

Sport, Deregulierung und Beschäftigungs- politik.

Laut Bondi und Sciama (und vielen anderen Autoren) beweist das Olberssche Paradoxon die Expansio des Weltalls. Sie behaupteten, ihre Vorgänger hätten allesamt die Chance erpaßt, die Expansion zu entdecken. Doch obwohl auch heute diese Ansicht noch vertreten wird, kennen wir bereits andere Gründe für die Dunkelheit.

Fakten und Argumente der SP Kanton Zürich. Nr. 11 / 2001



Warum wird es nachts dunkel?

Warum wird es nachts dunkel? Diese Frage stellt sich kaum jemand, denn die Antwort scheint auf der Hand zu liegen: Weil die Sonne nicht scheint! So einfach liegen die Dinge aber nicht.

Aus einfachen Annahmen kann man leicht folgern, daß es auch nachts taghell sein müßte. Diese Überlegungen wurden schon von vielen berühmten Wissenschaftlern der letzten Jahrhunderte geführt. Dabei entstanden viele «Lösungen» des Problems des dunklen Nachthimmels, die beispielhaft für die Ansichten der jeweiligen Zeit sind. Diese Lösungen haben die neuere Entwicklung der Kosmologie geprägt, so daß das Problem zur Einführung in physikalische, historische und wissenschaftstheoretische Aspekte der Kosmologie prädestiniert ist.

Das Problem entsteht, wenn man sich überlegt, daß die Sterne auch «Sonne» sind (eigentlich ist es umgekehrt: die Sonne ist ein Stern), die im Durchschnitt mindestens so hell sind wie unsere Sonne. Natürlich sind die Sterne viel weiter von uns entfernt als die Sonne, aber dafür gibt es auch sehr viele Sterne, vielleicht sogar unendlich viele. Egal in welche Richtung man blickt, immer trifft der Sehstrahl auf einen Stern. Analog zu der Situation in einem dichten Wald, wo der Blick in jeder Richtung nach ein paar Metern auf einen Baum trifft. Diese anschauliche Formulierung läßt sich mathematisch untermauern.

Man stellt sich um die Erde in einem beliebigen Abstand eine Sphäre vor. Die Zahl der Sterne in dieser Sphäre ist nun proportional zu ihrem Volumen. Sei r der Radius der Sphäre und d die Dicke, wobei die Dicke im Vergleich zum Radius sehr gering sein sollte. Ist n die Anzahl der Sterne pro Volumeneinheit, dann folgt für die Zahl der Sterne in der Sphäre N . Bezeichnet I die durchschnittliche Leuchtkraft eines einzelnen Sterns, so hat die Sphäre eine Gesamtleuchtkraft von $N \cdot I$. Bis das Licht die Erde erreicht hat es sich auf eine Fläche verteilt, so daß wir auf der Erde eine Leuchtkraft von $\frac{N \cdot I}{4 \pi r^2}$ empfangen. Offensicht-

lich ist der Radius der Sphäre in dieser Formel nicht mehr enthalten. Wir erhalten also von jeder Sphäre, egal wie weit sie entfernt ist, die gleiche Menge Licht! Ein unendliches Weltall enthält unendlich viele solcher Sphären. Summiert man die Lichtmengen dieser Sphären auf, dann sieht man, daß es auf der Erdoberfläche unendlich hell sein müßte.

Dabei wurde allerdings die Absorption vergessen, denn jeder Stern hat eine Ausdehnung und verdeckt hinter ihm liegende Sterne. Dennoch erhält man so eine Helligkeit wie auf einer durchschnittlichen Sternoberfläche, was erstaunlich genug ist. Deshalb reicht auch schon eine endliche Sternenzahl, da man die verdeckten Sterne nicht wahrnimmt. Für uns wäre diese Helligkeit fatal. Würde überall im Universum eine solche Strahlungsintensität herrschen, so herrschte auch überall eine Temperatur von ca. 6000 K. Planeten würden in so einem Universum gar nicht erst entstehen. Selbst Sterne

würden unter solchen Bedingungen wohl nicht lange existieren. Das ganze Universum wäre ein Meer von Strahlung. Aber warum existieren wir dennoch? Welchen Umständen haben wir unseren dunklen Nachthimmel zu verdanken?

Dieses Phänomen wird heute im allgemeinen als Olbersches Paradoxon bezeichnet, nach dem Arzt und Astronomen Heinrich Wilhelm Matthias Olbers (1758-1840). Obwohl Olbers nicht der erste war, der sich mit diesem Problem auseinandersetzte, hat sich der Name eingebürgert, den Hermann Bondi dem Problem in seinem Buch «Cosmology» gab. Vollmer spricht hier vom Nullten Hauptsatz der Wissenschaftsgeschichte: Ein Satz (oder Effekt), der den Namen einer Person trägt, stammt von einer anderen. Auch die Bezeichnung Paradoxon scheint kaum angemessen. Jeder, der sich mit dem Problem auseinandersetzte, hatte eine Lösung parat (wenn auch nicht «die» richtige), so daß niemanden die Situation para-



Mit dem Universum lassen sich nicht so einfach physikalische Experimente durchführen, wie mit anderen Forschungsobjekten.

Doch erstmal zu den einzelnen Annahmen.

dox erschien. Es tritt aber ein Widerspruch auf, nämlich zwischen der beobachteten Finsternis in der Nacht und klassischen Theorien der Kosmologie. Es entsteht allerdings kein Widerspruch zwischen einer einzelnen Annahme und den Beobachtungen (i.e. der Dunkelheit bei Nacht), sondern zu einer ganzen Schar von Annahmen. Da die Beobachtungen richtig sind, muß der Fehler bei den Annahmen liegen. Allerdings sind nicht alle Annahmen durch den Widerspruch widerlegt. Man kann lediglich folgern, daß mindestens eine der Annahmen falsch sein muß, aber nicht welche oder wie viele. Da sich die Annahmen einzeln nicht prüfen lassen, erhalten wir keine Aussage über einzelne Voraussetzungen.

Probleme dieser Art bezeichnet man als Duhem-Quine-Problem. Hier geht es um ein sogenanntes experimentum crucis, ein entscheidendes Experiment, das eine Entscheidung zwischen konkurrierenden Sätzen erlaubt. Die sogenannte Duhem-Quine-These besagt, daß es grundsätzlich kein systematisches Verfahren gibt, das es ermöglicht herauszufinden, welche Voraussetzungen falsch sind. Auch bei der Benennung dieser These trifft laut Vollmer der Nullte Hauptsatz der Wissenschaftsgeschichte zu. Pierre Duhem (1861-1916) war sogar überzeugt, eine Lösung dieses Problems zu finden. Die Unlösbarkeit vertraten dagegen Willard Van Orman Quine (* 1908) und Imre Lakatos (1922-1974), so daß Quine-Lakatos-These die angemessenere Bezeichnung wäre. Quine behauptet, daß es generell nicht möglich ist, wegen des logischen Zusammenhangs der einzelnen Annahmen, eine einzelne Hypothese durch ein experimentum crucis zu widerlegen, sondern daß man nur die ganze Theorie geschlossen falsifizieren kann. Nun muß man einzelne Annahmen ändern um die gesamte Theorie zu retten. Es gibt laut Quine keinen Weg zu erkennen welche der Annahmen geändert werden muß. Alle Prämissen sind gleichwertig.

Trotz dieser Einschränkungen liefert das Olberssche Paradoxon wertvolle Erkenntnisse. Mit ihm lassen sich Thesen widerlegen, die anders nicht überprüfbar sind. Probleme wie dieses liefern den einzigen Zugang zur Kosmologie als Erfahrungswissenschaft.

Denn mit dem Universum lassen sich nicht so einfach physikalische Experimente durchführen, wie mit anderen Forschungsobjekten. Das Universum läßt sich nicht einfach manipulieren (jedenfalls nicht in seiner Gesamtheit). Wir befinden uns mitten in dem System, das wir erforschen wollen, und es gibt keine Möglichkeit es von außen zu betrachten. Auch das Alter des Universums stellt ein Problem dar. Wir wissen weder ob es einen zeitlichen Anfang oder ein Ende gibt.

Betrachtet man diese Schwierigkeiten, ist es um so erstaunlicher, daß man mit einem einfachen Experiment, das jeder ohne großen Aufwand selbst durchführen kann – nämlich nachts nach draußen zu gehen und festzustellen, daß es dunkel ist – Aussagen über die Gestalt unseres Universums überprüfen kann.

Wie lauten nun aber diese Annahmen, die zum Widerspruch führen? Nach Vollmer sind es folgende Annahmen:

- ▶ Das Weltall ist räumlich unendlich.
- ▶ Das kosmologische Prinzip trifft zu.
- ▶ Das Universum ist unendlich alt.
- ▶ Die mittlere Sternendichte ist zeitlich konstant.
- ▶ Der Raum zwischen den Sternen ist leer.
- ▶ Der physikalische Raum ist euklidisch.
- ▶ Das Weltall ist statisch.
- ▶ Die physikalischen Gesetze sind universell und nicht zeitabhängig.

Auf einige dieser Annahmen können wir sogar verzichten oder können sie durch schwächere ersetzen, ohne den Widerspruch zu verlieren. Wie eingangs schon erwähnt, reicht zum Beispiel ein hinreichend großes endliches Weltall. Ebenso ließe sich unendlich alt gegen hinreichend alt vertauschen.

