



FRIEDEMANN

DAS WELTALL

Dr. Christian Friedemann

DAS WELTALL

Eine moderne Kosmogonie

Urania-Verlag Leipzig · Jena · Berlin

Lektor: Ewald Oetzel

3., bearbeitete Auflage 1973 · 13.—22. Tausend

Alle Rechte vorbehalten

Copyright 1969 by Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur

VLN 212-475/36/73 · ES 18 D1/D4

Einband: Helmut Selle/Hans-Jörg Sittauer

Typografie: Hans-Jörg Sittauer

Zeichnungen: Hasso Seyferth

Fotos: Karl-Schwarzschild-Observatorium, Tautenburg (8); APN, Berlin (1); VEB F. A. Brockhaus Verlag, Leipzig (1); Archiv des Autors (1); NASA (1)

Farbfoto auf der Titelseite:

Planetarischer Nebel Messier 27 „Hantel“nebel im Sternbild Fuchs. Der bläuliche Stern in der Mitte hat ein fortgeschrittenes Stadium seiner Entwicklung erreicht. In ihm geht von dem sehr heißen Stern ein Gasstrom in den umgebenden Raum aus. Durch die intensive Ultraviolettstrahlung wird das Gas zum Leuchten angeregt. (Phot. U. S. Naval Observatory)

Satz und Druck: Gutenberg Buchdruckerei, Weimar

Buchbinderische Verarbeitung: Nationales Druckhaus Berlin,

VOB National, Betriebsteil Buchbinderei Leipzig

Printed in the German Democratic Republic

Bestellnummer 653 134 1

EVP 6,80

Einleitung

Innerhalb der Astronomie nimmt die Kosmogonie, die Lehre von der Entstehung und Entwicklung der Himmelskörper, eine besondere Stellung ein, weil in diesem Fachgebiet praktisch das gesamte astronomische und astrophysikalische Wissen verarbeitet wird. Fortschritte auf dem Gebiet der Kosmogonie stellen sich immer dann ein, wenn unsere Erkenntnisse auf astrophysikalischen Teilgebieten — sei es durch neue Beobachtungen oder die Entdeckung neuer Gesetzmäßigkeiten — bereichert werden. Dieser Prozeß bewirkt eine ständige Erweiterung unserer wissenschaftlichen Kenntnisse und damit ein immer besseres Verständnis der wahren Zusammenhänge im Naturgeschehen.

Die Quelle unseres Wissen ist stets die unendlich komplizierte *Materie*, die außerhalb unseres Bewußtseins und unabhängig von ihm existiert. Da sie in ständiger Veränderung begriffen ist, in einer unendlichen Vielfalt objektiver Beziehungen in Erscheinung tritt, ist sie in ihrer Mannigfaltigkeit unerschöpflich. Jede neue Entwicklung bereichert unser Wissen über die Gesetzmäßigkeiten und Zusammenhänge dieser objektiven Realität. Sie ist ein Beitrag zu der Erkenntnis, daß allen Zusammenhängen und Wechselwirkungen innerhalb der materiellen Welt immer und überall materielle Ursachen zugrunde liegen. Es ist verständlich, daß auf solchen Gebieten, auf denen zur Zeit nur mangelhafte oder gar keine Erkenntnisse vorliegen, zu vernünftig erscheinenden Annahmen gegriffen wird, um überhaupt kosmogonisch arbeiten zu können. Die Aufnahme von begründeten Hypothesen bringt allerdings in gewisser Hinsicht Unsicherheiten — anders gesagt: Wahrscheinlichkei-

ten — in die Untersuchungsergebnisse hinein. Auf der Grundlage der in die theoretischen Untersuchungen eingehenden Voraussetzungen lassen sich Gesetzmäßigkeiten über die vermutliche Entwicklung ableiten, die sich mit den Beobachtungen und den uns bekannten Naturgesetzen in Einklang befinden; es ist aber nicht anzunehmen, daß diese die einzigen in der Natur wirkenden sind. Erst neue Beobachtungen sind dann unter Umständen in der Lage, zu anderen Gesichtspunkten zu führen, wobei eventuell von den vorher betrachteten Entwicklungsmöglichkeiten einige ausgeschlossen werden müssen, die Weiteruntersuchung anderer dagegen erfolgversprechend erscheint.

