobachters aus gesehen. Im Zentrum der Beobachter (hier, «grosszügigerweis-e», die Milchstrasse), konzentrisch umgeben von (unsichtbaren) zeitlichen bzw. raum-zeitlichen Sphären, die jeweils einer bestimmten Rückschauzeit und, über die unvermeidliche Kopplung von Raum und Zeit, einer bestimmten kosmischen Entfernung entsprechen. Die Begrenzung der Kugel, der Rand, wird durch das (unsichtbare) Abbild des Big Bangs vor 14 Milliarden Jahren, der maximalen Rückschauzeit, markiert. Die fleckige «Innenwand» der Hohlkugel steht für den kosmischen Mikrowellenhintergrund. © Abrams und Primack, mit Erlaubnis.

Die ganze Entwicklungsgeschichte des Kosmos erscheint dem Beobachter geometrisch abgebildet auf den Inhalt einer Kugel, die das *gesamte beobachtete und prinzipiell beobachtbare Universum* umfasst. Mit «beobachtbar» ist nicht nur die Möglichkeit gemeint, elektromagnetische Strahlung (Photonen), und in Zukunft auch andere Teilchen oder Gravitationswellen zu empfangen, für welche die relativistische «Geschwindigkeitsbegrenzung» im Uebrigen genauso gilt (nichts kann sich schneller bewegen als Licht). Dem singulären physikalischen Zustand des Big Bangs (unendliche Dichte, unendliche Temperatur), verborgen hinter dem «Vorhang» des kosmischen Mikrowellenhintergrunds (die «fleckige» Innenwand der Hohlkugel in Abb. 2, rechts), kann man sich, unterstützt durch hochenergetische Experimente z.B. an den Teilchenbeschleunigern des CERN, ohnehin nur theoretisch weiter «annähern» (inzwischen bis zu einer Milliardstelsekunde

oder noch «näher»). Mit der «Sichtbarkeitsgrenze» oder der «prinzipiellen Beobachtbarkeit» ist im allgemeinsten Sinn die *Grenze der empirischen Zugangsmöglichkeit* gemeint. Das Universum mag unendlich gross sein (im potentiellen oder aktuellen Sinn) – und das Standard-Weltmodell geht, wie oben beschrieben, in der Tat von einem euklidischen, also unendlichen Raum aus – : *unser empirischer Zugang zum Weltall ist prinzipiell auf einen endlichen Ausschnitt beschränkt.*

Ich habe oben, zugegebenermassen suggestiv, von (unsichtbaren) konzentrischen «Sphären» und von einer neuen «Weltkugel» gesprochen. Auch wer sich nur oberflächlich mit der antik-mittelalterlichen, vorkopernikanischen Kosmologie auskennt, wird die *morphologische* Aehnlichkeit des Beobachter-zentrierten Big Bang-Universums zum zwiebelschalenförmigen Aufbau der Planeten- und Fixsternsphären (Abb. 2, links) ohne Schwierigkeiten wahrnehmen. Es ist, als ob die kugelige Matroschka zurückgekommen wäre! Die Analogie ist sehr weitreichend. Es ist nicht bloss die endliche, auf das «hier und jetzt» zentrierte Kugelgestalt, die wiederkehrt, sondern die durchgehend hierarchische Struktur im Innern. Bei der «modernen Weltkugel» ist sie automatisch durch den Zeitfluss gegeben, der von aussen nach innen, vom Big Bang zum «hier und jetzt» verläuft; wir haben es ja nicht mit räumlichen, vielmehr mit zeitlichen, oder besser: raum-zeitlichen «Sphären» zu tun. Im antik-mittelalterlichen Kosmos wurden die Sphären, kaskadenartig, von oben nach unten bewegt, aristotelisch im Sinn eines Getriebes, neuplatonisch über eine strahlenartige «Emanation», christlich in einer Kombination von beidem in Form der Engelwesen. Als erste Bewegungsursache figuriert bei Aristoteles der unbewegte Bewegter ausserhalb der Sphären, neuplatonisch ist es das Eine, im christlichen Bild der göttliche Schöpfer im Emyreum (angedeutet durch die Hand in Abb. 2, links). Die hierarchische Struktur gilt auch im umgekehrten Sinn, als Bewegung von unten nach oben, im alten Weltbild als «Himmelfahrt», als Rückkehr der Seele zum göttlichen Ursprung, im modernen Kosmos als Vorstoss der Astronomie und Teilchenphysik in immer weiter entfernte Gebiete des Raums und der Zeit, bis hin zum Big Bang, dem mythischen Schöpfungsakt in modernem Gewand. Weitere Parallelen finden sich im Detail beschrieben in meinem Buch «Primum Mobile – Dantes Jenseitsreise und die moderne Kosmologie» (2006).