Diese Annahmen wurden nie zusammen von einem Forscher vertreten. Allerdings wurde jede einzelne von ihnen von

anerkannten Wissenschaftlern vertreten, so daß es Sinn macht, die Hypothesen als Bündel zusammenzufassen. So erkennt man nämlich, daß mindestens eine von ihnen falsch ist, wohingegen sich die einzelnen Aussagen zum größten Teil nicht empirisch prüfen lassen. Daß das Weltall und die kosmische Materieverteilung räumlich unendlich sei, behaupteten Lukrez, Thomas Digges 1576, Giordano Bruno, William Gilbert 1600, Isaac Newton und viele andere. Andere dagegen vertraten ein endliches Universum darunter Aristoteles, Ptolemaios, Kopernikus 1542, Kepler 1610. Diese Frage ist eine der grundlegendsten überhaupt und hat schon immer die Gemüter erhitzt. Die einen erschreckt ein unendliches Universum, die anderen können sich nicht mit einem endlichem Universum anfreunden. Bei einem endlichen Universum muß man noch zwischen einem begrenzten und einem unbegrenzten mit endlichen Inhalt – z.B. ein durch Raumkrümmung auf sich selbst gekrümmtes geschlossenes Universum – unterscheiden. Ein begrenztes Universum läßt sich nur schwer vorstellen, denn zu einer Grenze gehören zwei Seiten und was verbirgt sich auf der anderen Seite? Da das Universum alles umfaßt, kann es außerhalb nichts geben. Wie sollte also solch eine Grenze beschaffen sein?

Eine endgültige Lösung ist bis heute nicht bekannt. Auch wenn es immer wieder wissenschaftliche «Lösungen» gab, so wurden diese Argumente früher oder später widerlegt. Newton argumentierte zum Beispiel, daß eine inselartige Materieverteilung auf Grund der auftretenden Gravitationskräfte in sich zusammenfallen würde. Dabei übersah er und seine Zeitgenossen die Möglichkeit, endliche Materieansammlungen durch Rotation stabil zu halten, wie wir es heute bei den Galaxien beobachten. Es sprechen aber auch keinerlei Beobachtungsdaten für ein rotierendes Universum, so daß dies nicht sehr wahrscheinlich scheint. Bei der nächsten Annahme, dem Kosmologischen Prinzip, geht es um die Aussage, daß das Universum homogen und isotrop ist, d.h. es gibt keine Punkte oder Richtungen im Universum, die sich (abstrakt) vor den anderen auszeichnen. Homogenität hängt von den Eigenschaften der Materie ab,

Die Isotropie

während Isotropie von ihrer räumlichen Verteilung und Bewegung abhängt. So ist ein Strand z.B. homogen aber nicht isotrop, denn eine Handvoll Sand ist überall ziemlich gleich, aber der Strand hat nicht in alle Richtungen die gleichen Eigenschaften, so ist der Sand zum Wasser hin z.B. nasser als in die entgegengesetzte Richtung. Man kann also für globale kosmische Überlegungen (wie dem Olbersschen Paradoxon) davon ausgehen, daß die Sterne gleichmäßig im Universum verteilt sind (Isotropie) und überall die gleichen Eigenschaften haben (Homogenität). Ohne dieses Prinzip wäre es nicht ohne weiteres möglich, Aussagen über weit von unserer Erde gelegene Regionen zu machen, da wir von dort keine Daten besitzen und annehmen müssen, daß es dort genauso aussieht wie in der von uns beobachteten Region. Hier spielt auch das sogenannte Kopernikanische Prinzip eine Rolle, das besagt, daß die Erde und ihre Umgebung keinen speziellen Platz im Universum einnehmen.

Das unendliche Alter des Universums

Das unendliche Alter des Universums ist ebenfalls eine wichtige Voraussetzung, denn gäbe es das Universum erst seit endlicher Zeit, so schienen auch die Sterne frühestens seit der Entstehung. Schon ließe sich das Paradoxon durch die einfache Annahme aufheben, daß es nachts nicht hell sei, weil die Zeit noch nicht ausgereicht hat, so daß uns das Licht, das sich ja nur mit endlicher Geschwindigkeit bewegt, von den weit entfernten Sternen noch nicht erreicht hat, so daß wir nur das Licht der Sterne aus der näheren Umgebung sehen, das allein nicht ausreicht, um den Nachthimmel zu erhellen.

Diese Annahme braucht man auch für die nächste Prämisse, daß die mittlere Sterndichte zeitlich konstant ist. Diese Annahme besagt nicht, daß alle Sterne für immer leuchten, sondern nur, daß die Anzahl der Sterne im Mittel konstant bleibt, also daß für verloschene Sterne neue entstehen. Dies ist wichtig, da wir sonst nicht

davon ausgehen können, daß es auch früher schon so viele Sterne gegeben hat wie heute.

Daß der Raum zwischen den Sternen leer ist, ist heute, da wir die Existenz von interstellarer und intergalaktischer Materie beobachten können, eine offensichtlich falsche Annahme. Aber zu Olbers Zeiten war darüber noch nichts bekannt, so daß dies eine sinnvolle Hypothese darstellte. Da die Annahme aber nicht entscheidend ist, löst ihre Fehlerhaftigkeit das Paradoxon nicht. Da Olbers dies aber dachte, lohnt es sich auch, diese Annahme zu beachten.

Nichteuklidische Geometrien wurden erst im vergangenen Jahrhundert entdeckt und ihre Anwendung auf die Kosmologie gelang erst Einstein im Jahre 1917. Also wurde damals wie selbstverständlich die euklidische Geometrie als Beschreibung für den physikalischen Raum verwendet. Dies setzt natürlich seine Unendlichkeit voraus. Auch ein expandierendes Universum oder andere systematische Sternbewegungen wurden von den Wissenschaftlern im 19. Jahrhundert nicht erwogen. Erst 1927 belegten Hubbles Meßdaten eine Expansion, so daß damals die Forscher ganz selbstverständlich von einem statischen Universum ausgingen.

Grundlegend für alle Überlegungen über den Kosmos ist die Hypothese, daß die physikalischen Gesetze immer und überall gelten, denn sonst müßte sich die Wissenschaft wie wir sie verstehen auf den lokalen Bereich beschränken, für den die Gesetze gelten. Nur dort wären unsere Erfahrungen gültig und für den Rest des Universums müßten wir uns auf vage Vermutungen stützen, die nicht empirisch prüfbar wären. Hierbei handelt es sich also um eine Verallgemeinerung des Kosmologischen Prinzips auf die physikalischen Gesetze.

Diese Annahmen werden in ihrer Gesamtheit also vom Olbersschen Paradoxon widerlegt. Doch wo steckt der Fehler? Ebenso zahlreich wie die vorausgesetzten Thesen über das Universum sind die Hypothesen zur Erklärung des dunklen Nachthimmels. Einige dieser Lösungen haben sich durch neue

Erkenntnisse als falsch erwiesen, die meisten anderen scheinen aus heutiger Sicht auch nur unbefriedigend zu sein. Noch nie gab es eine Lösung die nicht früher oder später wieder verworfen wurde. Kennen wir heute die endgültige Lösung? Die endgültige Lösung gefunden zu haben glaubte jeder der Forscher, die sich mit diesem Problem auseinandersetzten. So wurde im Laufe der Zeit jede Voraussetzung angezweifelt. Hier nun ein chronologischer Überblick einiger Lösungsversuche.

Kepler zweifelte 1610 an der Unendlichkeit des Universums. Ist die Zahl der Sterne in diesem endlichen Weltall nur klein genug, reicht ihre Leuchtkraft nicht, um den Nachthimmel zu erhellen. Stehen die Sterne aber dicht genug, so reicht auch eine endliche Anzahl. Denn jeder Stern hat eine endliche Ausdehnung, so daß sich schon mit endlich vielen der gesamte Himmel bedecken läßt. Man muß also zusätzlich Aussagen über Sternendichte und Anzahl treffen, damit diese Lösung zutrifft. Aufgrund der Beobachtungen die wir heute machen, scheint es eher unwahrscheinlich, daß diese Aussagen zutreffen, denn falls das Universum nicht unendlich groß ist, so muß es doch extreme Ausmaße haben. Diese Lösung ist zwar nicht direkt widerlegbar, steht aber nicht mit unseren Beobachtungen im Einklang, so daß sie als unwahrscheinlich gelten muß.

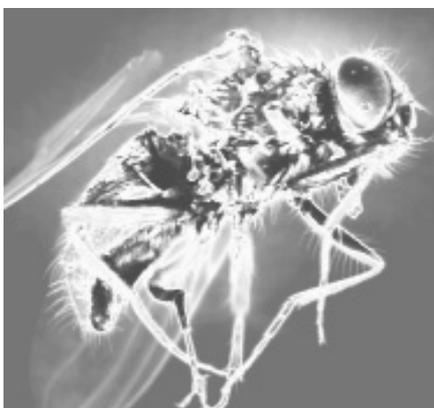
Halleys Lösung von 1721, nämlich daß die fernen Sterne zuwenig Licht senden und deshalb nicht sichtbar sind, habe ich schon am Anfang durch das Sphärenmodell widerlegt, an dem man erkennt, wie die zunehmende Anzahl der Sterne die schwindende Intensität ausgleicht. Geht man davon aus, daß unsere Formeln für die Strahlungsintensitätsabnahme korrekt sind (wenn nicht entsteht das Paradoxon nicht), dann läßt sich diese Lösung also mathematisch widerlegen und ist damit falsch. Weit verbreitet war auch die Idee, daß interstellare Materie das Licht der Sterne absorbiert (Chésaux 1744, Olbers

1823). Olbers formuliert es in seinem Text «Ueber die Durchsichtigkeit des Welt-raums» so: «Gewiß ist also der Weltraum nicht ganz absolut durchsichtig. Aber es bedarf nur eines äußerst geringen Grades von Undurchsichtigkeit, um jene, der Erfahrung so ganz widersprechende Folgerung aus einer unendlichen Menge von Fixsternen, daß dann der ganze Himmel uns Sonnenlicht zurücksenden müsse, völlig zu vernichten.» [5 b]

Urknalltheorie

Heute wissen wir zwar, daß interstellare und sogar intergalaktische Materie existiert, aber wie John Herschel 1848 richtig bemerkte, heizt sich die Materie durch die konstante Absorption auf, bis sie selbst genau so hell strahlt. Dieses

Strahlungsgleichgewicht folgt aus dem Energieerhaltungssatz der zu Olbers Zeiten allerdings noch nicht bekannt war. Hilfreich ist die interstellare Materie bei dem Problem also nur, wenn das Universum erst seit endlicher Zeit besteht (womit eine zweite Annahme aufgehoben wird), denn dann könnte es sein, daß die Zeit noch nicht ausgereicht hat damit sich die Materie erhitzt. Dann handelt es aber nur noch um eine Frage der Zeit, bis wir einen hellen Nachthimmel bekommen. Bei der heute gängigen Urknalltheorie geht man ja in der Tat von einem vor endlicher Zeit entstandenen Universum aus, so daß diese Kombination eine Lösung darstellt, die aber nicht befriedigend ist, denn fällt uns



Auch ein expandierendes Universum oder andere systematische Sternbewegungen wurden von den Wissenschaftlern im 19. Jahrhundert nicht erwogen.

keine bessere Lösung ein, müssen wir uns damit abfinden, daß die Nächte stetig heller werden.

