

Diese Einsicht ist im Grunde das Letzte, das der Roman vermittelt: die erschreckende Klarheit über die Situation der modernen Kunst und in ihrem Spiegel unseres Lebens überhaupt. Alles aber, was der scharfblickende Humanist diesem Verhängnis entgegenzusetzen hat, ist „ein menschliches Verständnis“, wie es die Frau Schweigestill beim Tode des Unglücklichen ausspricht. Der aufgeklärte, ein wenig pedantische Humanismus, dessen Maske sich Mann so vollkommen angepaßt hat, vermag keine Gegenkräfte ins Feld zu führen; er steht in bedauernder Hilflosigkeit neben dem Schicksal des Freundes und des Vaterlandes.

Sicherlich hat das Kunstwerk damit seine Aufgabe erfüllt, in der Gestaltung und Erhellung so großer Zusammenhänge das Verhängnis unserer Zeit gleichsam mythisch zu verdichten. Aber die brennende Problematik des Werks muß den Leser über die „humane“ Lösung hinaus treiben, deren Scheinhaftigkeit im Laufe der Handlung immer mehr offenbar wird; ist sie doch ein Ergebnis der gleichen neuzeitlichen Entwicklung, der Säkularisation des einstigen göttlichen Kosmos, der auch das unselige Genie entstammt. Und die klare Sicht, die das Buch über die Zusammenhänge unseres Schicksals mit dem Reformationszeitalter, über die verworrenen Pfade der abendländischen Neuzeit vermittelt, wird diesem Weiterdenken einen starken Antrieb geben, wie er im Bereich des Menschlichen nur von großen geistigen Gestaltungen ausgeht.

Die Struktur des Weltalls

Von GERHARD MICZAIKA

Das physikalische Weltall, das Gegenstand unserer Forschung ist, fordert die Diskussion von drei Problemkreisen: Materie, Raum und Zeit. Streng genommen teilen sich in diese Aufgabe zwei Gruppen von Forschern: Auf der einen Seite die Physiker unter Mithilfe der Chemiker, Geologen und Mineralogen, auf der anderen die Astronomen.

Wir wollen das an der Materie erläutern und denken uns dazu die materiellen Dinge der Welt der Größe nach in einer Reihe angeordnet. Am Anfang stehen die kleinsten: die Elektronen, Positronen, Protonen, Neutronen und Atome; es folgen Moleküle und größere Verbände wie Steine, Felsen und Berge, schließlich Körper wie die Erde, die Planeten, die Sonne, und am Ende Riesenverbände wie die Sternhaufen, das Milchstraßensystem, die Spiralnebel, die extragalaktischen Nebelhaufen, also das Universum schlechthin.

Die Erforschung der Probleme am Anfang dieser Reihe betreiben die Physiker; von den Elektronen bis zu den Molekülen etwa erstreckt sich ihr Tätigkeitsfeld. Um die anschließenden Fragenkreise bemühen sich

die Chemiker, Mineralogen und Geologen. Mit der Erde selbst beschäftigen sich aber auch bereits die Astronomen, deren Forschungsbereich sich von hier über die Sterne und die Spiralnebel unbeschränkt ausdehnt.

Eigenartigerweise haben gerade die beiden Enden unserer Reihe etwa gleichzeitig die stärkste Beachtung auf sich gelenkt. Die Physiker sind heute besonders an der Erforschung der kleinsten Teilchen, der Elektronen und Atomkernbestandteile interessiert, die Astronomen an der Lösung der Rätsel der gewaltigen Spiralnebel und der Erfüllung des Raumes mit ihnen. Auf beiden Seiten werden große technische Mittel eingesetzt, um die Geheimnisse, die die Materie bietet, zu lösen. Die mit Spannungen von einigen Hundert Millionen Volt betriebenen Zyklotrone und Betatrone der Kernphysiker und die 2,5 m und 5 m Öffnung besitzenden Spiegelteleskope der Astronomen sind mächtige Geräte, die nur diesem einen Zweck dienen.