Ins Mittelalter führt freilich kein Weg zurück; mein Vorschlag, man möge von der blossen *Vorstellung* eines unendlich grossen Universums, die dem modernen Menschen so lieb geworden ist, besser abrücken, ist starker Tobak genug. Kritische Fragen und Zweifel, von denen es eine ganze Reihe gibt, haben wir bisher weitgehend vermieden. Dies soll zum Schluss nachgeholt werden.

Diskussion und Schluss

Fragen gibt es solche quantitativer, wissenschaftlicher Natur, und solche qualitativer, philosophischer Natur. Im Folgenden führe ich die Diskussion in einem fiktiven Frage-Antwort-Spiel durch, wie es im Anschluss eines Vortrags stattfinden könnte. Fragen und Einwände erscheinen in kursiver Schrift, gefolgt von meinen Antworten (Antwortversuchen) in Normalschrift.

(1) *Die Distanzen im Universum der Galaxien sind so unfassbar riesig; Sie haben von Milliarden Lichtjahren gesprochen; – wie können Sie, gemessen daran, überhaupt einen Vergleich mit dem*

geradezu niedlichen antik-mittelalterlichen Sphärenkosmos wagen? Das heutige Universum ist doch «praktisch» unendlich gross.

Es ist richtig, in rein quantitativer Hinsicht ist ein solcher Vergleich völlig lächerlich. Der Radius des mittelalterlichen Kosmos, bemessen an der Entfernung der Fixsternsphäre, wurde von Ptolemäus mit 20'000 Erdradien angegeben, während die Distanz zum Big Bang-Welthorizont, auf die gegenwärtige kosmische Epoche bezogen, rund 46 Milliarden Lichtjahre beträgt (nicht 14 Milliarden Lichtjahre, wie man bei einem Weltalter von 14 Milliarden Jahren erwarten würde, sondern, bedingt durch die Expansion des Weltalls, ca. dreimal mehr). Der Unterschied ist ein Faktor von 10^{15} (eine Billiarde). Und trotzdem – entscheidend für unsere Anschauung, unser *Weltbild*, ist doch die Form, die Gestalt, nicht die Zahl; die Qualität, nicht die Quantität. Insofern spielt die Grösse der «Weltkugel» keine Rolle; sie war schon im Mittelalter unfassbar gross, – oder hätte man die 20'000 Erdradien etwa zu Fuss oder zu Pferd durchwandern können? – Zugegeben, das heutige Universum scheint «praktisch», oder «schier» unendlich gross. Aber man muss bedenken, dass sich eine solche Aussage immer auf den klassischen, newtonschen Raum bezieht, der wie der Raum unserer Lebensumwelt einfach «da liegt wie ein Teppich, den man betreten kann». Seit Einsteins Relativitätstheorie gilt das im strikten Sinn nicht mehr, wie hinlänglich besprochen, wegen der Kopplung von Raum und Zeit. Ueberspitzt gesagt, ist der Raum eine Illusion; es gibt nur noch Raum-Zeit, zumindest bei genügend grossen (raumzeitlichen) Distanzen. Zum (Welt-) Raum *in der Jetztzeit* haben wir ebenso wenig empirischen Zugang wie zum Raum-Zeit-Gebiet «jenseits» des Sichtbarkeitshorizonts.

Auf die Gefahr hin, als (Neu-) Geozentriker zu gelten, möchte ich das folgende hübsche Gedankenspiel nicht unerwähnt lassen. Ueberlegen wir uns, welche Distanz das Licht in der Zeitspanne zurücklegen kann, die der kleinsten noch wahrnehmbaren Zeitdifferenz entspricht. Im Optischen beträgt diese Zeitspanne ca. 0.025 Sekunden; mindestens so schnell müssen Bilder aufeinander folgen, um den Eindruck eines kontinuierlichen Bildflusses, eines Films zu erzeugen; Im Akustischen sind es nur ca. 0.003 Sekunden. Man multipliziere diese Zahlen mit der Lichtgeschwindigkeit und erhält 7'500 bzw. 1'000 Km. Diese Grössendimension definiert ein räumlich zusammenhängendes Gebiet der «Gleichzeitigkeit» und entspricht zufällig gerade etwa der Dimension der Erde (Radius ca. 6'000 Km). Also lässt sich sagen: alles irdische Geschehen ist für unsere (imaginierte) Wahrnehmung prinzipiell gleichzeitig («hier und jetzt»). Andererseits gilt für die *intrinsische* Empfindung der Gegenwartsdauer eine Zeitspanne von 3 Sekunden, in Lichtlaufdistanz ist das etwas grösser als der Durchmesser der Mondbahn. Uebrigens hatte der mittelalterliche Mensch ebenfalls keinen Zugang zur supralunaren Zone (jenseits der Mondbahn), denn die Welt der Sphären war die Domäne des ätherischen, fünften Elements, der *quinta essentia*. Aber Entschuldigung, ich wollte uns ja nicht ins Mittelalter katapultieren. . .

