Erwin Sedlmayr

Das Licht der Astronomen

Eine Reflexion

Für Eva, sie weiß warum.

Das Leuchten aus der Vergangenheit

> *Selig sind die Zeiten, für die der Sternenhimmel die Landkarte der gangbaren und zu gehenden Wege ist und deren Wege das Licht der Sterne erhellt. Alles ist neu für sie und dennoch vertraut, abenteuerlich und dennoch Besitz. Die Welt ist weit und doch wie das eigene Haus, denn das Feuer, das in der Seele brennt, ist von derselben Wesensart wie die Sterne; sie scheiden sich scharf, die Welt und das Ich, das Licht und das Feuer, und werden doch niemals einander für immer fremd; denn Feuer ist die Seele eines jeden Lichts und in Licht kleidet sich ein jedes Feuer. So wird alles Tun der Seele sinnvoll und rund in dieser Zweiheit: vollendet in dem Sinn und vollendet für die Sinne; rund, weil die Seele in sich ruht während des Handelns; rund, weil ihre Tat sich von ihr ablöst und selbstgeworden einen eigenen Mittelpunkt findet und einen geschlossenen Umkreis um sich zieht. „Philosophie ist eigentlich Heimweh", sagt Novalis, „der Trieb, überall zu Hause zu sein". Deshalb ist Philosophie als Lebensform immer ein Symptom des Risses zwischen Innen und Außen, ein Zeichen der Wesensverschiedenheit von Ich und Welt, der Inkongruenz von Seele und Tat. Deshalb haben die seligen Zeiten keine Philosophie, oder, was dasselbe besagt, alle Menschen dieser Zeiten sind Philosophen, Inhaber des utopischen Zieles jeder Philosophie. Denn, was ist die Aufgabe der wahren Philosophie, wenn nicht das Aufzeichnen jener urbildlichen Landkarte; was ist das Problem des transzendentalen Ortes, wenn nicht die Bestimmung des Zugeordnetseins jeder aus dem tiefsten Innern quellenden Regung zu einer ihr unbekannten, ihr aber von Ewigkeit her zugemessenen, sie in erlösender Symbolik einhüllenden Form?* [1]

Dieses von Georg Lukács in seiner *Theorie des Romans* beschriebene Bild einer innigen Wesensbeziehung des Menschen zum Sternenhimmel, der ihn von den frühesten Kindheitstagen an umgibt und dessen Anblick ihn sein ganzes Leben hindurch — vertraut oder rätselhaft — begleitet, ist so alt wie die Menschheit selbst. Durch alle Zeitalter war und ist das Bedürfnis der Menschen, die Gesetzmäßigkeiten und die Gesetze des Universums und seiner Objekte zu erforschen, d.h. *Astronomie* zu treiben, ein zeitloses menschliches Anliegen, um die Welt zu verstehen und in ihr seinen Standpunkt zu finden. Darum hat Astronomie zu allen Zeiten eine besondere Bedeutung für die geistige und kulturelle Entwicklung der Menschheit gehabt. Alle Hochkulturen widmeten der Astronomie ein großes Potential an geistigen und wirtschaftlichen Kräften und betrachteten sie als Spiegel ihres kulturellen Entwicklungsstandes [2].

Unser Jahrhundert begreift das Universum und seine Strukturen als Objekte moderner Naturforschung. Astronomie mit ihren Methoden und Denkweisen ist in diesem Kontext eine tragende Säule des heutigen naturwissenschaftlichen Weltbildes, mit einem durch ihren Gegenstand und den Weg ihrer Geschichte geprägten erkennbar eigenständigen Charakter.

Die Anfänge dieses Weges liegen im Dunkel der Vergangenheit und scheinen nur herüber im Sagenlicht magischer Stätten, wie Stonehenge und die Pyramiden. So ist auch Astronomie im eigentlichen eine Sache der Dunkelheit, des Nachthimmels, dessen Anblick den Menschen von jeher in Ehrfurcht und Einsamkeit auf sich selbst verwiesen hat. In dieser Stimmung der Selbstbesinnung mag der Mensch begonnen haben, sein Bild vom Kosmos zu entwerfen, indem er die Erscheinungen des Universums seiner jeweiligen Sicht gemäß geordnet und mit den ihm eigenen Bildern einzufangen und damit zu bannen versucht hat [3].

Diese Bilder waren verständlicherweise — man denke nur an die *Schöpfungsgeschichten* der unterschiedlichsten Kulturen — häufig theologischer oder mythologischer Art und haben mehr die Natur von dunklen Metaphern, durchwoben von Fabeln und Königsgeschichten, die wenn schon nicht die Wahrheit, so doch eine unbestreitbare Schönheit auf ihrer Seite haben. So attraktiv diese Vorstellungen auch sind, künden sie jedoch weniger von einer ernsthaften Erklärung des Naturgeschehens, sondern sprechen mehr von der Hilflosigkeit des damaligen Menschen dem Kosmos gegenüber, dem er sich ausgeliefert und von dem er sich beherrscht fühlte[1].

Die strenge Ordnung, die den Lauf der Himmelskörper bestimmt, die Möglichkeit, die Ereignisse am Firmament auf lange Zeit vorauszusagen und damit die praktische Fähigkeit eines geordneten Zeitrechnungs- und Kalenderwesens [3], haben im Menschen zugleich mit dem Vertrauen in die Kraft seines eigenen Denkens eine mystische Bewunderung für die kosmischen Vorgänge erweckt. Wenngleich ihm die Natur der Sterne und die Ursache ihrer Bewegungen geheimnisvoll und rätselhaft war, oder gerade deswegen, fühlte er sich einbezogen in diese überirdischen Zusammenhänge; denn wenn Stunden und Jahreszeiten, Tag und Nacht vom Lauf der Himmelskörper abhingen, lag der Gedanke nicht fern, auch historische und schicksalhafte Ereignisse — wie Geburt und Tod, Glück und Unglück — mit ihnen zu verbinden. Diese naive Extrapolation ist letzlich die Wurzel der *Astrologie*, die sich bis heute jener atavistischen mythologischen Elemente bedient.