Alle Materie im Weltall besteht letzten Endes aus den Partikeln, die wir an den Anfang unserer Reihe gestellt haben. Elektronen, Protonen und Neutronen treten zu Atomen zusammen. Atome bilden Moleküle, Moleküle Steine, Felsen und Planeten. Planeten kreisen um Sonnen und Sonnen sind die sichtbaren Bausteine des Weltalls im großen. All die Sterne, die wir am Himmel erblicken, sind nur ein Bruchteil der um ein Vielfaches größeren Zahl, die das Milchstraßensystem bilden. Dies ist der Name für den Spiralnebel, dem wir angehören. Es ist eine flache, linsenförmige Ansammlung von rund 10^{11} Sonnen. Blicken wir in der Ebene der größten Ausdehnung des Systems in den Raum hinaus, so bemerken wir ein leuchtendes Band auf der Himmelssphäre, hervorgerufen durch die Projektion der mit Sternen in dieser Ebene am weitesten hinaus erfüllten Linse. Wir selbst befinden uns etwas exzentrisch zum sternreichen Systemzentrum. Daher rührt die bekannte asymmetrische Verteilung des Lichtes im Verlauf des Milchstraßenbandes her. Sein Mittelpunkt liegt in Richtung auf die Gegend des Sternbildes Sagittarius. Er ist zugleich eine Gegend starker Massenkonzentration. Dort finden sich auch die lichtstärksten Milchstraßenwolken. Von hier nehmen Sternzahl und Lichtintensität der Milchstraße nach beiden Seiten zu ab, bis sie in der gegenüberliegenden Richtung, im Orion, ihre kleinsten Werte erreichen.

Die Struktur im einzelnen wird damit keineswegs beschrieben. Die wahre Sternverteilung im Raum, die durch zahlreiche diskrete Sternwolken und Sternleeren bestimmt ist, verlangt nach viel genaueren Angaben, mit deren äußerst mühevoller Erarbeitung die Stellarstatistik eben beschäftigt ist. Sehr hinderlich erweisen sich dabei Staub und Gas, die sich zwischen den Sternen befinden. Diese interstellare Materie bewirkt eine Schwächung des Sternlichtes und eine Verfälschung der Messungen von Sternentfernungen, wenn diese auf die Helligkeit der Sterne

gegründet werden. Erschwerend kommt hinzu, daß sie nicht gleichmäßig, sondern in ziemlich komplizierter Weise im Raum verteilt zu sein scheint. Ihre gasförmige Komponente ist vielleicht einigermaßen regelmäßig im Raum vorhanden. Der staubförmige Anteil scheint sich dagegen mehr in die Nähe der Milchstraßenebene zu konzentrieren, so daß besonders das Licht der Sterne, die in dieser Ebene stehen, infolge seines langen Weges absorbiert wird. Trotz ihrer großen Verdünnung — in einem Volumen von der Größe des Erdballs findet sich fein verteilt etwa 1 Gramm — dürfte ihre Gesamtmasse von der gleichen Größenordnung sein wie diejenige, die in den Sternen konzentriert ist. Die lichtschwächende Wirkung besonders dichter Wolken wird in den vielen verdunkelten Milchstraßengebieten bereits für den oberflächlichen Betrachter sichtbar. Aber auch die hellen, sternreichen Gebiete sind nicht völlig frei von ihrem Einfluß.

Das Milchstraßensystem ist nicht das einzige Sternsystem seiner Art. Es gibt noch zahllose andere, an 100 Millionen sind heute schon bekannt. Die nächsten erscheinen als ausgedehnte und helle Objekte, während die fernsten sich auf den Aufnahmen als kleine schwachleuchtende Flecke zu erkennen geben oder schließlich sogar sternförmig werden. Von den am weitesten entfernten braucht das Licht gegen 500 Millionen Jahre, um zur Erde zu gelangen. Insgesamt ist also mit Riesenteleskopen, denen ihre Erforschung vorbehalten ist, ein kugelförmiger Raum von rund 1000 Millionen Lichtjahren Durchmesser erfaßbar. Die endgültige Aufklärung ihrer Natur blieb unserer Zeit vorbehalten, obwohl sie schon seit längerem bekannt sind. Herschel hielt sie bereits für isolierte Sternansammlungen und Kant glaubte ähnliches.

Es trifft nicht völlig den wahren Sachverhalt, von isolierten Systemen zu sprechen, ein Teil von ihnen tritt nämlich wieder zu ausgedehnten Haufen zusammen, die unter Umständen mehr als 1000 Mitglieder umfassen. Die Mehrzahl scheint allerdings kleiner zu sein. Unser eigenes Sternsystem gehört zu einer Ansammlung von etwa 20 Nebeln, die man als lokale Gruppe bezeichnet.