(2) *Eine eher technische Frage. Wenn ich richtig verstehe, ist die Sichtbarkeitsgrenze, der «Welthorizont», nicht statisch, sondern vergrössert sich kontinuierlich mit der Zeit, und zwar mit Lichtgeschwindigkeit. Bedeutet das nicht, dass irgendwann der ganze Kosmos in den Horizont hineingerät, so dass die Sichtbegrenzung nicht absolut, sondern nur temporär gilt?*

Der Sichtbarkeitshorizont ist tatsächlich nicht statisch, sondern wandert langsam nach aussen, übrigens in der gegenwärtigen Epoche mit der ca. dreifachen Lichtgeschwindigkeit; was wieder der

Ausdehnung des Alls seit der Zeit des Big Bangs geschuldet ist (im statischen Universum wär's die einfache Lichtgeschwindigkeit). Dieser «Teilchenhorizont» (so der Fachausdruck dafür) wird, um es nochmals zu verdeutlichen, definiert als maximale Distanz, die das Licht seit dem Big Bang zurücklegen konnte, d.h. am Horizont «sehen» wir (theoretisch) die Geburtstunde des Alls in einem bestimmten, kugelschalenförmigen Raumgebiet. In hundert Jahren werden wir den Big Bang ein bisschen weiter aussen, konkret ca. 300 Lichtjahre weiter aussen «sehen», usw. Es dauert also ganz schön lange, bis wir nur schon eine weitere Galaxie (bald nach dem Big Bang, im Geburtszustand) zu sehen bekommen; 300 Lichtjahre sind nichts. Aber theoretisch haben wir ja unendlich viel Zeit und Geduld. Bekommen wir irgendwann, «wenigstens» nach unendlich langer Zeit, *alles* zu sehen? Es sind zwar immer mehr Objekte, die in den Horizont hinein geraten, aber die «Neulinge» befinden sich immer erst im Geburtszustand, und bei wachsender Distanz bzw. fortwährender Expansion verliert ihr Licht durch die Rotverschiebung laufend Energie und wird immer schwächer. Was neu hinzukommt, wird also immer dunkler. Besonders beim heutigen Standard-Modell einer exponentiell beschleunigten Expansion geht dieser Wettlauf des Zuwachses an Objekten gegenüber der wachsenden Dunkelheit sehr rasch verloren.

Wenn man in die Zukunft blicken will, ist der sogenannte «Ereignishorizont» von grösserer Relevanz. Der Ereignishorizont umfasst dasjenige Raumgebiet, aus welchem das Licht, das *jetzt* ausgesandt wird, uns *jemals* (bis in alle Ewigkeit) erreichen kann. Unter der (falschen) Annahme, dass Galaxien ewig leuchten, ist der Ereignishorizont eines statischen oder auch «abgebremst» expandierenden Universums unendlich gross, d.h. wenn wir ewig warten, kriegen wir im Prinzip den ganzen unendlichen Raum zu sehen; im expandierenden Universum allerdings wiederum verbunden mit wachsender Dunkelheit. Im Fall der beschleunigten Expansion jedoch, dem heute favorisierten Λ -Universum, stellt sich die Situation der zukünftigen Sichtbarkeit viel dramatischer dar: der Ereignishorizont (gemessen in sogenannten «mitexpandierenden Koordinaten») schrumpft fortwährend; immer mehr Galaxien geraten aus dem Horizont, «überholen» durch ihre beschleunigte Bewegung das Licht, das nicht mehr zu uns gelangen kann. «Am Ende», sagen wir: in 100 Milliarden Jahren, bleiben nur die Milchstrasse und vielleicht ein paar Nachbargalaxien, mit denen wir gravitationell verbunden sind, in unserem «Gesichtskreis» übrig; sonst nur Leere und Dunkelheit; wobei dann Sonne und Erde ohnehin längst vergangen sein werden. Wenn also das Λ -Weltmodell stimmt, dann ist unsere temporäre Lage eher «aussichtsreich» statt beschränkt.