Olbers hatte noch einen zweiten Vorschlag. Er dachte, daß das Licht sich gegenseitig überlagert und dadurch schwächt. Auch ein solches Phänomen gibt es tatsächlich, die sogenannte Interferenz. Hier handelt es sich aber um eine Erscheinung, bei der sich das Licht wie Wellen verhält. Treffen zwei Wellentäler aufeinander entsteht ein noch tieferes Wellental (niedrige Strahlungsintensität), treffen aber zwei Wellenberge aufeinander, verstärken sie sich gegenseitig, so daß ein noch höherer Wellenberg entsteht (hohe Strahlungsintensität). Trifft ein Wellenberg auf ein Wellental löschen sie sich gegenseitig aus, es entsteht ein mittlerer Pegel. So entsteht ein neues Wellenbild, bei dem es nicht nur Täler gibt sondern auch Berge, so daß die Intensität im Mittel gleich bleibt. Nach heutigem Wissen ist also auch diese Lösung falsch.

Zöllners Hypothese von 1872

Interessant ist auch Zöllners Hypothese von 1872, bei der er das euklidische Weltbild zugunsten eines sphärischen aufgibt und so ein endliches aber randloses Universum erhält. Ohne Grenzen ist ein endlicher Kosmos leichter vorstellbar, denn wie oben schon, erwähnt birgt eine Grenze Probleme in sich, die unüberwindbar scheinen. Wie schon der Psychologe Wilhelm Wundt 1877 einwandte, gibt es in einem solchen Universum auch keine Grenzen für das Licht; die Lichtstrahlen können das Universum mehrmals durchqueren und so zu jedem Punkt gelangen. Dies kann man sich am besten durch das zweidimensionale Analogon einer Kugeloberfläche vorstellen. Es läßt sich rechnerisch zeigen (Bondi 1960), daß das Problem so nicht gelöst wird. Ein Verzicht auf das Kosmologische Prinzip stellt die These eines hierarchisch aufgebauten Universums dar. Das bedeutet, daß alle Systeme (Sterne, Sternhaufen, Galaxien...) Bestandteil eines noch größeren Systems sind. Dabei nimmt der Abstand der Elemente zu, je höher das System. Dadurch haben Systeme hoher Ordnung eine geringere Materiedichte als

Grundlegend für alle Überlegungen über den Kosmos ist die Hypothese, daß die physikalischen Gesetze immer und überall gelten, denn sonst müßte sich die Wissenschaft wie wir sie verstehen auf den lokalen Bereich beschränken, für den die Gesetze gelten.



Susanna Rusca Speck
Kantonsrätin Zürich
Sozialpädagogin

Wie lauten nun aber diese Annahmen, die zum Widerspruch führen? Nach Vollmer sind es folgende Annahmen:

- ▶ Das Weltall ist räumlich unendlich.
- ▶ Das kosmologische Prinzip trifft zu.
- ▶ Das Universum ist unendlich alt.
- ▶ Die mittlere Sternendichte ist zeitlich konstant.
- ▶ Der Raum zwischen den Sternen ist leer.
- ▶ Der physikalische Raum ist euklidisch.
- ▶ Das Weltall ist statisch.
- ▶ Die physikalischen Gesetze sind universell und nicht zeitabhängig.

eine Handvoll Sand ist überall ziemlich gleich, aber der Strand hat nicht in alle Richtungen die gleichen Eigenschaften, so ist der Sand zum Wasser hin z.B. nasser als in die entgegengesetzte Richtung.



Karl-Heinz Speck
Kantonsrat Zürich
Sozialpädagogin

ihre einzelnen Bestandteile. Da es unendliche viele Systeme gibt, geht also die Materiedichte des Universums gegen Null.

Hintergrundstrahlung und Rotverschiebung

Diese Idee, die auf Johann Heinrich Lambert (1728-1777) zurückgeht, stellt tatsächlich eine Lösung dar. Durch Aussagen dieser Art lassen sich aber leicht Widersprüche aufheben, denn hier wird behauptet, daß in anderen Bereichen des Kosmos andere Regeln gelten. Da wir diese Regionen nicht direkt beobachten können, ist diese Behauptung nicht widerlegbar, aber deshalb noch lange nicht richtig. Würde sie stimmen, müßten wir jeden Anspruch aufgeben, globale kosmologische Effekte zu erklären. Alle unsere Beobachtungen wie die optische Isotropie und die Isotropie der 3K-Hintergrundstrahlung (die als Reststrahlung des Urknalls gedeutet wird) wären lokale Effekte.

Eine solche Erklärung des Paradoxons ist also mit Vorsicht zu genießen, will man nicht die gesamte Kosmologie in Frage stellen. Zwar lassen sich heute hierarchische Gruppierungen wie Sternhaufen, Galaxien und sogar Haufen und Superhaufen von Galaxien beobachten, doch scheint mit ihnen die Hierarchie bereits zu enden, so daß die Sterne in kosmischen Maßstäben gesehen ziemlich gleichmäßig verteilt sind. Denn gibt es eine größte

Einheit, so wendet man das Sphärenmodell auf sie an. Anstatt der Zahl der Sterne setzt man zum Beispiel die Zahl der Galaxien oder Superhaufen pro Volumeneinheit ein. Eine auch in neuerer Zeit noch favorisierte Lösung, die wohl von Bondi (1952) stammt, ist die Annahme, es sei nachts dunkel, weil das Universum expandiere. Durch die Expansion kommt es zu einer sogenannten Rotverschiebung. Dieser Effekt beruht zum Teil auf dem Dopplereffekt, der uns von Schall gut bekannt ist. Den Dopplereffekt hat jeder schon mal beobachtet (wenn nicht, dann stelle man sich an eine Autobahn), wenn sich eine Schallquelle vom Beobachter entfernt, so klingt der Ton tiefer als er in Wahrheit ist, weil durch die Bewegung die Frequenz der Wellen abnimmt, kommt sie auf ihn zu, nimmt die Frequenz zu. Beim Licht verhält es sich genauso. Entfernt sich die Lichtquelle, so nimmt die Frequenz des Lichtes ab, was eine Energieabnahme bedeutet. Durch diese Energieabnahme wird das Licht dann roter. Allerdings sind hier viel größere Geschwindigkeiten von Nöten als beim Schall damit der Effekt beobachtbar wird.

Es gibt noch einen zweiten Faktor bei der Rotverschiebung, der vielleicht noch wichtiger ist. Während sich das Licht durch den Raum bewegt, dehnt sich dieser aus und das Licht mit ihm, wodurch die Lichtwellen gestreckt werden, die Frequenz also noch einmal abnimmt. Je größer die Entfernung der Emmissionsquelle, um so



Eine auch in neuerer Zeit noch favorisierte Lösung, die wohl von Bondi (1952) stammt, ist die Annahme, es sei nachts dunkel, weil das Universum expandiere.

Neuste Lösung

größer die Wellenlänge, denn sowohl die Fluchtgeschwindigkeit (Doppler-Effekt) als auch die Zeitspanne, in der das Licht «gedehnt» wird, nehmen mit zunehmender Entfernung zu. Die Rotverschiebung läßt sich heute messen. Um so weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, um so stärker ist ihr Licht zum Rot verschoben. Dies wird als Bestätigung für eine Expansion des Universums angesehen und ist neben der 3K-Hintergrundstrahlung der stärkste «Beweis» für die Urknalltheorie. Die durch die Rotverschiebung verursachte Energieabnahme soll nun dafür verantwortlich sein, daß uns von fernen Sternen kein Licht mehr erreicht. Laut Bondi und Sciamia (und vielen anderen Autoren) beweist das Olberssche Paradoxon die Expansio des Weltalls. Sie behaupteten, ihre Vorgänger hätten allesamt die Chance verpaßt, die Expansion zu entdecken. Doch obwohl auch heute diese Ansicht noch vertreten wird, kennen wir bereits andere Gründe für die Dunkelheit. Es scheint, als ob es selbst, wenn unser Universum kontrahierte, nachts dunkel wäre. Die Expansion halbiert die Nachthimmelstrahlung höchstens. Doch dazu später mehr. Die aus der Rotverschiebung gefolgte Urknalltheorie wird auch zu Lösungsversuchen herangezogen, denn durch diese Theorie werden gleich zwei unserer Prämissen aufgehoben. Erstens besteht das Universum erst seit dem Urknall, ist also nicht unendlich alt, sondern existiert im Gegenteil «erst» seit 15 bis 20 Milliarden Jahren. Zweitens folgt daraus, daß wir selbst wenn das Weltall unendlich groß wäre, höchstens eine Kugel mit 20 Milliarden Lichtjahren Radius um die Erde beobachten können, denn frühestens bei der Entstehung haben sich die ersten Lichtstrahlen aus diesen entfernten Regionen zu uns auf den Weg gemacht. Allerdings gab es zu diesem Zeitpunkt noch keine Sterne. Diese entstanden erst nach über einer Milliarde Jahren in der sogenannten Materie-Ära, glaubt man der Urknalltheorie. Lange Zeit vorher war tatsächlich das gesamte Universum mit Strahlung ausgefüllt. Von einer Temperatur von anfänglich über 1030 K ist heute jedoch nur noch die kosmische Hintergrundstrahlung von 3 K zu beobachten, deren genaue Voraussage durch die Urknalltheorie ein verblüffendes Indiz ihre Richtigkeit ist.