Mit Ausnahme des Milchstraßensystems ist das interessanteste Objekt der lokalen Gruppe der große Spiralnebel in der Andromeda, M 31, mit seinen beiden Begleitern M 32 und NGC 205. Das bloße Auge erblickt M 31 als schwachleuchtendes Wölkchen etwa von der halben Größe der Mondscheibe. Seine Gesamthelligkeit entspricht ungefähr einem Stern 4. Größe. Auf photographischen Aufnahmen erscheint er viel stärker ausgedehnt, etwa auf das Fünffache des Monddurchmessers. Das Zentralgebiet ist ziemlich hell, seine Grenzen sind nur unscharf bestimmt. Die äußeren Zonen konnten schon vor längerer Zeit in Einzelsterne aufgelöst werden, während dies für die Zentralfläche erst vor wenigen Jahren auf Grund einer besonderen Technik gelungen ist. Die Auflösung in Einzelsterne lieferte den Schlüssel zur Bestimmung der Entfernung

des Systems, da man die absoluten Leuchtkräfte bestimmter Typen von Sternen von der Milchstraße her kannte. Nachdem man seine Entfernung zu 700 000 Lichtjahren bestimmt hatte, war es ein leichtes, die linearen Abmessungen zu berechnen. Der Hauptkörper des Systems hat einen Durchmesser von etwa 40 000 Lichtjahren. Seine Gesamthelligkeit dürfte etwa 1000 Millionen Sonnen gleichkommen. Unter Einbeziehung der äußeren Nebelgebiete dürfte der Gesamtdurchmesser 100 000 bis 150 000 Lichtjahre betragen. Damit wird der Andromedanebel ein durchaus mit unserem Milchstraßensystem vergleichbares Objekt. Die lokale Nebelgruppe enthält, soviel wir heute sagen können, die beiden größten bisher bekannten Sternsysteme. Dies gilt auch in bezug auf ihre Gesamtmassen, obwohl man darüber noch nicht allzuviel und Sicheres weiß. Überlegungen ganz verschiedener Art führen alle in die Nähe von etwa 100 000 Millionen Sonnen.

Die beiden Begleiter des Andromedanebels sind viel schwächer, offensichtlich auch kleiner und masseärmer. Ihre Gestalt ist elliptisch. Andeutungen einer Spiralstruktur zeigen sich nicht. Die Auflösung in Einzelsterne gelang erst vor kurzer Zeit.

In dem Hauptnebel finden sich Einzelsterne, Sternhaufen und Wolken diffuser Materie in ganz ähnlicher Art wie in unserem Milchstraßensystem. Große Teile des Nebels sind durch dunkle Wolken verdeckt. Einige von ihnen sind sogar völlig undurchlässig für Sternlicht. Sicher ist ein großer Teil der Systemmaterie nicht in den Sternen, sondern in diffuser Form vorhanden, wie wir das auch von der Milchstraße her kennen.

Eine große Zahl von kugelförmigen Sternhaufen ist in M 31^{*} entdeckt worden. Sicher nachgewiesen sind rund 140. Das ist etwa dieselbe Zahl wie im galaktischen System. Die galaktischen Kugelhaufen sind anscheinend allerdings etwas heller als die im Andromedanebel. Dasselbe gilt auch für Kugelhaufen in anderen extragalaktischen Nebeln, soweit dort solche bekannt sind. Während die Kugelhaufen im galaktischen System eine sphärische Verteilung haben, sind sie in M 31 linsenförmig angeordnet und passen sich damit an die allgemeine Struktur an.

Auch offene Sternhaufen und Sternwolken finden sich in der von der Milchstraße her bekannten Form in M 31.

Für die Entfernungsbestimmung des Andromedanebels wichtig ist das Auftreten von Sternen, die infolge von Pulsationen ihre Helligkeit periodisch mit äußerster Regelmäßigkeit ändern (Cepheiden). Zwischen der Lichtwechselperiode und ihrer Leuchtkraft besteht ein strenger Zusammenhang. Bestimmt man ihre scheinbare Helligkeit und die Periode des Lichtwechsels — beides ist leicht zu bewerkstelligen —, so läßt sich auch ihre Entfernung angeben. Bei M 31 tritt allerdings eine noch nicht restlos gelöste Schwierigkeit auf. Es ist damit zu rechnen, daß das Licht der Cepheiden des Andromedanebels nicht nur infolge ihrer Entfernung

geringer erscheint, sondern auch durch absorbierende diffuse Materie geschwächt wird. Der Andromedanebel enthält mit Sicherheit solche Staubwolken, in die die Cepheiden zum Teil eingebettet oder die ihnen vorgelagert sind.