(3) *Ich bin etwas verwirrt, muss ich sagen. Viele Dinge in der Natur können wir nicht ohne Weiters sehen oder zur Gänze experimentell erforschen, und doch bezweifeln wir nicht ihre Existenz. Ihre Symbolik der irdischen Gleichzeitigkeit in Ehren – ; aber der Raum innerhalb des Sichtbarkeitshorizonts, der ist doch ganz real «da», auch wenn er durch die Raum-Zeit-Kopplung nur systematisch verzerrt (zeitlich verzögert) wahrgenommen werden kann. Und so ähnlich sollte das auch für die Unendlichkeit des Universums gelten, wenn schon das «beste» (an Beobachtungen geprüfte!) Weltmodell euklidisch, also unendlich ist. Und haben wir nicht doch einen empirischen Zugang mit den tiefen Galaxienkarten, die nach Ihrer Aussage zeigen, dass sich die grössten supergalaktischen Strukturen endlos zu wiederholen scheinen, in Uebereinstimmung mit dem «Kosmologischen Prinzip»? Das müsste uns doch zur Vorstellung berechtigen, dass das Universum*

tatsächlich unendlich gross ist, auch wenn wir nur einen kleinen Ausschnitt daraus beobachten können.

Das ist die Schlüsselfrage, und Sie schneiden damit ein zentrales Problem der ganzen Philosophie an: Was ist Realität? Die natürliche Haltung des «gesunden Menschenverstandes», sie entspricht – unausgesprochen – auch der philosophischen Grundannahme der Naturwissenschaft, anerkennt eine Aussenwelt, eine Welt «da draussen», die *unabhängig* von uns, vom Beobachter oder Experimentator, «real» existiert. Wir erforschen diese Aussenwelt, unsere körperliche Innenwelt natürlich eingeschlossen, und finden Gesetzmässigkeiten, die wir mit Hilfe der Mathematik – einer rein geistigen Disziplin! – zu «allgemein gültigen» Modellen und Theorien erweitern. Was ist nun wirklich, was ist wahr? Wenn wir hier Klarheit oder Gewissheit zu erreichen versuchen, geraten wir mit Lichtgeschwindigkeit in Teufels Küche bzw. in die verwirrende Begriffsschmiede der Philosophen. Der gute Kant steht auch schon vor der Tür, aber ich lasse ihn nicht herein, sondern gehe gleich zu Karl Popper, dem österreichisch-britischen Wissenschaftsphilosophen, dessen Falsifikationsprinzip uns Naturwissenschaftlern so lange Luft und Freiheit beim theoretisieren verschafft, bis uns der Blitzstrahl einer empirischen Falsifikation trifft. Theorien lassen sich prinzipiell nicht verifizieren, sondern bloss falsifizieren. Eine «gute» Theorie zeichnet sich nicht dadurch aus, dass sie möglichst lange gültig bleibt, sondern dass sie *überhaupt* falsifizierbar ist. Ein Beispiel einer (in diesem Sinn) schlechten Theorie ist die Theorie der «dunklen Materie». Seit Jahrzehnten wird fieberhaft nach irgendwelchen unbekanntem, d.h. ebenfalls postulierten, aber bisher nicht detektierten Elementarteilchen gesucht, welche die «unsichtbare» Masse der Galaxien erklären könnten – und man findet partout nichts! Der «Parameterraum» der möglichen Teilchenkandidaten wird dabei immer kleiner, die «Täter» verstecken sich offenbar in den exotischsten Ecken. Diese Suche entspricht dem (vergeblichen) Versuch einer Verifikation; aber zu falsifizieren gibt es erst recht nichts, solange man der postulierten «dunklen Materie» nicht «habhaft» wird.

Wie steht es nun mit der Falsifizierbarkeit der räumlichen Unendlichkeit? Eine rhetorische Frage – denn wir haben immer diese «Sichtbarkeitsgrenze» in endlicher Distanz, die uns den empirischen Zugang zum Gebiet jenseits davon *prinzipiell* verwehrt. Das «beste», im endlichen Bereich empirisch geprüfte Weltmodell ist euklidisch, erstreckt sich also ins Unendliche. Der menschliche Geist ist ihm sogar vorausgeeilt; seit Georg Cantor rechnet die Mathematik nicht nur mit potentiell, sondern auch *aktual* unendlich grossen Zahlen und Mengen [vergleiche den Beitrag von Hans-Christoph Im Hof in diesem Band]. Aber ob die *physische* Welt *aktual* unendlich gross ist – diese Erkenntnismöglichkeit bleibt uns, wegen der fehlenden Falsifizierbarkeit, prinzipiell verwehrt. Dasselbe gilt letztlich auch für entfernte Gebiete zur Jetztzeit. Nur kann man dort sagen: ich warte, bis die Kunde bei mir ankommt. Beim Mond, beispielsweise, mit einer Sekunde Verzögerung des «Existenznachweises», ist das nicht viel mehr als ein amüsanter Gedanke. Aber mit wachsender raum-zeitlicher Entfernung wird das Problem der Erkenntnisbeschränkung ernsthafter, und beim Horizont ist Schluss.