Es blieb den Griechen vorbehalten, mit all diesen Fabeln aufzuräumen und die Grunderkenntnisse über die Beschreibung des Himmels auf eine nachvollziehbare, dem menschli-

[1]Siehe dazu den Beitrag von Karsten Karstens in diesem Band.

chen Verstand zugängliche rationale Basis zu stellen. Die grundsätzliche Einsicht, daß eine ernsthafte Erklärung des Naturgeschehens nicht im Übernatürlichen und in der Mythologie, sondern durch Anwendung von auf der Erde abgeleiteten geometrischen und mathematischen Gesetzen zu suchen sei, hat man mit Recht als die *griechische Revolution* in der Wissenschaft bezeichnet. Sie markiert den Übergang von der *Sternkunde* der frühen Hochkulturen zur *wissenschaftlichen Astronomie* im heutigen Sinne. Hier wurden die geistigen Grundlagen gelegt, welche es nach einem langen Weg ermöglichten, 2000 Jahre später die Gesetze der Planetenbewegung und somit eine gesicherte Jahreslänge abzuleiten [3, 4, 5].

Meilensteine auf diesem Weg waren z. B. die Julianische (nach Julius Cäsar, 46 v. Christus) und die Gregorianische Kalenderreform (1582), und dann, als Höhepunkt die entscheidenden 150 Jahre am Beginn der Neuzeit, von Nikolaus Copernicus, Tycho Brahe, Johannes Kepler zu Galileo Galilei und Isaac Newton, welche die *astronomische Beschreibung*, die *physikalische Begründung* und die *mathematische Ableitung* der wahren Natur der Planetenbahnen durch die drei *Keplerschen Gesetze* leisteten [4, 5]:

- Die Planeten bewegen sich in Ellipsen um die Sonne, in deren einem Brennpunkt die Sonne ist.
- Die Verbindungslinie Planet–Sonne überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.
- Die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen ihrer großen Bahnhalbachsen.

Die Aufklärung der Gesetze der Planetenbewegung war der erste große Sieg der Physik bei der Beschreibung kosmischer Vorgänge. In der hierbei vollzogenen Verknüpfung von physikalischen Erkenntnissen und astronomischen Beobachtungen wurde die methodische Grundlage gelegt, welche es heute erlaubt, nicht nur die Natur der Himmelskörper und ihre gegenseitigen Beziehungen mit physikalischen Methoden zu beschreiben, sondern auch das *Universum als Ganzes* als ein physikalisches Objekt aufzufassen, dessen großräumiger Aufbau und dessen Geschichte und Evolution mit den von Menschen hier auf der Erde entwickelten physikalischen Theorien und Begriffssystemen modellhaft verstanden und nachvollzogen werden können.

Diese grandiose Ausweitung des physikalischen Zugriffs aus der Begrenztheit unseres irdischen Erfahrungsbereiches in die unvorstellbaren Weiten des Kosmos ist nur möglich, weil alle Systeme im Kosmos Naturgesetzen unterliegen, welche auf einer sehr fundamentalen Ebene allgemeingültig sind. Carl Friedrich von Weizsäcker nennt diese wunderbare Tatsache *die Einheit der Natur* [6].

Der lichterfüllte Kosmos

Newtons Idee der Gravitation als einer raumdurchdringenden von Gestirn zu Gestirn greifenden Kraft schließt die Teile des Weltalls zusammen und macht so das Weltgebäude zu einem zusammenhängenden Ganzen. Diese Einsicht, deren vollendete Formulierung erst in der zweiten Dekade unseres Jahrhunderts in der von Albert Einstein 1916 veröffentlichten *allgemeinen Relativitätstheorie* geleistet wurde [7], ist eine unabdingbare Voraussetzung, um das *Universum als Ganzes* als ein wissenschaftliches Objekt begreifen und damit *Kosmologie* als ein im physikalischen Kontext sinnvolles Unterfangen treiben zu können.

Der Grundgedanke der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie ist die *Geometrisierung der Gravitation*, d.h. Gravitationsfelder durch die geometrischen Eigenschaften der vierdimensionalen Raumzeit[2] auszudrücken und diese mit den physikalischen Eigenschaften der in diesem Raum befindlichen Körper oder Energiefelder in dem Sinne symmetrisch zu verknüpfen, daß einerseits die lokale Krümmung der Raumzeit die Bewegungsgesetze der Materie und anderseits die Lage der Massen die lokale Krümmung der Raumzeit eindeutig festlegt. In dieser hier zum Ausdruck kommenden wesenhaften Bedingtheit von Raumzeitstruktur und Materieerfüllung liegt der Schlüssel, um aus der beobachteten großräumigen Materie- und Feldverteilung mittels eines Generalisierungspostulats die globale Raumzeitstruktur des Universums und ihre zeitliche Entwicklung modellhaft zu berechnen [8, 9].

Das für diesen Schritt notwendige Generalisierungspostulat ist das *kosmologische Prinzip*. Damit bezeichnet man die fundamentale Annahme, daß die Materie- und die Feldverteilung im Universum zu jedem Zeitpunkt (über hinreichend große Volumina gemittelt) homogen und isotrop ist, d.h. daß *im Großen gesehen* das Universum keine ausgezeichneten Orte oder Richtungen besitzt und demzufolge an allen Orten zu gleichen Zeiten gleich aussieht oder anders ausgedrückt, daß jeder Ort im Universum die gleiche Geschichte durchläuft.