Der Urknalltheorie steht die «steady state»-Theorie, die Theorie vom stationären Universum, gegenüber.

Diese Hypothese, nach der das Universum zu allen Zeiten den gleichen Anblick liefert, hat heute aber nur noch wenige Anhänger. Die Expansion des Kosmos läßt sich hier bestenfalls durch die Schaffung neuer Materie ausgleichen, so daß die mittlere räumliche Dichte konstant bleibt. Die Entstehung dieser neuen Materie aus dem Nichts, ist aber nicht zu belegen und scheint willkürlich. Trotz ihrer großen Akzeptanz bietet auch die Urknalltheorie nicht die optimale Lösung. Denn diese Lösung hängt von vielen Prämissen ab, wie zum Beispiel von der Strahlungsdichte. Das bedeutet, daß wenn es mehr Sterne im All gäbe, wäre dies das Aus für die Dunkelheit bei Nacht. Wir haben also Glück, daß es nicht mehr Sterne gibt. Dies ist natürlich Wasser auf die Mühlen der Anhänger des Anthropischen Prinzips, die glauben, daß die Lebensbedingungen für uns so optimal sind, weil es uns gibt. Hier scheinen aber Grund und Ursache vertauscht zu sein.

Die vielen Lösungsvorschläge zeigen, daß das Problem nicht so einfach zu lösen ist, wie es vielen erschien.

In fast jedem Buch über Kosmologie wird das Problem zumindest kurz erwähnt. Es wird meistens als Einleitung zur kosmischen Expansion oder der Urknallthese benutzt, wobei das Olberssche Paradoxon dann als Beweis herhalten muß. Dies ist aber gefährlich, denn wie wir gesehen haben, gibt es mehrere Möglichkeiten, das Problem zu klären. Das Paradoxon ist also nur zum Widerlegen von Thesen (bzw. Bündel von Hypothesen) und nicht zum Beweisen geeignet. Man kann nie sicher sein, die endgültige Lösung gefunden zu haben, falls es eine endgültige Lösung überhaupt geben wird. Es scheint zwar relativ sicher, daß einige Lösungen, wie zum Beispiel die Rotverschiebung, ein Faktor sind, die zum dunklen Nachthimmel beitragen. Aber man kann sich nicht sicher sein, ob noch andere Faktoren einen möglicherweise noch viel wichtigeren Beitrag liefern.

So verhält es sich auch mit der neuesten Lösung, die wohl von Harrison stammt und auch von Vollmer und anderen vertreten wird. Sie scheint uns heute zwar sehr wahrscheinlich zu sein und viele glauben fest an sie, aber dieser Fehler wurde schon oft begangen, was man an der Geschichte des Olbersschen Paradoxon besonders gut sieht. Die meisten Wissenschaftler glauben fest an die Richtigkeit ihrer Thesen. Dabei übersehen sie oft, welche und wie viele Voraussetzungen sie machen, denn viele Dinge scheinen uns so selbstverständlich, daß wir sie nicht hinterfragen und von ihrer Korrektheit ausgehen. Das wird zum Beispiel an der Voraussetzung, daß der Raum euklidisch ist deutlich. Im vorigen Jahrhundert war es kaum jemanden bewußt, daß es überhaupt Alternativen gibt. Erst zu Beginn unseres Jahrhunderts wurde die Idee, nicht-euklidische Geometrien auf den Kosmos anzuwenden, durch Einsteins Relativitätstheorie verbreitet.

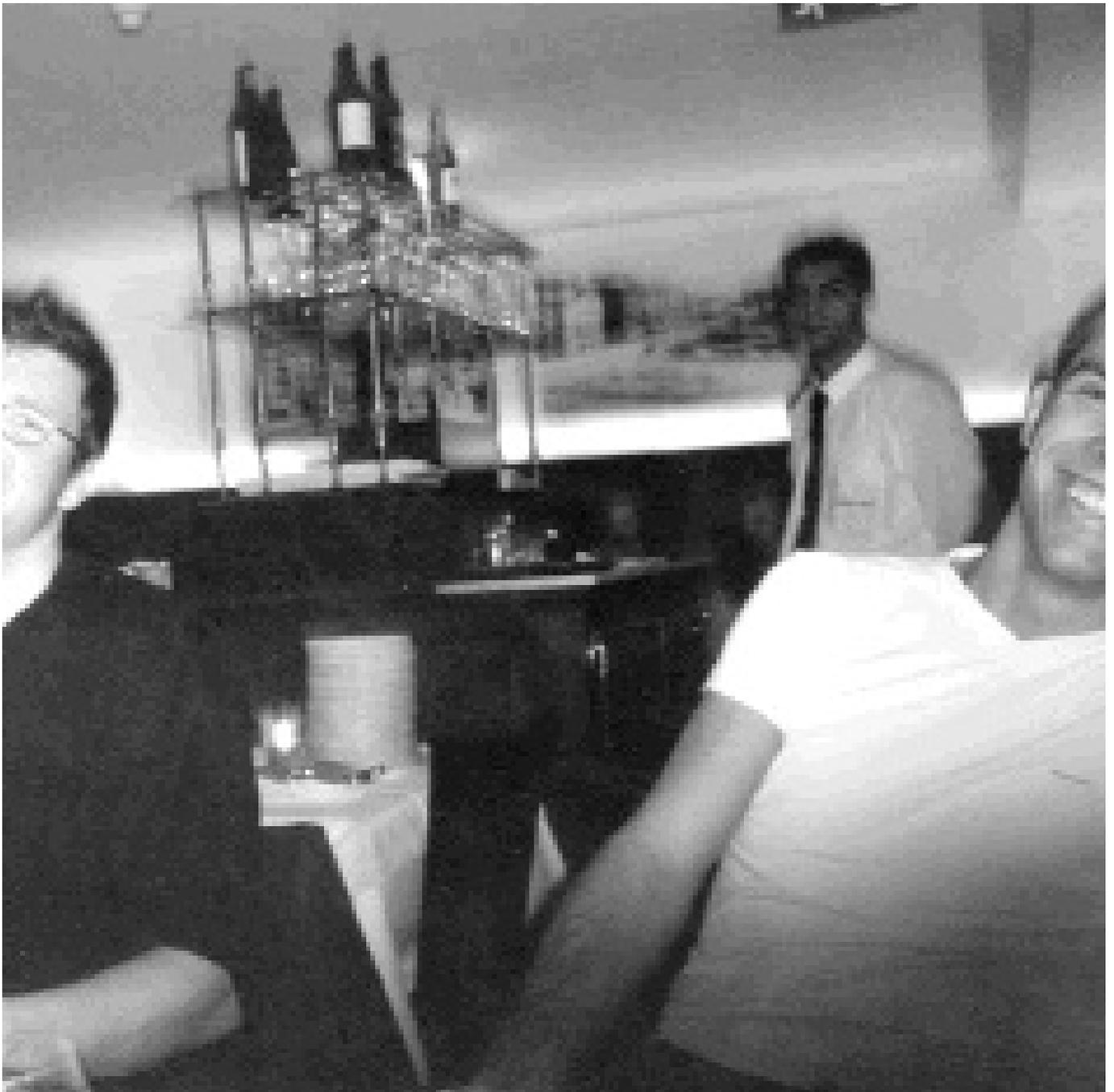
Die zur Zeit beste Erklärung des dunklen Nachthimmels liefert die einfache Feststellung, daß nicht genug Energie vorhanden ist. Ein wesentlicher Faktor ist hierbei die Leuchtdauer der Sterne und ihre Anzahl pro Volumeneinheit. Kennt man die Anzahl der Sterne läßt sich eine Sichtbarkeitsgrenze wie folgt berechnen:

Sei V das Raumbolumen, das im Durchschnitt einen Stern enthält, und a die Oberfläche des Querschnitts durch einen typischen Stern. Dann berechnet sich die Sichtbarkeitsgrenze S durch.

Geht man von der heute üblichen Annahme von durchschnittlich einem Wasserstoffatom pro Kubikmeter aus, dann ergibt sich eine Sichtbarkeitsgrenze von 10^{23} Lichtjahren für unser Universum. Das bedeutet, daß unser Blick nach spätestens 10^{23} Lichtjahren auf einen Stern trifft. Dabei sehen wir dann 10^{60} Sterne um uns herum. Das Licht der dahinter liegenden Sterne können wir nicht mehr sehen. Das Licht der Sterne in 10^{23} Lichtjahren Entfernung erreicht uns allerdings

Sport

Laut Bondi und Sciama (und vielen anderen Autoren) beweist das Olberssche Paradoxon die Expansio des Weltalls. Sie behaupteten, ihre Vorgänger hätten allesamt die Chance erpaßt, die Expansion zu entdecken. Doch obwohl auch heute diese Ansicht noch vertreten wird, kennen wir bereits andere Gründe für die Dunkelheit.