Man kann noch einen Schritt weiter gehen. Das Realitätsproblem wurde in der Quantenmechanik besonders akut und wird dort bis heute heiss debattiert. Ein Grundprinzip der Quantenphysik in der sogenannten «Kopenhagener Deutung» besagt, dass sich ein

quantenmechanisches System im Allgemeinen nicht in einem bestimmten Zustand, sondern in einer Ueberlagerung aller möglichen Zustände, einer Art «Schwebezustand», befindet und erst durch den Eingriff einer Beobachtung oder eines Messvorgangs in einen bestimmten Zustand «gedrückt» und dadurch real wird, einen Zustand, der vorher nur eine gewisse Wahrscheinlichkeit besass. Dies bringt eine Beobachterabhängigkeit der «Realität», eine Verkettung von Objekt und Subjekt mit sich, deren Grad und Bedeutung umstritten ist und im Extremfall natürlich zu einer idealistischen Philosophie führt. Niels Bohr, der dänische Uebervater der Quantenmechanik, sagte berühmterweise (paraphrasiert): «Physik erforscht nicht, was ist, sondern was wir erkennen können», womit er den *epistemologischen* Ansatz der Physik betonte. Einstein protestierte und sah die Wahrscheinlichkeitsbeschreibung der Quantenwelt als blosses Indiz für die Unvollständigkeit der Theorie; er vertrat den klassischen, *ontologischen* Ansatz der Physik. Es gibt in der Tat eine Reihe von Alternativen zur «Kopenhagener Deutung» der Quantenphysik, die von einem unbeobachtbaren (nicht-falsifizierbaren!) «deterministischen Untergrund» der «verschwommenen» Quantenwelt ausgehen, wie es Einstein vorschwebte; aber die Bohrsche Deutung ist, nach unzähligen, ausgeklügeltesten Experimenten, im Kern bis heute unangefochten geblieben.

Ursprung und Dreh- und Angelpunkt der Quantenphysik ist das Planck'sche Wirkungsquantum, diese fundamentale Naturkonstante, welche den Mikrokosmos für unsere verlängerten Sinnesorgane gleichsam «körnig» und «unscharf» macht, und uns auf diese Weise vom unendlich Kleinen abschirmt. Das unendlich Kleine ist ein Fall für die Mathematik; *physisch* besitzt es, epistemologisch, keine Realität. Denselben Status einer fundamentalen Naturkonstante, diesmal als Ausgangspunkt der Relativitätstheorie, finden wir in der Lichtgeschwindigkeit. Sie macht den Makrokosmos nicht körnig und unscharf, aber beschränkt unsere Erkenntnismöglichkeiten auf andere, einschneidende Weise, indem sie Raum und Zeit fest aneinander koppelt, was uns, im kosmischen Massstab, in eine relativ kleine Welt der Gleichzeitigkeit versetzt und vom unendlich Grossen abschirmt. Ich sehe nicht ein, warum wir die Realitätsdiskussion der Quantenphysik nicht auch auf den Kosmos, die Welt des ganz Grossen, übertragen können sollten, zumal im Big Bang, bei (theoretisch) unendlich grosser Dichte und Temperatur, Makrokosmos und Mikrokosmos miteinander verschmelzen. Unter diesem Gesichtspunkt dürfte man, epistemologisch, auch dem *unendlich Grossen*, dem physischen, nicht bloss mathematischen, kurz: der aktuellen Unendlichkeit des Weltalls, jegliche Realität absprechen.