Auch neue Sterne, Novae, wie sie im Milchstraßensystem aufleuchten, werden in M 31 gelegentlich beobachtet. In den letzten 25 Jahren sind über 120 festgestellt worden. Ihre wirkliche Anzahl dürfte größer sein, denn viele entgehen der Entdeckung. Jährlich mögen es 25 bis 30 Stück sein. Im großen und ganzen zeigen sie weitgehende Ähnlichkeit mit den galaktischen Novae. Insbesondere gibt es keine systematischen Unterschiede zwischen ihren Lichtkurven.

Ganz besonderes Interesse beanspruchen die Supernovae. Sie erreichen Helligkeiten, die von der Größenordnung der Helligkeit des gesamten Sternsystems sind, in dem sie sich befinden. In M 31 ist bisher nur ein solcher Fall 1885 bemerkt worden. Die Häufigkeit von Supernovaeausbrüchen in einem Sternsystem ist gering. In 500 Jahren mag vielleicht eine im Durchschnitt pro Sternsystem aufleuchten. Der neue Stern des Jahres 1054, der in chinesischen Quellen beschrieben wird, und Tycho Brahes Novae 1572 sind aller Wahrscheinlichkeit nach galaktische Supernovae gewesen.

Nebelhaufen sind keine Entdeckung unserer Zeit. Man kennt ihre Existenz seit den Zeiten Messiers und Herschels. Sie haben bereits die Gruppen in den Sternbildern Andromeda, Pegasus, Perseus und in den Fischen beobachtet. Alexander von Humboldt hat ihnen einen hervorragenden Platz in seinem Kosmos zugewiesen. Die großen Reflektoren halfen neue Haufen entdecken. Infolge ihrer Unfähigkeit, große Felder abzubilden, unterblieb jedoch lange eine Untersuchung der Einzelheiten. Erst die Schmidt-Kamera, ein spezielles Spiegelteleskop für die gleichmäßig gute und scharfe Abbildung großer Himmelsfelder, half weiter. Zwicky benutzt ein solches Instrument auf dem Mt. Palomar. In Heidelberg mußten Refraktorplatten kleineren Gesichtsfeldes, die zum Teil mühsam zusammengesetzt wurden, für die Erforschung der Haufen verwendet werden. Die neueren Feststellungen bewiesen, daß die Nebelhaufen viel weiter ausgedehnt sind, als man bisher geglaubt hatte. In linearem Maße sind ihre Durchmesser von der Größenordnung einiger Millionen Lichtjahre. Sie nehmen infolgedessen einen merklichen Bruchteil des erreichbaren Raumes überhaupt ein. Die Haufen im Perseus, in der Coma und Hydra sind kugelsymmetrisch. Man wird zu der Vermutung gedrängt, daß diese Ansammlungen einen stationären Zustand erreicht haben. Dagegen ist die Nebelverteilung in den Haufen in der Jungfrau und dem Großen Bären so unregelmäßig, daß man für gewöhnlich diese Ansammlungen noch als nichtstationäre Gebilde betrachtet.

Man hat auf die Nebelhaufen ein von Zeipel für Sternhaufen einge-

führtes und auf den Prinzipien der statistischen Mechanik beruhendes analytisches Verfahren angewendet. Es war bei den Sternhaufen, für die es entwickelt worden war, eigentlich ziemlich erfolglos geblieben, da die benötigten Beobachtungsunterlagen für die dichten Sternhaufen nur schwierig oder gar nicht zu beschaffen waren. In den Zentralzonen stehen die Sterne ja so dicht, daß man Einzelobjekte überhaupt nicht mehr erfassen kann. Bei den Nebelhaufen läßt sich dagegen jedes einzelne Mitglied für sich beobachten. Ein großes auf dem Mt. Wilson gesammeltes Material von Radialgeschwindigkeiten spricht dafür, daß das Newtonsche Gravitationsgesetz auch noch über so ungeheure Entfernungen, wie sie in den Nebelhaufen vorkommen, Geltung besitzt. Einzelheiten sind leider bisher nicht bekannt geworden.

Betrachtet man größere Raumteile, so gehen solche Häufigkeitsschwankungen praktisch unter und man kann von einer gleichförmigen Verteilung sprechen. Es ist unmöglich zu sagen, ob es Aggregate noch höherer Ordnung gibt. Es mag sein, daß sich die Hierarchie der Materie bis in die Unendlichkeit fortsetzt. Spekulationen darüber sind müßig, unser Erfahrungsbereich ist weit überschritten, und es besteht keine Aussicht, die technischen Mittel so zu verstärken, daß sich der Bereich, der der Beobachtung zugänglich ist, wirklich wesentlich vergrößern ließe.