Wir entnehmen aus diesen Überlegungen, daß die zu untersuchenden Objekte nicht allein auf direktem Wege mittels der Geräte und durch die Systematisierung der Erfahrungen und Beobachtungen der menschlichen Erkenntnis zugänglich werden, sondern daß vor allem durch Hypothesen, durch Modelle und Analogien, durch theoretische Analysen Schlußfolgerungen auf die objektiven Gesetze möglich sind. Mit Hilfe der Instrumente und Geräte werden dann die Hypothesen überprüft, bestätigt, ergänzt oder auch verworfen. Dabei greift der Mensch immer bewußter in die Natur ein, um sie zu erkennen. Die auf diesem Wege erschlossenen Gesetzmäßigkeiten charakterisieren objektive materielle Zusammenhänge, die — ohne Ausnahme — zu anderen materiellen Zusammenhängen in Wechselbeziehungen stehen. Diese Feststellung macht noch einmal deutlich, daß sich nicht nur die objektive Realität in ständiger dialektischer Entwicklung befindet, sondern daß auch der menschliche Erkenntnisprozeß der gleichen Dialektik unterworfen ist und demzufolge einen komplizierten „Prozeß des Vordringens von der Erscheinung zum Wesen“ darstellt. Entsprechend dem unendlich komplizierten Charakter der zu erforschenden materiellen Prozesse erlangt auch der Erkenntnisprozeß eine immer größere Kompliziertheit. Das sichere Fundament allen Forschens ist allein die aus dem Materiebegriff des dialektischen Materialismus abgeleitete Gewißheit, daß es keine Grenzen der Erkenntnis gibt.

Die unzerstörbare materielle Einheit der Welt stellt sich in

einer unendlichen Vielfalt und Mannigfaltigkeit der Erscheinungen dar, von denen jede mit anderen räumlich und zeitlich zusammenhängt. Diese Determiniertheit ist ein wesentliches Argument für den objektiven Charakter aller Naturgesetze. Vor allem aber ergibt sich daraus, wie entscheidend die Anerkennung der These von der Materialität der Welt und von der Unerschöpflichkeit der Materie auch für die Theorien über die Entstehung und Entwicklung der Himmelskörper ist.

In der astrophysikalischen Forschung der Gegenwart nimmt die Kosmogonie einen wichtigen Platz ein. So konnten gerade in den letzten beiden Jahrzehnten bedeutende neue Erkenntnisse auf diesem Gebiet erzielt werden. Daran hatten die etwa zur gleichen Zeit erreichten Fortschritte der Kernphysik und nicht zuletzt die Entwicklung von leistungsfähigen elektronischen Rechenmaschinen entscheidenden Anteil. Erst deren Einsatz in der Astronomie schuf die Grundlage für die numerische Behandlung der komplizierten mathematischen Probleme der Kosmogonie. Mit Hilfe der Rechenautomaten ist man heutzutage in der Lage, Entwicklungsprobleme innerhalb von Stunden oder Tagen durchzurechnen, für die noch vor einigen Jahren Gruppen von geschulten Rechnern mit herkömmlichen elektrischen Tischrechenmaschinen Jahre benötigt hätten. Die moderne Technik ermöglicht es, modellmäßig die Entwicklung der Sterne, die sich in der Natur über Zeiträume von der Größenordnung Jahrmillionen bis Jahrmilliarden erstreckt, in kurzen Zeiträumen nachzuvollziehen. Ein entscheidendes Problem der gegenwärtigen, aber auch der zukünftigen Forschung besteht in dem Vergleich der theoretisch gewonnenen Ergebnisse mit dem vorliegenden Beobachtungsmaterial. Nur dieser Vergleich erlaubt Rückschlüsse darüber, ob eine Modellvorstellung grundsätzlich richtig ist und — falls das zutrifft — in welcher Weise sie vervollkommen werden kann. Diesem geforderten Vorgehen stellt sich allerdings ein Hindernis entgegen. Es besteht darin, daß die kosmischen Entwicklungsvorgänge mindestens in einem Zeitraum von Jahrmillionen ablaufen. Deshalb stellt der beobachtbare Zustand der Himmelskörper nur ein Momentanbild ihres gegenwärtigen Entwicklungszustandes dar. Daran ändert auch die