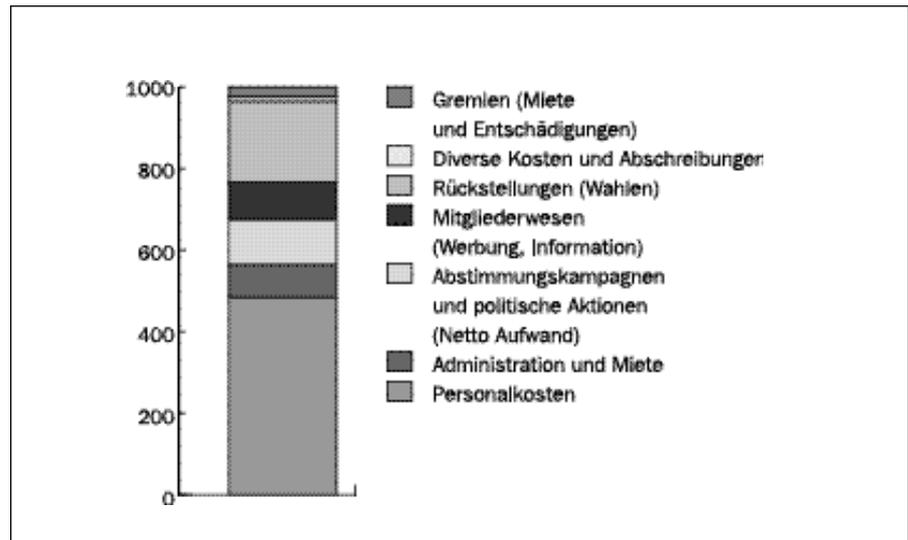
Warum wird es nachts dunkel?

Warum wird es nachts dunkel? Diese Frage stellt sich kaum jemand, denn die Antwort scheint auf der Hand zu liegen: Weil die Sonne nicht scheint! So einfach liegen die Dinge aber nicht.

Aus einfachen Annahmen kann man leicht folgern, daß es auch nachts taghell sein müßte. Diese Überlegungen wurden schon von vielen berühmten Wissenschaftlern der letzten Jahrhunderte geführt. Dabei entstanden viele «Lösungen» des Problems des dunklen Nachthimmels, die beispielhaft für die Ansichten der jeweiligen Zeit sind. Diese Lösungen haben die neuere Entwicklung der Kosmologie geprägt, so daß das Problem zur Einführung in physikalische, historische und wissenschaftstheoretische Aspekte der Kosmologie prädestiniert ist.

Das Problem entsteht, wenn man sich überlegt, daß die Sterne auch «Sonne» sind (eigentlich ist es umgekehrt: die Sonne ist ein Stern), die im Durchschnitt mindestens so hell sind wie unsere Sonne. Natürlich sind die Sterne viel weiter von uns entfernt als die Sonne, aber dafür gibt es auch sehr viele Sterne, vielleicht sogar unendlich viele. Egal in welche Richtung man blickt, immer trifft der Sehstrahl auf einen Stern. Analog zu der Situation in einem dichten Wald, wo der Blick in jeder Richtung nach ein paar Metern auf einen Baum trifft. Diese anschauliche Formulierung läßt sich mathematisch untermauern.

Man stellt sich um die Erde in einem beliebigen Abstand eine Sphäre vor. Die Zahl der Sterne in dieser Sphäre ist nun proportional zu ihrem Volumen. Sei r der Radius der Sphäre und d die Dicke, wobei die Dicke im Vergleich zum Radius sehr gering sein sollte. Ist n die Anzahl der Sterne pro Volumeneinheit, dann folgt für die Zahl der Sterne in der Sphäre N . Be-



Auch ein expandierendes Universum oder andere systematische Sternbewegungen wurden von den Wissenschaftlern im 19. Jahrhundert nicht erwogen.

zeichnet I die durchschnittliche Leuchtkraft eines einzelnen Sterns, so hat die Sphäre eine Gesamtleuchtkraft von NI . Bis das Licht die Erde erreicht hat es sich auf eine Fläche A verteilt, so daß wir auf der Erde eine Leuchtkraft von $\frac{NI}{4\pi r^2}$ empfangen. Offensichtlich ist der Radius der Sphäre in dieser Formel nicht mehr enthalten. Wir erhalten also von jeder Sphäre, egal wie weit sie entfernt ist, die gleiche Menge Licht! Ein unendliches Weltall enthält unendlich viele solcher Sphären. Summiert man die Lichtmengen dieser Sphären auf, dann sieht man, daß es auf der Erdoberfläche unendlich hell sein müßte.

Dabei wurde allerdings die Absorption vergessen, denn jeder Stern hat eine Ausdehnung und verdeckt hinter ihm liegende Sterne. Dennoch erhält man so eine Helligkeit wie auf einer durchschnittlichen Sternoberfläche, was erstaunlich genug ist. Deshalb reicht auch schon eine endliche Sternenzahl, da man die ver-

deckten Sterne nicht wahrnimmt. Für uns wäre diese Helligkeit fatal. Würde überall im Universum eine solche Strahlungsintensität herrschen, so herrschte auch überall eine Temperatur von ca. 6000 K. Planeten würden in so einem Universum gar nicht erst entstehen. Selbst Sterne würden unter solchen Bedingungen wohl nicht lange existieren. Das ganze Universum wäre ein Meer von Strahlung. Aber warum existieren wir dennoch? Welchen Umständen haben wir unseren dunklen Nachthimmel zu verdanken? Dieses Phänomen wird heute im allgemeinen als Olberssches Paradoxon bezeichnet, nach dem Arzt und Astronomen Heinrich Wilhelm Matthias Olbers (1758-1840). Obwohl Olbers nicht der erste war, der sich mit diesem Problem auseinandersetzte, hat sich der Name eingebürgert, den Hermann Bondi dem Problem in seinem Buch «Cosmology» gab. Vollmer spricht hier vom Nullten Hauptsatz der Wissenschaftsgeschichte: Ein Satz (oder

ner ganzen Schar von Annahmen. Da die Beobachtungen richtig sind, muß der Fehler bei den Annahmen liegen. Allerdings sind nicht alle Annahmen durch den Widerspruch widerlegt. Man kann lediglich folgern, daß mindestens eine der Annahmen falsch sein muß, aber nicht welche oder wie viele. Da sich die Annahmen einzeln nicht prüfen lassen, erhalten wir keine Aussage über einzelne Voraussetzungen.

Probleme dieser Art bezeichnet man als Duhem-Quine-Problem. Hier geht es um ein sogenanntes experimentum crucis, ein entscheidendes Experiment, das eine Entscheidung zwischen konkurrierenden Sätzen erlaubt. Die sogenannte Duhem-Quine-These besagt, daß es grundsätzlich kein systematisches Verfahren gibt, das es ermöglicht herauszufinden, welche Voraussetzungen falsch sind. Auch bei der Benennung dieser These trifft laut Vollmer der Nullte Hauptsatz der Wissenschaftsgeschichte zu. Pierre Duhem (1861-1916) war sogar überzeugt, eine Lösung dieses Problems zu finden. Die Unlösbarkeit vertraten dagegen Willard Van Orman Quine (* 1908) und Imre Lakatos (1922-1974), so daß Quine-Lakatos-These die angemessenere Bezeichnung wäre. Quine behauptet, daß es generell nicht möglich ist, wegen des logischen Zusammenhangs der einzelnen Annahmen, eine einzelne Hypothese durch ein experimentum crucis zu widerlegen, sondern daß man nur die ganze Theorie geschlossen falsifizieren kann. Nun muß man einzelne Annahmen ändern um die gesamte Theorie zu retten. Es gibt laut Quine keinen Weg zu erkennen welche der Annahmen geändert werden muß. Alle Prämissen sind gleichwertig.

Trotz dieser Einschränkungen liefert das Olberssche Paradoxon wertvolle

stellt ein Problem dar. Wir wissen weder ob es einen zeitlichen Anfang oder ein Ende gibt.

Betrachtet man diese Schwierigkeiten, ist es um so erstaunlicher, daß man mit einem einfachen Experiment, das jeder ohne großen Aufwand selbst durchführen kann – nämlich nachts nach draußen zu gehen und festzustellen, daß es dunkel ist - Aussagen über die Gestalt unseres Universums überprüfen kann.

Wie lauten nun aber diese Annahmen, die zum Widerspruch führen? Nach Vollmer sind es folgende Annahmen:

- ▶ Das Weltall ist räumlich unendlich.
- ▶ Das kosmologische Prinzip trifft zu.
- ▶ Das Universum ist unendlich alt.
- ▶ Die mittlere Sternendichte ist zeitlich konstant.
- ▶ Der Raum zwischen den Sternen ist leer.
- ▶ Der physikalische Raum ist euklidisch.
- ▶ Das Weltall ist statisch.
- ▶ Die physikalischen Gesetze sind universell und nicht zeitabhängig.

Auf einige dieser Annahmen können wir sogar verzichten oder können sie durch schwächere ersetzen, ohne den Widerspruch zu verlieren. Wie eingangs schon erwähnt, reicht zum Beispiel ein hinreichend großes endliches Weltall. Ebenso ließe sich unendlich alt gegen hinreichend alt vertauschen. Diese Annahmen wurden nie zusammen von einem Forscher vertreten. Allerdings wurde jede einzelne von ihnen von anerkannten Wissenschaftlern vertreten, so daß es Sinn macht, die Hypothesen als Bündel zusammenzufassen. So erkennt man

Andere dagegen vertraten ein endliches Universum darunter Aristoteles, Ptolemaios, Kopernikus 1542, Kepler 1610. Diese Frage ist eine der grundlegendsten überhaupt und hat schon immer die Gemüter erhitzt. Die einen erschreckt ein unendliches Universum, die anderen können sich nicht mit einem endlichem Universum anfreunden. Bei einem endlichem Universum muß man noch zwischen einem begrenzten und einem unbegrenzten mit endlichem Inhalt – z.B. ein durch Raumkrümmung auf sich selbst gekrümmtes geschlossenes Universum - unterscheiden. Ein begrenztes Universum läßt sich nur schwer vorstellen, denn zu einer Grenze gehören zwei Seiten und was verbirgt sich auf der anderen Seite? Da das Universum alles umfaßt, kann es außerhalb nichts geben. Wie sollte also solch eine Grenze beschaffen sein?