Die Annahme des kosmologischen Prinzips beruht auf der Extrapolation von drei fundamentalen Beobachtungstatsachen, welche über den großräumigen Aufbau der Welt und ihre Dynamik Aufschluß geben [8, 9]:

- Die Beobachtungen weisen darauf hin, daß (über hinreichend große Volumina gemittelt) die Massendichte im Universum zu gleichen Zeiten überall gleich ist.
- Die Spektrallinien entfernter Galaxien, Galaxienhaufen und Quasare zeigen eine zu ihrem Abstand proportionale *Rotverschiebung*, die als *Doppler–Effekt*, verursacht durch die radiale Bewegung dieser Systeme, gedeutet wird. In dieser von Edwin Hubble entdeckten Fluchtbewegung der Galaxien manifestiert sich unmittelbar die fortschreitende Ausdehnung des dreidimensionalen Ortsraumes, d.h. die globale Expansion des Universums.
- Das gesamte Weltall ist erfüllt von einer homogen und isotrop verteilten Radiostrahlung (*3K–Hintergrund–Strahlung*), deren heutige Temperatur und Verteilung nur durch eine homogene und isotrope Expansion des Universums erklärt werden können.

Die extrapolative Annahme, daß diese in dem durch die heutigen Beobachtungsmöglichkeiten zugänglichen Ausschnitt des Universums gefundenen Eigenschaften nicht nur hier, sondern überall im Weltall gelten sollen, führt in seiner globalen Konsequenz direkt zur obigen Formulierung des kosmologischen Prinzips. Das kosmologische Prinzip, als Grundpostulat der globalen Beschreibung der Welt, bedeutet demnach nicht nur die maximal mögliche Ausweitung des Gültigkeitsbereichs der Naturgesetze, sondern es negiert insbesondere auch die Existenz eines jeden kosmisch ausgezeichneten Standortes der menschlichen Beobachter. Dies ist der hohe Preis, der gezahlt werden muß, damit im Kontext der

[2]bestehend aus dem dreidimensionalen Ortsraum und der eindimensionalen Zeit

heutigen Physik die Frage nach der globalen Struktur des Universums und seiner Geschichte sinnvoll formuliert und beantwortet werden kann.

Die aus diesen Überlegungen resultierende astrophysikalische Antwort sind die sogenannten *Weltmodelle*, in deren Rahmen sowohl die raumzeitliche Entfaltung des Universums als auch die Entstehung und Evolution der kosmischen Materie konsistent beschrieben werden. Der Plural *Weltmodelle* bedeutet hier nicht, daß die Entwicklung unseres Universums auf jeweils unterschiedliche Weise theoretisch verstanden werden kann, sondern drückt aus, daß wir wegen unserer beschränkten Beobachtungsmöglichkeiten heute noch nicht zweifelsfrei festlegen können, welche der prinzipiell mit der Theorie zu vereinbarenden Lösungen tatsächlich realisiert ist. Ohne auf diese Problematik, die ursächlich mit der noch nicht hinreichend genauen Kenntnis der tatsächlichen mittleren Massendichte im Universum zusammenhängt, näher einzugehen, möchte ich auf zwei wichtige Eigenschaften hinweisen, welche den hier infrage kommenden Weltmodellen gemeinsam sind [5, 8, 9]:

- Alle Weltmodelle entwickeln sich mit der Zeit, d.h. ein statisches, ewig unveränderliches Universum ist sowohl mit den zugrunde liegenden Annahmen, als auch mit den Beobachtungen unvereinbar.
- Alle Weltmodelle zeigen einen wohldefinierten zeitlichen Anfangspunkt, von welchem die Entfaltung der uns vertrauten vierdimensionalen Raumzeit explosionsartig ihren Ausgang nahm. Dieser singuläre Anfangszustand, für den noch keine befriedigende Beschreibung im Rahmen der heutigen Physik möglich ist, weil er außerhalb des Gültigkeitsbereichs unserer verfügbaren Theorien liegt, wird nach George Gamow plastisch mit dem Begriff *Urknall* bezeichnet. Um diese prinzipielle Schwierigkeit auszugrenzen, beginnen deshalb alle physikalischen Beschreibungen der Weltmodelle erst ab einem endlichen, wenn auch extrem kurzen Zeitintervall (10^{-43} Sekunden) nach der Anfangssingularität[3]. Die Anfangsbedingungen für das Universum sind von uns aus gesehen dort so zu wählen, daß die beim Urknall initiierte Entwicklung der Welt, gemäß den Naturgesetzen, über die beobachteten Frühphasen und Zwischenstufen, die lokalen und globalen Strukturen unseres heutigen Kosmos hervorbringt [9, 10, 11].

Historisch gesehen ist das Kosmologische Prinzip das letzte Glied einer Reihe von Weltpostulaten, die vom *anthropozentrischen Standpunkt* der mythenhaften Weltbilder der alten Kulturen über die *geozentrische Auffassung* der griechischen Astronomie und des Mittelalters zur *heliozentrischen Weltsicht* bei Copernicus und Kepler führten, um schließlich in unserem Jahrhundert, welches den gesamten Kosmos als *physikalisches System* begreift, den adäquaten Ausdruck zu finden.

Die mit den einzelnen Stufen dieser Entwicklung verbundenen Vorstellungen vom Aufbau des Universums sind eingebettet in den philosophischen, theologischen und politischen Kontext ihrer Zeit und spiegeln somit in gewisser Weise auch deren Weltauffassung und Weltordnung wider. Aus diesem Grund bedeutet der jeweilige Übergang zu einer neuen Stufe der Weltsicht nicht nur einen wissenschaftlichen Fortschritt, sondern markiert auch

[3] siehe dazu die Diskussion in S. W. Hawking [11]

unübersehbare Unzulänglichkeiten und Widersprüche des herrschenden Weltbildes, welche einen *Paradigmenwechsel* und das Aufzeichnen einer neuen Landkarte erzwingen.