(4) *Ihre ganze Argumentation steht und fällt mit der relativistischen «Geschwindigkeitsbegrenzung», wie Sie das nennen. Ich bin ja auch ein Befürworter der Geschwindigkeitsbegrenzung, auf der Strasse ... , – aber was ist, wenn ein neuer Einstein daherkommt und eine noch «verrücktere», jedoch genauere Theorie entwirft, bei der vielleicht die Lichtgeschwindigkeit überboten werden kann? Bisher wurde noch jede physikalische Theorie irgendwann durch eine «bessere» ersetzt. Und, da Sie schon die Quantenphysik ins Spiel gebracht haben, – ist das nicht eigentlich bereits der Fall? Ich meine, in der Quantenphysik gibt's doch das Phänomen der nicht-lokalen «Verschränktheit» (das entanglement), wo weit auseinanderliegende Teilchen auf nicht-kausale Weise voneinander wissen, – als ob sie instantan (also schneller als mit Lichtgeschwindigkeit) miteinander kommunizieren könnten. So weit ich weiss, ist das experimentell*

schon für viele Kilometer weit separierte Teilchen nachgewiesen, und eine obere Grenze ist nicht in Sicht. Möglicherweise ist das ganze Universum, über die Sichtbarkeitsgrenze hinaus, ein akausal zusammenhängendes Ganzes, eine nicht-separierbare Einheit; übrigens kein fremder Gedanke in der Philosophiegeschichte. Wenn wir da «andocken» könnten, hätten wir eben doch Zugang zur Unendlichkeit!

Das ist eine gute Frage, die mich auch umgetrieben hat und noch immer umtreibt. Aber zu Ihrer ersten Bemerkung. Grundsätzlich müssen wir in der Tat damit rechnen, dass irgendwann einmal auch die Einstein'sche Relativitätstheorie widerlegt bzw. durch eine bessere Theorie ersetzt wird. Das ist zwar im Moment schwer vorstellbar, denn seit hundert Jahren hat die Einstein'sche Theorie noch jeder Kritik und jedem experimentellen Test standgehalten. Und ob bei einer neuen Theorie die «Geschwindigkeitsbeschränkung» wegfällt? Ausgeschlossen ist nichts. Gerade das Verhältnis zur Quantenmechanik ist nicht befriedigend geklärt, denn die Relativitätstheorie ist eine «klassische» (deterministische) Theorie. Das Phänomen der «Verschränktheit», wo separierte Teilchen überlichtschnell miteinander zu kommunizieren scheinen, steht allerdings (noch) nicht im Widerspruch zur Relativitätstheorie; schliesslich handelt es sich um *akausale* Zusammenhänge von Quantenzuständen, bzw. um *einen* zusammenhängenden Quantenzustand in einem bestimmten räumlichen Gebiet, deswegen der Begriff der «Nicht-Lokalität». Diese Nicht-Lokalität eines Zustands scheint auf den ersten Blick gerade auf einen «deterministischen Untergrund» hinzudeuten, wie er von alternativen Deutungen der Quantenphysik postuliert wurde. Neuere Experimente unterstützen diese Sicht der Dinge jedoch nicht, sondern vertiefen bloss, wenn ich das richtig verstehe, den rätselhaften Aspekt der «Nicht-Realität» der Aussenwelt, d.h. die Beobachterabhängigkeit des nicht-lokalen Zustands. Die «Verschränktheit» führt somit zu einer Ausweitung der quantenmechanischen Unbestimmtheit vom Mikrokosmos in den Makrokosmos. Wie weit das gehen kann, ist unklar. Wenn es die kosmische («verschränkte») All-Einheit im Unendlichen gibt, ein Gedanke, mit dem ich ebenfalls sympathisiere, dann ermöglicht uns die experimentelle Quantenphysik noch keinen Zugang zur Unendlichkeit, denn unsere Beobachtungen bleiben notgedrungen im Endlichen stecken; weiter als bis zum Welthorizont wird man Teilchenseparationen nicht betreiben können. Ich glaube, ein «Andocken» an die aktuelle Unendlichkeit ist nur im geistigen Bereich möglich. Zum Preis von logischen Widersprüchen gelingt dies bereits in der Mathematik. Aber auch jenseits des logischen Denkens scheint ein – nicht bloss intellektueller, sondern Existenz erschütternder – «Kurzschluss» mit der (göttlichen) Unendlichkeit durch meditative Techniken, in «mystischer» Versenkung, in besonderen Bewusstseinszuständen, erfahrbar zu sein; dies bezeugen jedenfalls viele Berichte aus allen Zeiten und Kulturen. Offenbar kann die aktuelle Unendlichkeit kein Gegenstand der Naturwissenschaften sein.