Wir haben damit ein einfaches Bild des Universums gewonnen, indem wir die Anordnung der Materie im R a u m betrachtet haben. Es bleibt noch die Z e i t zu untersuchen. Unser Bild war bisher statisch, zeitlos. Zweifellos ist das eine Idealisierung; denn wir sehen überall Bewegung, also etwas, was mit der Zeit untrennbar verknüpft ist.

Das Newtonsche Gravitationsgesetz beherrscht die Kraftwirkung zwischen den Körpern im Raum. Es regelt in gleicher Weise die Bewegung eines zur Erde fallenden kleinen Steins wie die Bewegung der gewaltigen Sternsysteme in den Nebelhaufen. Vielleicht wird die kinetische Energie der Materie dabei in unvorstellbar langen Zeiträumen in Strahlung umgesetzt und in die Unendlichkeit zerstreut, so daß sich das Weltall langsam einem Zustand völliger Ruhe entgegenentwickelt.

Neben den mikroskopischen Bewegungen ihrer Elektronen und Atome besitzen die Planeten und die Sterne bekanntlich Bewegungen der verschiedensten Art. Aber auch die großen Verbände sind nicht in Ruhe. Das Milchstraßensystem befindet sich in einer Drehbewegung um seinen Massenmittelpunkt. Es rotiert nicht wie ein starrer Körper, sondern seine Umlaufgeschwindigkeit um das Zentrum nimmt nach außen hin monoton ab. Obwohl die Geschwindigkeit in der Sonnenumgebung noch groß ist, benötigt es zu einer vollständigen Umdrehung etwa 200 Millionen Jahre. Aus dynamischen Überlegungen läßt sich seine Gesamtmasse zu 10^{11} Sonnenmassen abschätzen. Sie dürfte etwa zu gleichen Teilen in kompakter Konfiguration als Sterne und in der Form der

äußerst fein verteilten interstellaren Materie zwischen ihnen in Erscheinung treten.

Drehbewegungen der anderen Nebel konnten noch nicht mit völliger Sicherheit nachgewiesen werden. Fest steht jedoch, daß die Nebel in den Haufen eine ungeordnete Bewegung besitzen, wie wir es von den Atomen eines Gases her kennen. Bei den Nebeln und Nebelhaufen wurde aber eine andere höchst merkwürdige Bewegung entdeckt. Sie scheinen sich auf einer Flucht vor uns nach allen Seiten in den Raum hinaus zu befinden. Unser eigener Standpunkt ist ein ruhender Pol, von dem die Sternsysteme mit um so größerer Geschwindigkeit zurückweichen, je weiter sie entfernt sind. Trotz zahlreicher Deutungsversuche ist die Angelegenheit auch heute noch reichlich geheimnisvoll.

Ihre Geschichte begann, als Edwin Hubble 1929 die Fluchtbewegung der Nebel entdeckte. Die Auswirkungen seiner Entdeckung verliefen sich bis in die scheinbar entlegensten Forschungsgebiete. Chemiker, Geologen und Physiker wurden veranlaßt, die Frage nach dem Alter der Welt, ihrer Entstehung und der Bildung der Elemente neu anzupacken. Entsprang unser Kosmos einem dichtgepackten strukturlosen Materiepaket?

Worauf beruhte Hubbles Behauptung? Die grundlegenden Beobachtungen wurden mit einem Instrument gemacht, ohne das es eine moderne Astrophysik nicht geben würde, dem Spektrographen. Er erlaubt, die Sternstrahlung in der vielfältigsten Weise zu untersuchen. Auf den Spektren der entfernten Spiralnebel bemerkt man die sonderbare Tatsache, daß die Fraunhoferschen Linien gegenüber ihrer Normallage nach dem roten Ende verschoben sind. Diese „Rotverschiebung“ wird um so größer, je weiter der Nebel von uns entfernt ist. Die nächstliegende Erklärung besteht in der Annahme, daß sich die Lichtquellen, also die Nebel, vom Beobachter fortbewegen. Man weiß seit langem, daß dies zu einer Rotverschiebung führen muß, was physikalisch gleichbedeutend ist mit einer Vergrößerung der Wellenlänge der Lichtstrahlen. Es gibt dazu übrigens ein bekanntes akustisches Gegenstück. Die Tonhöhe einer Lokomotivpfeife wird größer gegen ihren Wert bei stillstehender Maschine, wenn sie sich uns in rascher Fahrt nähert, und kleiner, wenn sie sich entfernt; die Wellenlänge des Schalls ändert sich gegen den Ruhewert. So wie mit den Schallwellen ist es auch mit den Lichtwellen. Der Betrag der Wellenlängenverschiebung ist der Geschwindigkeit genau proportional. Hubble stellte fest, daß die Geschwindigkeit der Nebel auch proportional zu ihrer Entfernung ist. Je weiter sie von uns entfernt sind, desto schneller bewegen sie sich.