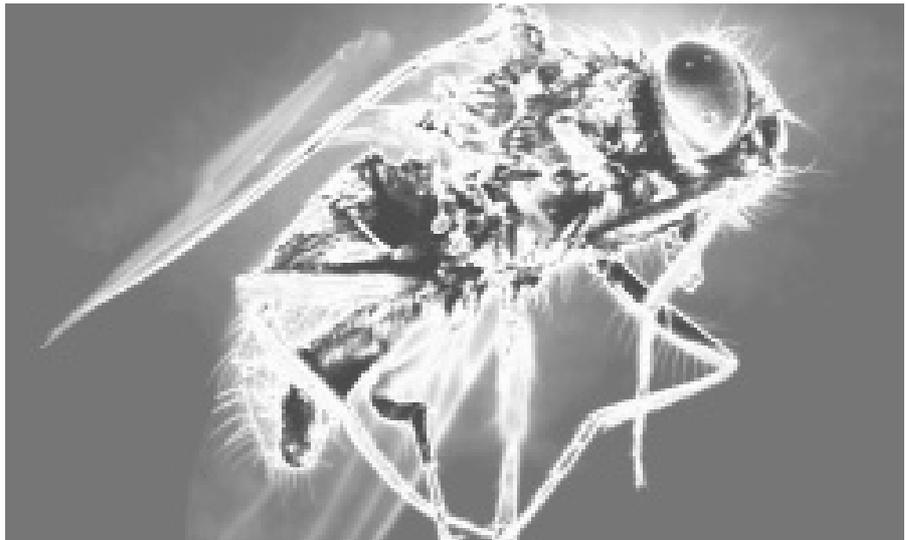
Eine endgültige Lösung ist bis heute nicht bekannt. Auch wenn es immer wieder wissenschaftliche «Lösungen» gab, so wurden diese Argumente früher oder später widerlegt. Newton argumentierte zum Beispiel, daß eine inselartige Materieverteilung auf Grund der auftretenden Gravitationskräfte in sich zusammenfallen würde. Dabei übersah er und seine Zeitgenossen die Möglichkeit, endliche Materieansammlungen durch Rotation stabil zu halten, wie wir es heute bei den Galaxien beobachten. Es sprechen aber auch keinerlei Beobachtungsdaten für ein rotierendes Universum, so daß dies nicht sehr wahrscheinlich scheint. Bei der nächsten Annahme, dem Kosmologischen Prinzip, geht es um die Aussage, daß das Universum homogen und isotrop ist, d.h. es gibt keine Punkte oder Richtungen im Universum, die sich (abstrakt) vor den anderen auszeichnen. Homogenität hängt von den Eigenschaften der Materie ab,

Die Annahmen

während Isotropie von ihrer räumlichen Verteilung und Bewegung abhängt. So ist ein Strand z.B. homogen aber nicht isotrop, denn eine Handvoll Sand ist überall ziemlich gleich, aber der Strand hat nicht in alle Richtungen die gleichen Eigenschaften, so ist der Sand zum Wasser hin z.B. nasser als in die entgegengesetzte Richtung. Man kann also für globale kosmische Überlegungen (wie dem Olbersschen Paradoxon) davon ausgehen, daß die Sterne gleichmäßig im Universum verteilt sind (Isotropie) und überall die gleichen Eigenschaften haben (Homogenität). Ohne dieses Prinzip wäre es nicht ohne weiteres möglich, Aussagen über weit von unserer Erde gelegene Regionen zu machen, da wir von dort keine Daten besitzen und annehmen müssen, daß es dort genauso aussieht wie in der von uns beobachteten Region. Hier spielt auch das sogenannte Kopernikanische Prinzip eine Rolle, das besagt, daß die Erde und ihre Umgebung keinen speziellen Platz im Universum einnehmen.

Das unendliche Alter des Universums

Das unendliche Alter des Universums ist ebenfalls eine wichtige Voraussetzung, denn gäbe es das Universum erst seit endlicher Zeit, so schienen auch die Sterne frühestens seit der Entstehung. Schon ließe sich das Paradoxon durch die einfache Annahme aufheben, daß es nachts nicht hell sei, weil die Zeit noch nicht ausgereicht hat, so daß uns das Licht, das sich ja nur mit endlicher Geschwindigkeit bewegt, von den weit entfernten Sternen noch nicht erreicht hat, so daß wir nur das Licht der Sterne aus der näheren Umgebung sehen, das allein nicht ausreicht, um den Nachthimmel zu



Auch ein expandierendes Universum oder andere systematische Sternbewegungen wurden von den Wissenschaftlern im 19. Jahrhundert nicht erwogen.

erhellen.

Diese Annahme braucht man auch für die nächste Prämisse, daß die mittlere Sterndichte zeitlich konstant ist. Diese Annahme besagt nicht, daß alle Sterne für immer leuchten, sondern nur, daß die Anzahl der Sterne im Mittel konstant bleibt, also daß für verloschene Sterne neue entstehen. Dies ist wichtig, da wir sonst nicht davon ausgehen können, daß es auch früher schon so viele Sterne gegeben hat wie heute.

Daß der Raum zwischen den Sternen leer ist, ist heute, da wir die Existenz von interstellarer und intergalaktischer Materie beobachten können, eine offensichtlich falsche Annahme. Aber zu Olbers Zeiten war darüber noch nichts bekannt, so daß dies eine sinnvolle Hypothese darstellte. Da die Annahme aber nicht entscheidend ist, löst ihre Fehlerhaftigkeit das Paradoxon nicht. Da Olbers dies aber dachte, lohnt es sich

auch, diese Annahme zu beachten.

Nichteuklidische Geometrien wurden erst im vergangenen Jahrhundert entdeckt und ihre Anwendung auf die Kosmologie gelang erst Einstein im Jahre 1917. Also wurde damals wie selbstverständlich die euklidische Geometrie als Beschreibung für den physikalischen Raum verwendet. Dies setzt natürlich seine Unendlichkeit voraus. Auch ein expandierendes Universum oder andere systematische Sternbewegungen wurden von den Wissenschaftlern im 19. Jahrhundert nicht erwogen. Erst 1927 belegten Hubbles Meßdaten eine Expansion, so daß damals die Forscher ganz selbstverständlich von einem statischen Universum ausgingen.

Grundlegend für alle Überlegungen über den Kosmos ist die Hypothese, daß die physikalischen Gesetze immer und überall gelten, denn sonst müßte sich die Wissenschaft wie wir sie verstehen auf

Grundlegend für alle Überlegungen über den Kosmos ist die Hypothese, daß die physikalischen Gesetze immer und überall gelten, denn sonst müßte sich die Wissenschaft wie wir sie verstehen auf den lokalen Bereich beschränken, für den die Gesetze gelten.



Susanna Rusca Speck
Kantonsrätin
Zürich 12
Sozialpädagogin

den lokalen Bereich beschränken, für den die Gesetze gelten. Nur dort wären unsere Erfahrungen gültig und für den Rest des Universums müßten wir uns auf vage Vermutungen stützen, die nicht empirisch prüfbar wären. Hierbei handelt es sich also um eine Verallgemeinerung des Kosmologischen Prinzips auf die physikalischen Gesetze.

Diese Annahmen werden in ihrer Gesamtheit also vom Olbersschen Paradoxon widerlegt. Doch wo steckt der Fehler? Ebenso zahlreich wie die vorausgesetzten Thesen über das Universum sind die Hypothesen zur Erklärung des dunklen Nachthimmels. Einige dieser Lösungen haben sich durch neue Erkenntnisse als falsch erwiesen, die meisten anderen scheinen aus heutiger Sicht auch nur unbefriedigend zu sein. Noch nie gab es eine Lösung die nicht früher oder später wieder verworfen wurde. Kennen wir heute die endgültige Lösung? Die endgültige Lösung gefunden zu haben glaubte jeder der Forscher, die sich mit diesem Problem auseinandersetzten. So wurde im Laufe der Zeit jede Voraussetzung angezweifelt. Hier nun ein chronologischer Überblick einiger Lösungsversuche.

Kepler zweifelte 1610 an der Unendlichkeit des Universums. Ist die Zahl der Sterne in diesem endlichen Weltall nur klein genug, reicht ihre Leuchtkraft nicht, um den Nachthimmel zu erhellen. Stehen die Sterne aber dicht genug, so reicht auch eine endliche Anzahl. Denn jeder Stern hat eine endliche Ausdehnung, so daß sich schon mit endlich vielen der gesamte Himmel bedecken läßt. Man muß also zusätzlich Aussagen über Sternendichte und Anzahl treffen, damit diese Lösung zutrifft.

Aufgrund der Beobachtungen die wir heute machen, scheint es eher unwahrscheinlich, daß diese Aussagen zutreffen, denn falls das Universum nicht unendlich groß ist, so muß es doch extreme Ausmaße haben. Diese Lösung ist zwar nicht direkt widerlegbar, steht aber nicht mit unseren Beobachtungen im Einklang, so daß sie als unwahrscheinlich gelten muß.

Halleys Lösung von 1721, nämlich daß die fernen Sterne zuwenig Licht senden und deshalb nicht sichtbar sind, habe ich schon am Anfang durch das Sphärenmodell widerlegt, an dem man erkennt, wie die zunehmende Anzahl der Sterne die schwindende Intensität ausgleicht. Geht man davon aus, daß unsere Formeln für die Strahlungsintensitätsabnahme korrekt sind (wenn nicht entsteht das Paradoxon nicht), dann läßt sich diese Lösung also mathematisch widerlegen und ist damit falsch.