Das fehlende Licht oder die Dunkelheit des Nachthimmels

Lassen Sie mich diese Problematik beispielhaft an einer jedem vertrauten einfachen astronomischen Beobachtung aufzeigen. Diese besteht in der Feststellung,

- daß der Tag hell und
- daß die Nacht dunkel ist.

Die ebenso einfache Erklärung für dieses Phänomen liegt in der Tatsache, daß am Tag die Sonne scheint und in der Nacht nicht. Während die Frage „Warum ist der Taghimmel hell?“ einleuchtend und wissenschaftlich unanfechtbar durch den Schein der Sonne beantwortet ist, hat die Antwort auf die komplementäre Frage „Warum ist der Nachthimmel dunkel?“ vom Ausgang des Mittelalters bis in die zwanziger Jahre unseres Jahrhunderts großes wissenschaftliches und philosophisches Interesse geweckt und bei den führenden Autoritäten ihrer Zeit vereinzelt auch scharfe Polemiken und Kontroversen hervorgerufen. Die Ursache für diesen Disput liegt im offensichtlichen Unvermögen, die Dunkelheit des Nachthimmels im Rahmen des im 16. Jahrhundert heraufdämmernden Weltbildes eines ewigen, unendlich ausgedehnten sternerfüllten Universums zu erklären [12].

Die am Beginn der Neuzeit nicht mehr abzuweisenden Lehren von Nikolaus Cusanus, Thomas Digges, William Gilbert (siehe [12]) und insbesondere von Giordano Bruno [13] verfestigten die Vorstellung, daß der Kosmos nicht mehr wie von Aristoteles gelehrt als ein enges Gefäß, begrenzt von einer kristallenen Fixsternsphäre, eingebettet in ein allumgebendes himmliches Feuer aufgefaßt werden kann, sondern daß es im Gegenteil keinerlei logische und insbesondere theologische Gründe gibt, irgendwelche räumlichen Beschränkungen für das als ewig gedachte Universum und die darin enthaltenen Sterne anzunehmen. Die Wurzeln dieser Ideen reichen einerseits tief in den Boden der antiken pythagoräischen und stoischen Weltvorstellung eines unendlich ausgedehnten unermeßlichen Raumes, in welchem die Erde und das sie umgebende Sternsystem inselgleich schwimmen, andererseits in die abstrakten Ebenen der scholastischen Gottesinterpretation, nach welcher dessen Sein und Allmacht keinen räumlichen und zeitlichen Grenzen unterworfen sein könne. Isaac Newton gab diesen Vorstellungen hundert Jahre später den adäquaten wissenschaftlischen Ausdruck, indem er die grundlegenden Existenzformen der realen Welt — *Raum* und *Zeit* — in seiner Principia so definierte [14]:

- *Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand stets gleich und unbeweglich.*
- *Die absolute wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgend einen äußeren Gegenstand. Sie wird mit dem Namen Dauer belegt.*

Raum und Zeit existieren also in Newtons Vorstellung als absolute Entitäten unabhängig voneinander und unbeeinflußt von den physikalischen Körpern, Feldern und Vorgängen. Der Raum ist dreidimensional, unendlich ausgedehnt, homogen und isotrop.

Die Zeit ist eindimensional, unendlich ausgedehnt und verrinnt gleichförmig, unbeeinflußbar, ohne Anfang und Ende.

In diesem so gedachten ewigen, unendlich ausgedehnten, gleichförmig von ewigen Sternen erfüllten Universum tritt folgendes fundamentale Problem auf, daß jede Sichtlinie von der Erde (oder von jeder anderen Stelle des Weltalls) unweigerlich irgendwo auf eine Sternoberfläche treffen muß, ähnlich der Situation inmitten eines großen Waldes, wo jede Sichtlinie stets an einem Baum endet.

Dies ist die unausweichliche Konsequenz einer astronomischen Überlegung, die schon fast hundert Jahre früher Johannes Kepler in einer Replik gegen Galilei angestellt hat und die deutlich seine Vorbehalte gegen ein derartiges Weltbild zum Ausdruck bringt[4] [15]:

> *Du stehst nicht an zu verkünden, daß es über 10 000 sichtbare Sterne gibt. Je zahlreicher sie sind und je angehäufter, desto stärker wird mein Argument gegen die Unendlichkeit des Alls, wie ich schon in meinem Buch De Stella Nova dargelegt habe.*

Er machte dann die folgende bemerkenswerte Rechnung auf [15]:

> *Angenommen wir nehmen nur 1000 Fixsterne, keiner größer als eine Bogenminute (obwohl die Mehrzahl in den Katalogen größer ist). Wenn alle diese Sterne zu einer einzigen runden Scheibe zusammengebracht würden, wäre deren Durchmesser gleich (oder sogar größer) als der der Sonne. Wenn die kleinen Scheibchen von 10 000 Sternen zu einer einzigen großen Scheibe zusammengesetzt würden, um wieviel mehr würde deren sichtbare Größe jene der Sonne übertreffen? Wenn das wahr ist, und wenn dies auch Sonnen von derselben Art unserer Sonne sind, warum übertrifft dann die Gesamtheit dieser Sonne nicht unsere Sonne an Glanz? Warum schicken sie alle zusammen nur ein schwaches Licht auch zu den zugänglichsten Orten?*

Da nach den Gesetzen der Lichtausbreitung die *pro Raumwinkel empfangene Strahlungsintensität* unabhängig von der Entfernung ist, müßte demzufolge in jeder Richtung für uns der Himmel so hell erscheinen wie die Sternoberfläche, auf welche die Sichtlinie trifft, was offenkundig im Gegensatz zur alltäglichen Beobachtung steht. Man bezeichnet diesen, der Newtonschen Kosmologie und allen daraus entwickelten Modifikationen, welche die Weltvorstellung noch bis in das zwanzigste Jahrhundert hinein beherrschten, inhärenten Widerspruch nach dem Bremer Arzt und Astronomen Wilhelm Olbers (1758-1840), der als erster das oben angeführte Sichtlinienargument quantitativ formulierte, als *Olbersches Paradoxon*[5] [12].