Man darf daraus nicht etwa schließen, daß sich unser Milchstraßensystem im Mittelpunkt dieses auseinanderstrebenden Gebildes befindet. Die Lage läßt sich mit einem Gummiballon verständlich machen, auf dessen Oberfläche eine große Anzahl von Punkten gemalt sind. Beim

Aufblasen des Ballons würde ein Beobachter auf einem dieser Punkte zwar feststellen, daß alle übrigen sich von ihm entfernen, aber das gleiche Bild würde sich ihm auch von jedem anderen Punkt als Standort darbieten. Ähnlich ist es räumlich für einen Beobachter mit der gleichförmigen Ausdehnung des Universums.

Hubbles Beobachtungen führen zu einer eigenartigen Folgerung. Wenn man die Entfernungen der Sternsysteme von einem beliebigen Punkt, sagen wir der Erde, durch ihre jeweilige Fluchtgeschwindigkeit dividiert, kommt für alle Systeme die gleiche Zahl heraus. Diese Zahl bedeutet offenbar die Zeit, seit der sich der Nebel von dem Bezugspunkt entfernt. Die heute weit auseinanderstehenden Nebel sind also anscheinend alle im gleichen Augenblick von einem Punkt aus aufgebrochen. Der genannte Quotient ist das Alter des Universums, gemessen vom Augenblick des Aufbruchs.

Das Verfahren, das Weltalter zu bestimmen, scheint also grundsätzlich keine schwierige Aufgabe zu sein; es bedarf ja nur der Kenntnis der Entfernungen und der Fluchtgeschwindigkeiten einiger Nebel. Die Ermittlung der Geschwindigkeiten ist relativ einfach aus den Linienverschiebungen im Spektrum möglich. Praktisch erschwert wird die Aufgabe durch die große Lichtschwäche der weit entfernten Sternsysteme. Die Entfernungen werden vor allem aus der scheinbaren Helligkeit der Objekte berechnet. Und hier liegt die eigentliche Schwierigkeit. Ihre scheinbare Helligkeit wird nicht nur durch die Entfernung bestimmt, sondern auch durch die Rotverschiebung. Von der Zweifelhaftigkeit der stillschweigend gemachten Annahme einer Gleichheit der absoluten Helligkeit der Nebel—also der Helligkeit in einer Einheitsentfernung—soll zunächst abgesehen werden. Die Rotverschiebung bedeutet nämlich gleichzeitig eine Energieverminderung der Nebelstrahlung. Über die genaue Größe der erforderlichen Korrektur besteht noch keine völlige Klarheit. Mit den besten Werten für diese Korrektur sowie die Entfernungen und Geschwindigkeiten kommt ein Weltalter von etwa 10^9 Jahren heraus. Dieses Ergebnis ist unverträglich mit geologischen Erfahrungen; denn aus dem radioaktiven Zerfall mancher Stoffe muß für das Alter der Erdkruste wenigstens $2 \cdot 10^9$ oder mehr Jahre angenommen werden; ähnliche Zeiträume legen auch andere Beobachtungen nahe. Man sah sich daher genötigt, aus diesen und anderen Überlegungen heraus nach einem neuen Mechanismus zur Erklärung der Rotverschiebung in den Nebelspektren zu suchen. Sonstige Erfahrungen, die uns bei der Auffindung dieses Mechanismus helfen könnten, haben wir nicht. Stehen wir etwa am Vorabend der Entdeckung eines neuen Naturgesetzes? Kann das Licht altern?