(5) Sie haben immer wieder die weltanschaulichen bzw. philosophischen Konsequenzen der kosmischen Sichtbarkeitsgrenze betont und dabei ganz offen mit der damit verbundenen, vermeintlichen Rückkehr zu einem endlichen oder begrenzten Universum sympathisiert. Ich verstehe nicht, was daran so positiv sein soll. Der Durchbruch ins Unendliche durch Giordano Bruno und seine Nachfolger war doch der grosse Befreiungsschlag, der uns den Weg aus der Unmündigkeit in die Aufklärung gewiesen hat. In meinen Augen gibt es kein edleres Symbol für die menschliche Freiheit

als die Grenzenlosigkeit des Alls. Wollen Sie uns, überspitzt formuliert, wieder ins Gefängnis eines kugeligen Kosmos einsperren?

Keine Sorge, der Weltraum wird für uns ja nicht kleiner; der gestirnte, grenzenlose Himmel über uns bleibt ohnehin derselbe. Und der «kugelige Kosmos» der Alten war auch kein Kerker, sondern ein bis in die letzte «Ecke» fein geflochtenes Sinngewebe, worin sich die Menschen mehr aufgehoben als gefangen fühlten. Verknüpft miteinander waren nicht Raum und Zeit, sondern – man denke an Himmel oben und Hölle unten – Raum und Moral. Ich möchte nicht das hohe Lied auf diese Zeit singen, aber den «Befreiungsschlag» brauchte es nicht in erster Linie, um die engelbewegten Sphären zu zertrümmern, sondern die überwältigende Ordnungsmacht der katholischen Kirche. Darin gebührt Giordano Bruno und seinen Nachfolgern freilich unsere grösste Bewunderung. Alles hat jedoch zwei Seiten. Das «unendliche Nichts», das der Zerschlagung der Weltkugel in der Neuzeit folgte, wurde und wird von sensiblen Menschen sehr wohl wahrgenommen. Eines der poetischsten Zeugnisse der (exaltierten) Verzweiflung über die Sinnentleerung und Orientierungslosigkeit der neuzeitlichen Welt findet sich in Nietzsches «Fröhlicher Wissenschaft» (drittes Buch, Nr. 125): «...Wohin ist Gott? rief er [der «tolle Mensch»], ich will es euch sagen! Wir haben ihn getötet, – ihr und ich! Wir alle sind seine Mörder! Aber wie haben wir dies gemacht? Wie vermochten wir das Meer auszutrinken? Wer gab uns den Schwamm, um den ganzen Horizont wegzuwischen?....» – Eine sehr passende Metapher, dieser «weggewischte Horizont», – und vielleicht mehr als eine Metapher.

Und machen wir denn von der gewonnenen Freiheit auch wirklich Gebrauch? Die Erhebung und Aufbereitung wissenschaftlicher Fakten ist das eine, die Gestaltung eines Weltbilds das andere. Erstaunlicherweise herrscht selbst unter Wissenschaftlern die irrige Meinung, aus den Fakten würde «von alleine» folgen, wie und was die Welt ist – und wie sie sein soll. Dabei unterliegt diesem Prozess vom einen zum andern stets eine bestimmte, meist unausgesprochene Ideologie. Ein «Weltbild», und untrennbar von ihm das «Menschenbild», ist ein gesamtkulturelles, sozialpsychologisches Konstrukt, und nicht einfach das Resultat naturwissenschaftlicher Forschung. Natürlich sollte ein «vernünftiges», «aufgeklärtes» Weltbild den wissenschaftlichen Fakten nicht widersprechen. Aber die beiden sind nicht eins; es bleibt uns viel Freiheit in der Gestaltung des Weltbilds. «Aufklärung» mit «rationaler Wissenschaft» zu verwechseln, führt zu Szientismus und Technokratie, am Ende zu Transhumanismus. Wir sind zwar frei, uns eine rein materielle, geist- und gottlose Welt *vorzustellen*, oder – näher an unserem Thema – einen Kosmos, einen Welt-Raum, der die blosser Verlängerung unseres Umgebungsraums, in welchem wir uns frei bewegen können, bis ins Unendliche darstellt. Das widerspricht nicht den naturwissenschaftlichen Fakten – *aber es folgt auch nicht aus den Fakten!* Im Gegenteil, die neueren Theorien der Physik «suggerieren» eine andere Wirklichkeit, bzw. geben uns die *Wahl*, die rational-wissenschaftlichen Fakten, unsere Beobachtungen und Experimente, in eine andere, «menschenwürdigere» und «menschengerechtere» Weltsicht zu integrieren. Dazu gehört für mich ganz primär die Anerkennung von Grenzen – Grenzen zwischen Immanenz und Transzendenz – , auf welche die Physik mit dem Planck'schen Wirkungsquantum in der Welt des ganz Kleinen, und mit der Lichtgeschwindigkeit in der Welt des ganz Grossen gestossen ist.