Unzählige Anstrengungen, abwegige und erfolgversprechende, wurden in den vergangenen Jahrhunderten unternommen, um einen Ausweg aus diesem Dilemma zu finden. Ohne hier auf weniger hilfreiche Vorschläge, wie den von Paracelsus *Die Dunkelheit wird durch schwarze Sterne hervorgerufen*, näher einzugehen, konzentrierte sich die Diskussion

[4] übersetzt aus dem Englischen vom Autor

[5] Diese Benennung ist historisch nicht unumstritten, da schon etwa hundert Jahre früher der Schweizer Astronom Jean-Philippe Loys de Chéseaux (1718-1751) ähnliche Überlegungen angestellt hat.

besonders auf die Art und Weise der räumlichen Sternverteilung, um durch spezielle Anordnungen das Problem zu beheben. So postulierte z.B. Newton eine nadelförmige Aufreihung der Sterne und Edward Fournier d'Albe einen *Sternenstern*, welche zwar prinzipiell das Rätsel lösen würden, aber mit den Beobachtungen kollidieren [12].

Fruchtbarer und näher an der Realität waren die Ideen von Thomas Wright und insbesondere darauf aufbauend von Immanuel Kant [16], welcher sich die Sterne als in Weltinseln organisiert dachte. Diese noch sehr spekulativen Vorstellungen, die im 18. und 19. Jahrhundert, hier sind vor allem die Untersuchungen von Friedrich Wilhelm Herschel [2, 5] zu nennen, konkretere Gestalt annahmen, führten in der Folge mit den sich schnell entwickelnden Beobachtungsmöglichkeiten (größere Teleskope) und -techniken (z.B. Himmelsphotographie) zum heutigen Bild der hierarchischen kosmischen Materieorganisation, nach welcher Sterne in Sternsystemen, Sternsysteme in Galaxien und Galaxien in Galaxienhaufen organisiert sind [5].

Aber auch diese Erkenntnis einer übergeordneten Struktur erlaubt keine Auflösung des Olberschen Paradoxons im Rahmen der Newtonschen Kosmologie eines unbegrenzten sternerfüllten Raumes, da auch hier jede Sichtlinie schließlich stets an einer Galaxie endet und damit der Himmel in dieser Richtung so hell wie dieses Objekt sein müßte.

Im vorigen Jahrhundert schien die Lage ausweglos, da die Erfolge der Newtonschen Physik — insbesondere der Mechanik und Himmelsmechanik — in ihrem überwältigenden Siegeszug die Überzeugung von der grundsätzlichen Richtigkeit dieser Theorien und ihrer zugrunde liegenden Raum–Zeit–Vorstellung gefestigt hatten und bessere und größere Teleskope den Rand des sichtbaren Universums in immer weitere, unvorstellbare Entfernungen schoben, mit dem Ergebnis, daß kein natürliches Ende für die Ausbreitung der Galaxien und Nebelsysteme zu erkennen war.

Aber warum tat sich dann in fast allen Richtungen dieser *bodenlose unermessene Abgrund an Finsternis* [17] auf,

> ...
> *des Urabgrunds geheimnisvolle Sicht;*
> *ein dunkler Ozean sich endlos dehnt*
> *ohne Begrenzung und Dimension,*
> *wo Länge, Breite, Höhe, Zeit und Ort*
> *verloren sind, und wo die alte Nacht*
> *sich mit dem Chaos in die Herrschaft teilt,*
> ... [17]

wie ihn John Milton noch in der Mitte des 17. Jahrhunderts angstvoll beschwor.

Ausgerechnet der Dichter Edgar Allan Poe stieß in seiner Abhandlung *Heureka*, wo er sich ausführlich mit diesem Rätsel auseinandersetzte, auf eine Lösung des Problems:

> ... *Wäre die Folge der Sterne nämlich endlos, dann müßte ja der allgemeine Himmelshintergrund in einem schwachen Licht erscheinen, ähnlich dem, wie es die Milchstraße von sich gibt* — wäre dann doch praktisch kein Punkt, in all dem Hintergrunde, wo nicht ein Stern stünde! *Die einzige Art auf die wir, bei*

solcher Lage der Dinge, die Leerstellen erklären könnten, die unsere Teleskope uns in zahllosen Richtungen erblicken lassen, wäre dann die: anzunehmen, wie die Entfernung jenes unsichtbaren Hintergrundes eben derart ungeheurlich sei, daß uns bisher noch kein Lichtstrahl von dort überhaupt erreicht habe. Das dem so sein könne, *Wer wird das zu bestreiten wagen? Ich behaupte ja auch nur ganz schlicht, daß wir nicht einmal den Schatten eines Grundes haben, zu glauben, daß dem so sei.* [18]

Es ist der hier zum erstenmal formulierte Grundgedanke, daß durch die endliche Lichtlaufzeit eine *Sichtgrenze* und damit eine *natürliche Begrenztheit des sichtbaren Universums* gegeben ist. Derartige *Horizonte*, die den sichtbaren Bereich des Universums von einem dahinter liegenden unsichtbaren scheiden, existieren aber nur unter folgenden Voraussetzungen [9, 12]:

- wenn das Alter des Universums endlich ist — dann existiert eine *maximal denkbare* Sichtgrenze bei jener Entfernung, für welche die *Lichtlaufzeit gerade gleich dem Weltalter* ist,
- wenn das Alter des Universums zwar unendlich ist, aber die Objekte (Sterne, Galaxien, etc.) erst seit einem endlichen Zeitraum (von heute aus gerechnet) existieren — dann gibt es eine natürliche Sichtgrenze bei jener Entfernung, für welche die *Lichtlaufzeit gerade gleich dem Alter dieser Objekte* ist,
- wenn das Universum hinreichend schnell expandiert, so daß ab einer gewissen Entfernung die Expansionsgeschwindigkeit des Raums v_{exp} größer als die Lichtgeschwindigkeit $c = 300\ 000\ km/s$ ist. In diesem Fall ist das sichtbare Unviersum auf jenen Bereich beschränkt, für welchen v_{exp} *kleiner als* c ist.

Leider hat Poe seine revolutionäre, heute als richtig erkannte Idee, daß die Entfernungen im Kosmos so ungeheuerlich sind, daß das Licht der meisten Sterne uns noch gar nicht erreicht hat, selbst nicht ernst genommen. Wie für die Wissenschaftler seiner Zeit kommt auch für Poe nur ein statisches ewiges Universum in Betracht. Deshalb bleibt ihm nur der Ausweg in die Annahme einer natürlichen Begrenztheit der Welt, der Existenz eines wie auch immer gearteten Randes des Universums, also in eine Vorstellung, die im Rahmen der Kosmologie des 19. Jahrhunderts weder sinnvoll abstrakt formulierbar noch mit den damaligen Beobachtungen entscheidbar war.

Erst die Weltmodelle der allgemein relativistischen Kosmologie unseres Jahrhunderts erlauben zwanglos diese beiden Gesichtspunkte (Begrenztheit der sichtbaren Welt und endliche Lichtlaufzeit) zu integrieren. Da diese Modelle die Zeitentwicklung und damit das Alter des Kosmos und die Entwicklung seiner Objekte seit dem Urknall beschreiben, existiert in ihnen stets ein natürlicher Horizont, welcher zu jedem Zeitpunkt den sichtbaren Bereich des Universums vom entfernten unsichtbaren trennt. Innerhalb dieses Horizonts liegt der potentiell sichtbare Teil des Universums, in welchem sich alle Objekte befinden, deren Licht seit Entstehen der Welt bis heute zu uns gelangt ist. Außerhalb liegen alle Objekte, die so weit entfernt sind, daß uns ihr Licht bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht erreicht hat [9, 12].

Eine interessante Konsequenz, der zwar sehr großen, aber stets endlichen Lichtgeschwindigkeit ist, daß die Lichtlaufzeit mit dem Abstand der Objekte zunimmt; das bedeutet, daß ihre Entfernung, gemessen in Lichtjahren, gerade stets dem Zeitpunkt in Jahren entspricht, an welchen das heute von uns beobachtete Licht von den betrachteten Objekten ausgesandt wurde. *Astronomisches Beobachten bedeutet somit immer ein Schauen in die Vergangenheit* und zwar, um so tiefer je weiter die Objekte von uns entfernt sind. Niemals sehen wir das Weltall wie es heute ist, sondern jeder weiterreichende Blick enthüllt uns stets nur frühere Zeitepochen und die zugehörigen Entwicklungsformen. Auch dieser Aspekt macht deutlich, daß für die Beschreibung der großräumigen kosmischen Strukturen, Raum und Zeit, nicht als getrennte voneinander unabhängige Entitäten aufgefaßt werden dürfen, sondern nur in ihrem Zusammenspiel als vierdimensionale *Raumzeit* wesentlich sind.

Das Licht der Astrophysiker

In unseren bisherigen Betrachtungen haben wir den Blick vornehmlich auf jene Qualität des Lichts gerichtet, welche uns die Örter und die Bewegungen des Himmelskörpers vermittelt, also auf das Feld der *klassischen Astronomie*, deren Anliegen es seit der Antike ist, die Verteilung und die Organisation der Materie und ihr Bewegungsverhalten im Universum zu studieren und aufzuklären. So beeindruckend und grundlegend die hierbei gewonnenen Ergebnisse und Einsichten auch sind, offenbaren sie uns lediglich die *Außenseite* des Problems, nicht aber die *Innenseite*, die physikalische Natur der Himmelskörper, d.h. ihre materielle Substanz, ihr Alter und ihren Entwicklungszustand. Den Schlüssel hierzu fanden Josef Fraunhofer durch die Entdeckung der nach ihm benannnten *Fraunhofer-Linien* im Sonnenspektrum (1814) und später Gustav Kirchhoff und Robert Bunsen durch die Anwendung der von ihnen entwickelten *Spektralanalyse* auf die Sonne und auf andere helle Sterne (1849) [5].

Die Aufklärung der Gesetze der Lichtausbreitung (Gustav Kirchhoff, 1860) und der physikalischen Natur des Lichts und seiner Wechselwirkung mit der Materie im Rahmen der Quantentheorie in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts (Max Planck, 1900; Werner Heisenberg, 1925; Erwin Schrödinger, 1925) zeigte, daß Licht kein homogenes Medium ist, sondern daß der Strom der von einem Objekt emittierten Lichtteilchen (*Photonen*) vielfältige Informationen enthält, welche, wie Fingerabdrücke, spezifische Rückschlüsse auf den physikalischen Zustand und die chemische Zusammensetzung dieses Objekts erlauben. Durch die Analyse des Lichts des Himmelskörpers und ihre physikalische Interpretation konstruiert die Astrophysik so möglichst widerspruchsfreie theoretische Modelle, anhand derer die beobachteten Spektraleigenschaften der betrachteten Objekte reproduziert werden können. Bis in die fernsten Tiefen des Alls ist es damit möglich, zuverlässige Schlüsse auf den physikalischen Zustand, die materielle Zusammensetzung und den chemischen Aufbau der beobachteten Sterne und Sternsysteme zu ziehen [5].