Nun haben sich in allerjüngster Zeit einige Gesichtspunkte eröffnet, die vielleicht doch eine Lösung in gewohnten Begriffen ermöglichen. Bei der Hubbleschen Art, die Entfernungen aus den scheinbaren Helligkeiten

zu bestimmen, ist vorausgesetzt worden, daß die entfernteren Nebel in dem Augenblick, wo sie das heute beobachtete Licht aussandten, absolut genau so hell waren wie die näheren. Das Licht der entfernten Nebel wurde aber ganz erheblich früher ausgesandt als das der nächsten; Zeitdifferenzen von einigen Millionen oder Hundert Millionen von Jahren liegen dazwischen. Ist die Annahme erlaubt, daß die Nebel über eine so lange Zeit Konstanz ihres Lichtes bewahrt haben, sind sie nicht auch einer Entwicklung unterworfen? Wir erinnern uns, daß sie aus einer sehr großen Zahl von Einzelsternen und fein verteilter Materie zusammengesetzt sind. Daß Sterne eine Entwicklung durchlaufen, ist sicher. Sie sind nichts ewig Unveränderliches und sich selber Gleichbleibendes. Ihre Strahlung, die aus Atomkernreaktionen im Innern stammt, ist sicher nicht über Zeiträume, wie sie hier zur Diskussion stehen, konstant. Damit ist aber auch die Konstanz der Nebelhelligkeit in Frage gestellt. Wie Gamow kürzlich gefunden hat, genügt bereits ein Helligkeitsverlust von nur 5 % in 500 Millionen Jahren, um das Weltalter aus der Hubbleschen Methode so zu modifizieren, daß es mit geologischen und anderen astronomischen Erfahrungen vereinbar wird.

Dieser Ausweg enthält natürlich wieder ein neues Unsicherheitsmoment: Tempo und Richtung der Helligkeitsänderung. Es gibt aber bereits Beobachtungen, die seine Annahme befürworten. In den letzten Monaten sind äußerst sorgfältig durchgeführte Farbmessungen der entfernteren Nebel bekannt geworden, die eindeutig eine starke Rotverfärbung der Nebel ergaben, je weiter sie von uns entfernt sind. Rotverfärbung des Lichtes kann durch den bekannten Streuprozeß zustande kommen, der z. B. auch das Licht der Sonne oder des Mondes röter macht, wenn ihr Lichtweg in der Erdatmosphäre am Abend oder Morgen sehr lang wird. Dunst und Staub sind die Ursache. Man dachte zunächst an einen intergalaktischen Staub, der das Licht der Nebel um so mehr verfärbt, je mehr von ihm durchstrahlt werden muß. Rechnungen zeigten sehr bald, daß man ungeheuerere Mengen Materie im intergalaktischen Raum zulassen muß, um die Stärke der Rotverfärbung zu verstehen. Die Staubmasse müßte rund das 100fache der gesamten in den Sternsystemen vereinigten Masse betragen! Die Ansicht, daß das Licht der entfernten Nebel einfach deshalb röter ist, weil es im Augenblick der Emission röter war als das viel später emittierte der nahen Nebel, erscheint näherliegend. Junge Sternsysteme enthalten vielleicht mehr rote Sterne als alte Systeme. Die so heftig umstrittene Expansionshypothese fände also einen ziemlich konservativen Weg zu ihrer Rettung.

In engem Zusammenhang mit dem Expansionsprozeß des Weltalls steht die Frage nach der Herkunft der chemischen Elemente. Haben sie von Anfang an bestanden, oder haben sie sich erst im Laufe der Zeit gebildet und unter welchen Bedingungen? Die Zusammensetzung der Fixsterne aus den chemischen Elementen ist praktisch dieselbe wie die

der Sonne und der Erde. Die Synthese der Elemente ist also ein kosmisches Problem. Warum ist z. B. Wasserstoff, Sauerstoff und Eisen so viel häufiger als Silber, Quecksilber oder Platin?