Weit verbreitet war auch die Idee, daß interstellare Materie das Licht der Sterne absorbiert (Chésaux 1744, Olbers 1823). Olbers formuliert es in seinem Text «Ueber die Durchsichtigkeit des Welt-raums» so: «Gewiß ist also der Weltraum nicht ganz absolut durchsichtig. Aber es bedarf nur eines äußerst geringen Grades von Undurchsichtigkeit, um jene, der Erfahrung so ganz widersprechende Folgerung aus einer unendlichen Menge von Fixsternen, daß dann der ganze Himmel uns Sonnenlicht zurücksenden müsse, völlig zu vernichten.» [5 b]

Urknalltheorie

Heute wissen wir zwar, daß interstellare und sogar intergalaktische Materie exi-

stiert, aber wie John Herschel 1848 richtig bemerkte, heizt sich die Materie durch die konstante Absorption auf, bis sie selbst genau so hell strahlt. Dieses

Strahlungsgleichgewicht folgt aus dem Energieerhaltungssatz der zu Olbers Zeiten allerdings noch nicht bekannt war. Hilfreich ist die interstellare Materie bei dem Problem also nur, wenn das Universum erst seit endlicher Zeit besteht (womit eine zweite Annahme aufgehoben wird), denn dann könnte es sein, daß die Zeit noch nicht ausgereicht hat damit sich die Materie erhitzt. Dann handelt es aber nur noch um eine Frage der Zeit, bis wir einen hellen Nachthimmel bekommen. Bei der heute gängigen Urknalltheorie geht man ja in der Tat von einem vor endlicher Zeit entstandenen Universum aus, so daß diese Kombination eine Lösung darstellt, die aber nicht befriedigend ist, denn fällt uns keine bessere Lösung ein, müssen wir uns damit abfinden, daß die Nächte stetig heller werden.

Olbers hatte noch einen zweiten Vorschlag. Er dachte, daß das Licht sich gegenseitig überlagert und dadurch schwächt. Auch ein solches Phänomen gibt es tatsächlich, die sogenannte Interferenz. Hier handelt es sich aber um eine Erscheinung, bei der sich das Licht wie Wellen verhält. Treffen zwei Wellentäler aufeinander entsteht ein noch tieferes Wellental (niedrige Strahlungsintensität), treffen aber zwei Wellenberge aufeinander, verstärken sie sich gegenseitig, so daß ein noch höherer Wellenberg entsteht (hohe Strahlungsintensität). Trifft ein Wellenberg auf ein Wellental löschen sie sich gegenseitig aus, es entsteht ein mittlerer Pegel. So entsteht ein neues Wellenbild, bei dem es nicht nur Täler gibt sondern auch Berge, so daß die Intensität im Mittel gleich

«Grundlegend für alle Überlegungen über den Kosmos ist die Hypothese, daß die physikalischen Gesetze immer und überall gelten, denn sonst müßte sich die Wissenschaft wie wir sie verstehen auf den lokalen Bereich beschränken, für den die Gesetze gelten.»



Susanna Rusca Speck
Kantonsrätin
Zürich 12
Sozialpädagogin

«Eine solche Erklärung des Paradoxons ist also mit Vorsicht zu genießen, will man nicht die gesamte Kosmologie in Frage stellen.»



Johann Heinrich Lambert
Kantonsrat Zürich
Sozialpädagogin

bleibt. Nach heutigem Wissen ist also auch diese Lösung falsch.

Zöllners Hypothese von 1872

Interessant ist auch Zöllners Hypothese von 1872, bei der er das euklidische Weltbild zugunsten eines sphärischen aufgibt und so ein endliches aber randloses Universum erhält. Ohne Grenzen ist ein endlicher Kosmos leichter vorstellbar, denn wie oben schon, erwähnt birgt eine Grenze Probleme in sich, die unüberwindbar scheinen. Wie schon der Psychologe Wilhelm Wundt 1877 einwandte, gibt es in einem solchen Universum auch keine Grenzen für das Licht; die Lichtstrahlen können das Universum mehrmals durchqueren und so zu jeden Punkt gelangen. Dies kann man sich am besten durch das zweidimensionale Analogon einer Kugeloberfläche vorstellen. Es läßt sich rechnerisch zeigen (Bondi 1960), daß das Problem so nicht gelöst wird. Ein Verzicht auf das Kosmologosche Prinzip stellt die These eines hierarchisch aufgebauten Universums dar. Das bedeutet, daß alle Systeme (Sterne, Sternhaufen, Galaxien...) Bestandteil eines noch größeren Systems sind. Dabei nimmt der Abstand der Elemente zu, je höher das System. Dadurch haben Systeme hoher Ordnung eine geringere Materiedichte als ihre einzelnen Bestandteile. Da es unendliche viele Systeme gibt, geht also die Materiedichte des Universums gegen Null.

Hintergrundstrahlung und Rotverschiebung

Diese Idee, die auf Johann Heinrich Lambert (1728-1777) zurückgeht, stellt

tatsächlich eine Lösung dar. Durch Aussagen dieser Art lassen sich aber leicht Widersprüche aufheben, denn hier wird behauptet, daß in anderen Bereichen des Kosmos andere Regeln gelten. Da wir diese Regionen nicht direkt beobachten können, ist diese Behauptung nicht widerlegbar, aber deshalb noch lange nicht richtig. Würde sie stimmen, müßten wir jeden Anspruch aufgeben, globale kosmologische Effekte zu erklären. Alle unsere Beobachtungen wie die optische Isotropie und die Isotropie der 3K-Hintergrundstrahlung (die als Reststrahlung des Urknalls gedeutet wird) wären lokale Effekte.

Eine solche Erklärung des Paradoxons ist also mit Vorsicht zu genießen, will man nicht die gesamte Kosmologie in Frage stellen. Zwar lassen sich heute hierarchische Gruppierungen wie Sternhaufen, Galaxien und sogar Haufen und Superhaufen von Galaxien beobachten, doch scheint mit ihnen die Hierarchie bereits zu enden, so daß die Sterne in kosmischen Maßstäben gesehen ziemlich gleichmäßig verteilt sind. Denn gibt es eine größte Einheit, so wendet man das Sphärenmodell auf sie an. Anstatt der Zahl der Sterne setzt man zum Beispiel die Zahl der Galaxien oder Superhaufen pro Volumeneinheit ein.

Eine auch in neuerer Zeit noch favorisierte Lösung, die wohl von Bondi (1952) stammt, ist die Annahme, es sei nachts dunkel, weil das Universum expandiere. Durch die Expansion kommt es zu einer sogenannten Rotverschiebung. Dieser Effekt beruht zum Teil auf dem Doppler-Effekt, der uns von Schall gut bekannt ist. Den Doppler Effekt hat jeder schon mal beobachtet (wenn nicht, dann stelle man sich an eine Autobahn), wenn sich eine Schallquelle vom Beobachter entfernt, so

klingt der Ton tiefer als er in Wahrheit ist, weil durch die Bewegung die Frequenz der Wellen abnimmt, kommt sie auf ihn zu, nimmt die Frequenz zu. Beim Licht verhält es sich genauso. Entfernt sich die Lichtquelle, so nimmt die Frequenz des Lichtes ab, was eine Energieabnahme bedeutet. Durch diese Energieabnahme wird das Licht dann roter. Allerdings sind hier viel größere Geschwindigkeiten von Nöten als beim Schall damit der Effekt beobachtbar wird.

Es gibt noch einen zweiten Faktor bei der Rotverschiebung, der vielleicht noch wichtiger ist. Während sich das Licht durch den Raum bewegt, dehnt sich dieser aus und das Licht mit ihm, wodurch die Lichtwellen gestreckt werden, die Frequenz also noch einmal abnimmt. Je größer die Entfernung der Emissionsquelle, um so größer die Wellenlänge, denn sowohl die Fluchtgeschwindigkeit (Doppler-Effekt) als auch die Zeitspanne, in der das Licht «gedehnt» wird, nehmen mit zunehmender Entfernung zu.

Die Rotverschiebung läßt sich heute messen. Um so weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, um so stärker ist ihr Licht zum Rot verschoben. Dies wird als Bestätigung für eine Expansion des Universums angesehen und ist neben der 3K-Hintergrundstrahlung der stärkste «Beweis» für die Urknalltheorie.

Zweiter Faktor bei der Rotverschiebung

Die durch die Rotverschiebung verursachte Energieabnahme soll nun dafür verantwortlich sein, daß uns von fernen Sternen kein Licht mehr erreicht. Laut Bondi und Sciama (und vielen anderen Autoren) beweist das Olberssche Paradoxon die Expansion

des Weltalls. Sie behaupteten, ihre Vorgänger hätten allesamt die Chance verpaßt, die Expansion zu entdecken. Doch obwohl auch heute diese Ansicht noch vertreten wird, kennen wir bereits andere Gründe für die Dunkelheit. Es scheint, als ob es selbst, wenn unser Universum kontrahierte, nachts dunkel wäre. Die Expansion halbiert die Nachthimmelstrahlung höchstens. Doch dazu später mehr.

Die aus der Rotverschiebung gefolgerte Urknalltheorie wird auch zu Lösungsversuchen herangezogen, denn durch diese Theorie werden gleich zwei unserer Prämissen aufgehoben. Erstens besteht das Universum erst seit dem Urknall, ist also nicht unendlich alt, sondern existiert im Gegenteil «erst» seit 15 bis 20 Milliarden Jahren. Zweitens folgt daraus, daß wir selbst wenn das Weltall unendlich groß wäre, höchstens eine Kugel mit 20 Milliarden Lichtjahren Radius um die Erde beobachten können, denn frühestens bei der Entstehung haben sich die ersten Lichtstrahlen aus diesen entfernten Regionen zu uns auf den Weg gemacht. Allerdings gab es zu diesem Zeitpunkt noch keine Sterne. Diese entstanden erst nach über einer Milliarde Jahren in der sogenannten Materie-Ära, glaubt man der Urknalltheorie. Lange Zeit vorher war tatsächlich das gesamte Universum mit Strahlung ausgefüllt. Von einer Temperatur von anfänglich über 1030 K ist heute jedoch nur noch die kosmische Hintergrundstrahlung von 3 K zu beobach-

ten, deren genaue Voraussage durch die Urknalltheorie ein verblüffendes Indiz ihre Richtigkeit ist.