Das bemerkenswerteste Ergebnis dieser Untersuchungen ist, daß die *sichtbare Materie* in allen Bereichen des Universums, die unseren Beobachtungen zugänglich sind, aus denselben chemischen Grundbausteinen aufgebaut ist, wie sie auch auf der Erde oder in der Sonne vorkommen.

Die Einschränkung *sichtbare Materie* ist hier wichtig: Sie verweist auf ein faszinierendes aber auch beunruhigendes Problem, welches in der letzten fünfzehn Jahren in das Blickfeld der Astrophysik gerückt ist und dort zunehmend an Brisanz gewonnen hat. Es ist das Problem der sogenannten *dunklen Materie*. Damit umschreibt man die inzwischen zweifelsfreien Beobachtungshinweise auf mit den Galaxien und Galaxienhaufen verbundene große Materieansammlungen, welche sich ausschließlich indirekt durch Gravitationseffekte manifestieren, für die aber bislang keinerlei direkte optische Evidenz gefunden werden konnte [19, 20].

Aus diesen Gründen ist die Natur dieser *verborgenen* Materie, welche an Masse die insgesamt *sichtbare Masse* der Galaxien um etwa den Faktor 10 übertrifft, nach wie vor unklar. Es bleibt somit eine der großen Herausforderungen der Astrophysik am Ende unseres Jahrhunderts, hierfür eine befriedigende Erklärung zu finden und Licht in dieses Dunkel zu bringen.

Ungeachtet dieses zur Zeit noch offenen Fragenkomplexes, welcher tief in die Kosmologie und in die Evolution der kosmische Materie hineinführt, besteht Einigkeit zwischen den Wissenschaftlern, daß ein umfassendes Verständnis für die Entwicklung unseres Universums und seiner vielfältigen Strukturen nur auf dem Boden der grundlegenden naturwissenschaftlichen Vorstellungen und Theorien zu finden ist. Wegweisend könnten hier z.B. die Visionen der *Hochenergie-* und *Elementarteilchenphysik* sein, wo im Rahmen einer einheitlichen Darstellung der fundamentalen Grundkräfte versucht wird, die Entfaltung der Raumzeit in ihrem Zusammenwirken mit den Strahlungs- und Materiefeldern geschlossen zu beschreiben[6] [10, 20, 21], aber auch die in der letzten Dekade erarbeiteten evolutionären Konzepte von *Chaos* und *Ordnung*, welche die Bildung von komplexen Strukturen behandeln [22], wie wir sie in den unterschiedlichsten Formen im Weltall vorfinden.

Heute sind erst Ansätze zu einer derart geschlossenen Beschreibung, welche Astronomie, Physik, Chemie, Biologie, Mathematik und nicht zuletzt Philosophie umfaßt, erkennbar. Ein langer mühsamer Weg liegt noch vor uns, an dessen glücklichen Abschnitten die Bausteine zu einem Bild von der Welt zusammengetragen werden müssen, in welchem schließlich nicht nur unsere Fragen nach dem Werden und der Entwicklung des Universums, sondern möglicherweise auch nach dem Leben und dem Sinn der menschlichen Existenz eine menschlich überzeugende Antwort finden.

Der Kosmos im menschlichen Spiegel

Die hier angesprochenen Themenkreise verdeutlichen die zentrale Rolle des Lichts in astronomischen Fragestellungen: *Astronomie ist die Wissenschaft, die vom Licht lebt.* Licht ist die kosmische Botschaft aus den Tiefen von Raum und Zeit an die irdischen Beobachter, das zeitlose Medium der Übermittlung, das über die unvorstellbaren Entfernungen des Weltalls das *Hier* und *Heute* mit dem *Dort* und *Damals* in einer Entwicklungskette verbindet und so das sichtbare Universum als ein *einheitliches evolutionäres System* zu erkennen erlaubt. Licht bildet eine Brücke zwischen den isolierten Himmelsobjekten und schließt das Universum zu einer *Informationseinheit* zusammen, welche es dem menschli-

[6]Siehe den Beitrag von Hans Bucka in diesem Band.

chen Geist zugänglich macht und zu umfassen ermöglicht. Die Werkzeuge — die Theorien, Methoden und Apparate — derer er sich dazu bedient, sind Produkte seines Denkens. Wie sie dem Menschen fortschreitend die äußere Welt enthüllen, wächst er gleicherweise an Erkenntnis und schafft sich so ein geistiges Bild des Universums, einen *inneren Kosmos*, in dessen Licht sich sein Denken und seine Individualität entfalten. In einer Parabel hat Kahlil Gibran dieses Spiegelbild vollendet ausgedrückt [23]:

Der Astronom

Im Schatten des Tempels sahen mein Freund und
ich einen einsamen Blinden sitzen. „Sieh“, sagte
mein Freund, „der weiseste Mann unseres Landes“.
Ich verließ meinen Freund, näherte mich dem
Blinden, begrüßte ihn, und wir kamen in ein Gespräch.
Nach einer Weile sagte ich: „Vergib meine Frage,
aber seit wann bist du blind?“
„Seit meiner Geburt“, antwortete er.
Ich fragte: „Welchem Pfad der Weisheit folgst du?“
Er sagte: „Ich bin Astronom“.
Dann wies er mit der Hand auf seine Brust und sagte:
„Ich beobachte all diese Sonnen, Monde und Sterne.“

Vielleicht ist erst das die wahre Landkarte?