Als Baumaterial der Atomkerne sind Protonen (Wasserstoffkerne) und Neutronen anzusehen. Irgendwie müssen sie sich zu komplizierteren Atomen zusammengefügt haben. In dem heißen Sterninnern spielen sich auch heute noch Kernprozesse ab, die den Aufbau höherer Elemente aus Wasserstoff darstellen. Sie liefern die Energie zur Deckung der Sternstrahlung. Aber beteiligt sind nur die leichteren Elemente des periodischen Systems, Wasserstoff und Helium, als Katalysatoren auch Stickstoff und Kohlenstoff. Für die Bildung der schwereren Atomkerne sind Temperaturen notwendig, wie sie heute nirgends mehr im Weltall zu herrschen scheinen. Man hat abgeschätzt, daß die erforderliche Temperatur und Dichte nur existiert haben kann, wenn die gesamte Materie des bekannten Weltalls einmal auf ein Volumen vom Radius des 20-Fachen des Sonnensystems zusammengedrängt gewesen ist. Heutzutage findet sich in diesem Volumen außer der Sonne mit ihren Planeten kein einziger weiterer Stern, und auf diesem engen Raum sollen also einmal nicht nur alle Sterne des Milchstraßensystems, sondern auch die vielen Millionen anderer Sternsysteme vereinigt gewesen sein! Das Bild erinnert an die Hypothese vom Riesenmolekül als Anfangsphase des Weltalls, die Lemaître aufgestellt hat. Da die Packung der Sterne und Milchstraßen heute nicht mehr so dicht ist, muß Expansion zu ihrer Auflockerung geführt haben. Seitdem kann sich durch Neubildung keine grundlegende Änderung der Häufigkeitsverhältnisse mehr eingestellt haben. Eine Ausnahme bilden nur die Elemente, bei denen Radioaktivität auftritt. Diese sind im Laufe der Zeit in mehr oder weniger stabile Elemente zerfallen. Beispielsweise besteht natürliches Uran aus Isotopen mit den Atomgewichten 235 und 238. So wie es heute gefunden wird, sind 0,7 % U 235, der weitaus überwiegende Bruchteil ist U 238. Die Arbeitshypothese, daß im Anfang beide Uranarten gleichhäufig waren, ist nicht von der Hand zu weisen. U 235, dessen Anreicherung in der Atombombe beim Zerfall gewaltige Energiemengen freisetzt, zerfällt in 700 Millionen Jahren zur Hälfte, U 238 benötigt 4600 Millionen Jahre. Eine einfache Rechnung zeigt, daß zur Einstellung des heutigen Häufigkeitsverhältnisses beider Isotopen etwa $4 \cdot 10^9$ Jahre benötigt wurden. Andere Elemente führen auf Zeiten der gleichen Größenordnung, die wiederum mit der des Weltalters aus der Expansionsvorstellung übereinstimmt.

Gamow glaubt, daß die Urmaterie des Weltalls ein Neutronengas gewesen ist, das unter so ungeheurer Dichte und Temperatur stand, daß die Geschwindigkeiten, mit denen die Neutronen durcheinander rasten, die Bildung stabiler Kernverbände verhinderten. Der Augenblick des

Beginns der Expansion brachte eine Abkühlung. Bei etwa 1 Milliarde Grad Temperatur setzten sich die Neutronen zu Atomkernen zusammen. Um stabil zu sein, müssen ihre Bestandteile etwa zur Hälfte eine elektrische Ladung tragen. Ein Teil der Neutronen stieß negative Elektronen ab, und ein positiv geladener Kernverband blieb zurück. Die Elektronen umkreisen in geschlossenen Bahnen die Kerne, schirmen das Kernfeld nach außen ab und täuschen ein elektrisch neutrales Gebilde vor. Atome, wie wir sie heute kennen, waren entstanden.

Die beobachtete Häufigkeitsverteilung der Elemente kann Gamow recht befriedigend aus seinen Vorstellungen ableiten. Seine Rechnungen über Temperatur- und Druckverlauf in der entscheidenden Anfangsphase der Expansion haben ein staunenerregendes Ergebnis. 5 Minuten nach Beginn der Ausdehnung begann der Aufbau der Elemente, 10 Minuten später war er im wesentlichen abgeschlossen, und von nun an hat sich die Häufigkeitsverteilung, also z. B. die Zahl der Goldatome im Verhältnis zur Zahl der Eisenatome nicht mehr wesentlich geändert, sondern blieb in den darauffolgenden zwei, drei oder vier Milliarden Jahren dieselbe.

Die Gamowsche Theorie wird eine kräftige Kritik aushalten müssen. Sie ist bemerkenswert konservativ und vermeidet weitgehend die Heranziehung ganz neuer und bisher unbekannter Prozesse und Vorstellungen. Viele Fragen bleiben offen: Warum begann das Neutronenkondensat sich auszudehnen? Was veranlaßte die Elektronen, sich von einem Teil der Neutronen abzuspalten?

Es scheint heute so, daß unsere derzeitige Physik einer grundsätzlichen Erweiterung bedarf, wenn wir uns räumlich oder zeitlich aus der Gegenwart von den Dingen unserer unmittelbaren Wahrnehmung weit entfernen. In diesem Sinne wäre unsere Physik nur ein Spezialfall einer weit umfassenderen, die man etwa als „kosmologische Physik“ bezeichnen könnte, ähnlich wie die klassische Physik in der quantentheoretischen eingeschlossen liegt.