Der Urknalltheorie steht die «steady state»-Theorie, die Theorie vom stationären Universum, gegenüber. Diese Hypothese, nach der das Universum zu allen Zeiten den gleichen Anblick liefert, hat heute aber nur noch wenige Anhänger. Die Expansion des Kosmos läßt sich hier bestenfalls durch die Schaffung neuer Materie ausgleichen, so daß die mittlere räumliche Dichte konstant bleibt. Die Entstehung dieser neuen Materie aus dem Nichts, ist aber nicht zu belegen und scheint willkürlich. Trotz ihrer großen Akzeptanz bietet auch die Urknalltheorie nicht die optimale Lösung. Denn diese Lösung hängt von vielen Prämissen ab, wie zum Beispiel von der Strahlungsdichte. Das bedeutet, daß wenn es mehr Sterne im All gäbe, wäre dies das Aus für die Dunkelheit bei Nacht. Wir haben also Glück, daß es nicht mehr Sterne gibt. Dies ist natürlich Wasser auf die Mühlen der Anhänger des Anthropischen Prinzips, die glauben, daß die Lebensbedingungen für uns so optimal sind, weil es uns gibt. Hier scheinen aber Grund und Ursache vertauscht zu sein.

Die vielen Lösungsvorschläge zeigen, daß das Problem nicht so einfach zu lösen ist, wie es vielen erschien. In fast jedem Buch über Kosmologie wird das Problem zumindest kurz erwähnt. Es wird meistens als Einleitung zur kosmischen Expansion oder der Urknallthese benutzt, wobei das Olberssche Paradoxon dann als Beweis herhalten muß. Dies ist aber gefährlich, denn wie wir gesehen haben, gibt es mehrere Möglichkeiten, das Problem zu klären. Das Paradoxon ist also nur zum Widerlegen von Thesen (bzw.



Auch ein expandierendes Universum oder andere systematische Sternbewegungen wurden von den Wissenschaftlern im 19. Jahrhundert nicht erwogen.

Bündel von Hypothesen) und nicht zum Beweisen geeignet. Man kann nie sicher sein, die endgültige Lösung gefunden zu haben, falls es eine endgültige Lösung überhaupt geben wird. Es scheint zwar relativ sicher, daß einige Lösungen, wie zum Beispiel die Rotverschiebung, ein Faktor sind, die zum dunklen Nachthimmel beitragen. Aber man kann sich nicht sicher sein, ob noch andere Faktoren einen möglicherweise noch viel wichtigeren Beitrag liefern.

Neuste Lösung

So verhält es sich auch mit der neuesten Lösung, die wohl von Harrison stammt und auch von Vollmer und anderen vertreten wird. Sie scheint uns heute

zwar sehr wahrscheinlich zu sein und viele glauben fest an sie, aber dieser Fehler wurde schon oft begangen, was man an der Geschichte des Olbersschen Paradoxon besonders gut sieht. Die meisten Wissenschaftler glauben fest an die Richtigkeit ihrer Thesen. Dabei übersehen sie oft, welche und wie viele Voraussetzungen sie machen, denn viele Dinge scheinen uns so selbstverständlich, daß wir sie nicht hinterfragen und von ihrer Korrektheit ausgehen. Das wird zum Beispiel an der Voraussetzung, daß der Raum euklidisch ist deutlich. Im vorigen Jahrhundert war es kaum jemanden bewußt, daß es überhaupt Alternativen gibt. Erst zu Beginn unseres Jahrhunderts wurde die Idee, nichteuklidische Geometrien auf den Kosmos anzuwenden, durch Einsteins Relativitätstheorie verbreitet.

Die zur Zeit beste Erklärung des dunklen Nachthimmels liefert die einfache Feststellung, daß nicht genug Energie vorhanden ist. Ein wesentlicher Faktor ist hierbei die Leuchtdauer der Sterne und ihre Anzahl pro Volumeneinheit. Kennt man die Anzahl der Sterne läßt sich eine Sichtbarkeitsgrenze wie folgt berechnen: Sei V das Raumvolumen, das im Durchschnitt einen Stern enthält, und a die Oberfläche des Querschnitts durch einen typischen Stern. Dann berechnet sich die Sichtbarkeitsgrenze S durch $S = \sqrt[3]{\frac{V}{a}}$. Geht man von der heute üblichen Annahme von durchschnittlich einem Wasserstoffatom pro Kubikmeter aus, dann ergibt sich eine Sichtbarkeitsgrenze von 10^{23} Lichtjahren für unser Universum. Das bedeutet, daß unser Blick nach spätestens 10^{23} Lichtjahren auf einen Stern trifft. Dabei sehen wir dann 10^{60} Sterne um uns herum. Das Licht der dahinter liegenden Sterne können wir nicht mehr sehen. Das Licht der Sterne in 10^{23} Lichtjahren Entfernung erreicht uns allerdings auch erst nach 10^{23} Jahren, so daß wir uns die Frage stellen müssen, wie das Universum vor 10^{23} Jahren ausgesehen hat.

Sieht man einmal davon ab, daß nach der Urknalltheorie das Universum noch keine 1023 Jahre alt ist, und uns deshalb aus dieser Zeit auch kein Licht erreichen kann, ergeben sich hier schnell Probleme. Man geht von einer durchschnittlichen

Sternlebensdauer von 1010 Jahren aus, einer Dauer, die wesentlich kürzer ist als die Zeit, die das Licht der Sterne an der

Sichtbarkeitsgrenze zu uns braucht. In einem homogenen Universum haben die entfernten Sterne den gleichen Zustand, wie die in unserer direkten Umgebung, sie leuchten also noch. Wenn sie heute leuchten, dann können sie bei einer Leuchtdauer von 10^{10} Jahren, vor 10^{23} Jahren noch nicht existiert haben. Es kann uns heute also nur das Licht von Sternen in einer Entfernung von höchstens 10^{10} Lichtjahren erreichen.

Das Licht der weiter entfernten Sterne erreicht uns erst später. Aber dann haben die Sterne in unserer Umgebung schon aufgehört zu leuchten. Zwar beobachten wir auch die Entstehung von neuen Sternen, aber bei der Berechnung haben wir so getan, als ob alle gleichzeitig leuchten würden (wodurch die Sterndichte ja nur noch erhöht wird), denn die neuen Sterne entstehen nur aus Resten der alten Sterne und alten Gaswolken aus denen vorher noch keine Sterne entstanden waren. Diese Ressourcen nehmen ständig ab, so daß hierdurch kein Ausgleich für das Sterben der alten Sterne entsteht. Die Sterne setzen nur einen sehr geringen Teil ihrer Masse in Strahlungsenergie um, der größte Teil ihrer Masse bleibt für immer ungenutzt. Dabei verzichten wir natürlich auf unsere ursprüngliche Annahme, daß die mittlere Sterndichte konstant bleibt. Also erwartet uns auch in der Zukunft kein helles Universum.

Es erreicht uns also gar nicht das Licht aller Sterne innerhalb der Sichtbarkeitsgrenze. Aber bei der Betrachtung des Paradoxons waren wir davon ausgegangen, daß wir alle diese Sterne sehen können. Berechnen wir den Anteil der Sterne, die wir sehen, von denen die wir für den hellen Himmel bräuchten, so erhalten wir: Uns erreicht also nur ein Zehnbillionstel der erforderlichen Strahlung. Anstatt der 10^{60} Sterne, die erforderlich sind um den ganzen Himmel auszufüllen, sehen wir nur 10^{21} Sterne. Hier kommt es also auf das Verhältnis von Sternlebensdauer zur Sichtbarkeitsgrenze an. Das Mißverhältnis zwischen diesen beiden Größen ist so groß, daß es, selbst wenn unsere Messungen und Berechnungen sehr ungenau sind, bestehen bleibt. Würden die Sterne zum Beispiel ihre ganze Masse in Energie umsetzen, so erhöhte sich ihre Lebensdauer nur auf 1013 Jahre. Um das Verhältnis auszu-

gleichen, müßten die Sterne in einer durchschnittlichen Entfernung von einem Lichtmonat stehen, während unsere Beobachtungen im Schnitt nur einen Stern alle 1000 Lichtjahre findet. Sollte es sich bei diesem krassen Unterschied nur um einen lokalen Effekt handeln, so müßten wir das Kopernikanische Prinzip über Bord werfen, sonst ist eine Sterndichte von einem Lichtmonat unvorstellbar.

Harrison hat eine schöne Analogie zu dieser Lösung. Man stelle sich einen Wassertank vor, der mit Wasser gefüllt wird. Die Zeit, die der Wasserhahn geöffnet ist, entspricht der Leuchtdauer der Sterne. Die «Auffüllzeit», die der Tank benötigt, um vollzulaufen, entspricht der Zeit, die das Licht der Sterne an der Sichtbarkeitsgrenze bis zu uns braucht. Ist der Wasserhahn nicht lange genug geöffnet, so wird der Tank nie voll. Auch die Bedeutung einer Expansion des Weltalls für das Paradoxon, läßt sich hier gut erkennen. Dehnt sich der Wassertank aus, so nimmt sein Volumen zu, und die Auffüllzeit nimmt ständig zu. Der Effekt wird also durch eine Expansion noch verstärkt, aber nicht hervorgerufen. Obwohl es aber natürlich auch denkbar ist, daß sich der Tank schneller ausdehnt, als neues Wasser nachkommt.

Wenn das Fundament zu bröckeln beginnt

Diese Lösung scheint nach heutigen Gesichtspunkten sehr sicher zu sein. Aber wir hätten nichts aus der Geschichte gelernt, wenn wir glauben, die endgültige Lösung zu haben. Man übersieht sehr leicht, welche Prämissen man überhaupt gebraucht. Wir wachsen mit einer bestimmten Weltanschauung auf und gewöhnen uns so an unser Weltbild, daß uns Annahmen als gesichertes Wissen erscheinen, das wir nicht mehr hinterfragen.

Hier liegt der Fehler, den viele Wissenschaftler immer wieder machen. Sie leiten mit logischen Schritten ihre These von Beobachtungsdaten, wie etwa dem dunklen Nachthimmel (der ja wirklich unbestreitbar ist) ab und erhalten dann ein Ergebnis, wie zum Beispiel die Expansion des Universums, das sie dann als gesi-