Grenzen haben etwas mit dem Immunsystem zu tun. Diesen Begriff brachte der deutsche Philosoph Peter Sloterdijk ins Spiel. In seiner brillianten Sphären-Trilogie, geschrieben um die Jahrtausendwende, interpretiert Sloterdijk die Geschichte des Abendlands morphologisch als «Aufstieg und Fall» der Kugelidee. Ausgehend vom Urerlebnis der Geborgenheit im Uterus, soll sich der Mensch in der äusseren Welt, gleichsam ersatzweise, nach und nach immer grössere Schutzhüllen erbaut und erdacht haben, von der Stadtmauer bis hin zur grösstmöglichen, die ganze Welt umfassenden, göttlich behüteten Fixsternsphäre. Dieses «metaphysische Immunsystem» brach in der frühen Neuzeit zusammen; der unendliche Raum kann nicht mehr beseelt werden, der Mensch ist der Leere und Sinnlosigkeit schutzlos ausgeliefert; Sloterdijk spricht salopp von einer «durch Aufklärung erworbenen metaphysischen Immunschwäche». – Das ist eine klare Diagnose. Und wie lautet die Therapie? Bräuchten wir nicht ein neues «metaphysisches Immunsystem»? Und könnten wir ein solches, mit Hilfe der modernen Physik und Kosmologie, entlang der hier skizzierten Ideen, nicht wieder errichten – , damit es – *bildlich, symbolisch* – seine psychologische Schutzwirkung von neuem entfaltet? –

Es wäre grundsätzlich möglich. Aber wissenschaftliche Erkenntnis allein genügt nicht; es braucht die Fähigkeit zur *Imagination*. – Sloterdijk jedoch analysiert nüchtern, zynisch: «Es ist beinahe zu einem Kriterium der Naivität geworden, sich noch mit existentiell Pathos für kosmologische Fragen zu interessieren. [...] Es ist zu spät, uns an einen Platz unter himmlischen Schalen zurückzuträumen, in deren Innern häusliche Ordnungsgefühle gestattet wären. Die Geborgenheit im grössten Kreis ist für die Wissenden zerstört, und mit ihm der alte wohnliche, immunisierende Kosmos.» (aus «Sphären I, Blasen», Einleitung) – Man kann sich fragen, wer diese «Wissenden» sein sollen. Sind es nicht eher Gläubige; «Wissenschaftsgläubige»? Aber gut – , das ist wohl die bittere Wahrheit; so sieht man das heute. Auch wenn ein Konsens darüber herrscht, oder zu herrschen scheint, dass wir eine ganz andere Beziehung zur Natur, zum Kosmos entwickeln müssten, um unsere geistigen Ideale zu verwirklichen und unsere Verantwortung gegenüber der Schöpfung wahrzunehmen; ein «integrales», ein zwar mit der Wissenschaft verträgliches, aber nicht bloss rationales Welt- und Menschenbild, das uns nicht (wieder) von oben diktiert wird, sondern in voller Bewusstheit aus innerer Freiheit entsteht und sich verbreitet; – so gilt derjenige, der solches ernsthaft, unter Einbeziehung wissenschaftlicher Resultate versucht, bei Intellektuellen als naiv und steht schnell unter Esoterikverdacht. Es ist erlaubt, aber hat keine Bedeutung. Das ist die «Postmoderne». Wurde in der Moderne die «Entfremdung» des Menschen kultiviert und eine bessere Welt wenigstens erträumt, so scheint die «Postmoderne» bloss noch Beliebigkeit und Konsumismus zu beinhalten. Die heutige Lebenswelt gleicht auch nicht mehr einer Sphäre, wie Sloterdijk schön beschreibt, sondern einem aus vielen Bläschen bestehenden Schaumgebilde. Vom Traum zum Schaum, gewissermassen. Man hat keine Lust mehr auf grosse Erzählungen, keine Lust mehr auf Geschichte, keine Lust mehr auf Metaphysik. Man muss befürchten, dass uns diese geistige Lähmung schutzlos jenen Mächten ausliefert, die den Transhumanismus erbarmungslos vorwärts treiben und uns ihr eigenes, krankhaftes, zerstörerisches Weltbild überstülpen wollen.

Das – fiktive – Schlusswort gehört Albert Einstein. In Anspielung an sein früheres Bonmot höre ich ihn launig sagen: «Ja, wir sollten die Unendlichkeit wohl besser dem lieben Gott zurückgeben – wo sie auch hingehört. Ich spreche vom Universum; mit der menschlichen Dummheit müssen wir selber zurechtkommen.»

* * *