Isabelle Birambaux, Beate Patzer, Genia Schönberger, Uwe Bolick und Jens–Peter Kaufmann danke ich herzlich für ihre Unterstützung.

Literaturverzeichnis

Die Literaturauswahl ist unvollständig und weitgehend willkürlich. Sie beschränkt sich vor allem auf leicht zugängliche Lehrbücher bzw. Abhandlungen und nur wenige Originalarbeiten. Darstellungen, welche sich an ein breiteres Publikum wenden, sind mit einem *gekennzeichnet.

[1] * G. Lukács: Die Theorie des Romans, Luchterhand, Frankfurt/M., 1988, p. 21

[2] * B.L. van der Waerden: Erwachende Wissenschaft, Bd. 2, Birkhäuser, Basel, 1968
* O. Neugebauer: The Exact Sciences in Antiquity, Brown Univ. Press, Providence, Rhode Island, 1957
* D.B. Herrmann: Entdecker des Himmels, Pahl-Rugenstein Verlag, Köln, 1979
* F. Becker: Geschichte der Astronomie, Bibliographisches Institut, Mannheim-Wien-Zürich, 1968

[3] * F. Hoyle: On Stonehenge, Freeman and Co., San Francisco, 1977
* D.C. Heggie: Megalithic Science, Thames and Hudson, London, 1981
O. Neugebauer: A history of Ancient Mathematical Astronomy, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1975

[4] * A. Koestler: Die Nachtwandler, Die Entstehungsgeschichte unserer Welterkenntnis, Suhrkamp, Frankfurt/M., 1980
* D.B. Herrmann: Geschichte der modernen Astronomie, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1984

[5] * K. Schaifers, G. Traving: Meyers Handbuch Weltall, Bibliographisches Institut, Mannheim-Wien-Zürich, 1984
A. Unsöld, B. Baschek: Der neue Kosmos, 5. Aufl., Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1991
H.H. Voigt: Abriß der Astronomie, 4. Aufl., Biblliographisches Institut, Mannheim-Wien-Zürich, 1988

[6] * C.F. von Weizsäcker: Die Einheit der Natur, Hanser, München, 1971

[7] A. Einstein: Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie, Ann. d. Phys., **49**, 769, 1916

[8] * M. Jammer: Das Problem des Raumes, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1980
* B. Kanitscheider: Kosmologie, Geschichte und Systematik in physikalischer Perspektive, Reclam, Stuttgart, 1984

[9] C.W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler: Gravitation, Freeman and Co., San Francisco, 1973

E. Schmutzer: Relativitätstheorie Aktuell, Verlag Harry Deutsch, Thun-Frankfurt/M, 1981
R.U. Sexl, H.K. Urbantke: Gravitation und Kosmologie, Biblliographisches Institut, Mannheim-Wien-Zürich, 1975
H.J. Treder: Elementare Kosmologie, Akademie Verlag, Berlin, 1975
S. Weinberg: Gravitation and Cosmology, Principles and Application of the General Theory of Relativity, J. Wiley and Sons, New York-London-Sidney-Toronto, 1972
M. Born: Die Relativitätstheorie Einsteins, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, Tokyo, 1984

[10] * S. Weinberg: Die ersten drei Minuten, Piper und Co., München-Zürich, 1977
* H. Fritzsch: Vom Urknall zum Zerfall, Piper und Co, München-Zürich, 1983

[11] * S.W. Hawking: Eine kurze Geschichte der Zeit, Rowohlt, Reinbek bei Hamburg, 1988

[12] * E.H. Harrison: Darkness at Night, Harvard Univ. Press, Cambridge/Mass., 1987
* R. Kippenhahn: Licht vom Rande der Welt, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1984
W. Schlosser, T. Schmidt-Kaler, E.F. Milone: Challenges of Astronomy, Hands-on Experiments for the Sky and Laboratory, Springer, New York-Berlin-Heidelberg, 1991

[13] * G. Bruno: Zwiegespräch vom Unendlichen All und den Welten, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1983

[14] I. Newton: Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, London, 1687, in dt. Übersetzung: Mathematische Prinzipien der Naturlehre, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1963, p. 25

[15] * J. Kepler: Kepler's Conversation with Galileo's Siderial Messenger, Übersetz. E. Rosen, Johnson Reprint Corporation, New York, 1965, p. 35

[16] * I. Kant: Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels, In: Werke, hrsg. v. E. Cassirer, Bd. 1, Berlin, 1912

[17] * J. Milton: Das verlorene Paradies, Reclam, Stuttgart, 1968, 2. Buch, Vers 531-534
—— ebenda, Vers 1166-1171

[18] * E.A. Poe: Heureka, In: Das gesamte Werk in zehn Bänden, hrsg. von K. Schumann und H.D. Müller, Bd. 5, Pawlack Verlagsgesellschaft, Herrsching, 1979, p. 1009

[19] J. Audouze, J. Tran Thanh Van (eds.): Dark Matter, Editions Frontiers, Gif-sur-Yvette Cedex, 1988
P. Galeotti, D.N. Schramm (eds.): Dark Matter in the Universe, Kluwer Academic Publications, Dordrecht, 1990

[20] M. Caffo, R. Fanti, G. Giacomelli, A. Renzini (eds.): Astronomy, Cosmology and Fundamental Physics, Kluwer Academic Publications, Dordrecht, 1989

[21] L.Z. Fang, R. Ruffini (eds.): Quantum Cosmology, Advanced Series in Astrophysics and Cosmology, Vol. 3, World Scientific, Singapore, 1987

[22] * W. Gerock et al. (eds.): Ordnung und Chaos in der unbelebten und belebten Natur, Verhandlungen der Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte, 115. Versammlung, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1989

[23] * Kahlil Gibran: Der Narr, Walter Verlag, Olten-Freiburg, 5. Aufl., 1980, p. 39