Tatsache nichts, daß die ältesten uns überlieferten Beobachtungen einige tausend Jahre alt sind. Abgesehen von der geringen Genauigkeit dieser Beobachtungen, reicht der überdeckte Zeitraum immer noch nicht aus, nachweisbare Effekte, die durch die Sternentwicklung verursacht sind, hervorzubringen. Es ist aber gelungen, aus dieser zunächst recht schwierig erscheinenden Situation einen Ausweg zu finden. Die Darlegung der dazugehörigen Gedankengänge soll jedoch erst im Zusammenhang mit der Betrachtung der Kosmogonie der Sterne erfolgen.

Bei der Gegenüberstellung der gegenwärtig existierenden Theorien zur Entstehung des Planetensystems, der Sterne und der Sternsysteme ist der sehr unterschiedliche Erkenntnisstand nicht zu verkennen. Es stellt in gewissem Sinne ein Maß für den Schwierigkeitsgrad der verschiedenen kosmogonischen Hypothesen dar. Eine bedeutende Rolle spielt auch die Tatsache, daß die Möglichkeiten einer Überprüfung der theoretischen Ergebnisse durch die Beobachtung zum Teil erheblich eingeschränkt sind.

Die in der jüngeren Vergangenheit erreichten Fortschritte auf dem Gebiet der Kosmogonie ermutigen uns, auf den eingeschlagenen Wegen weiterzuforschen. Trotz allem ist eine wohlbegründete Vorsicht bei allen kosmogonischen Ergebnissen und Schlußfolgerungen auch jetzt noch geboten, denn sie beruhen auf mehr oder weniger einschneidenden Annahmen, deren Rechtfertigung teilweise noch aussteht.

In den ersten Kapiteln wird einiges Grundlagenwissen vermittelt, dessen Kenntnis für die teilweise komplizierten astrophysikalischen Betrachtungen nützlich ist. Es bleibt jedoch dem Ermessen des Lesers überlassen, diese einleitenden Abschnitte zu überspringen und sofort zur eigentlich kosmogonischen Thematik überzugehen.

Die auftretenden Zahlenwerte wurden zum größten Teil in den Einheiten des internationalen Einheitensystems oder den gebräuchlichen astronomischen Maßeinheiten ausgedrückt. Verschiedentlich wurden durch Vorsätze von dezimalen Vielfachen oder Teilen an diese Einheiten andere Benennungen gebildet, die dem jeweiligen Anwendungsfall besser angepaßt sind.

Mathematische, physikalische und astronomische Grundlagen

Große und kleine Zahlen

Die sprichwörtlichen „astronomischen Zahlen“ entstanden zu einer Zeit, in der die Astronomie für sich das alleinige Recht in Anspruch nehmen konnte, mit außerordentlich großen Zahlen arbeiten zu müssen. Heutzutage haben die großen Zahlen auch im täglichen Leben einen mehr oder weniger unbemerkten Einzug gehalten. Die „technischen und physikalischen“ Zahlen — wir brauchen nur etwa an die enormen Leistungen moderner Kraftwerke oder Teilchenbeschleuniger zu denken — halten dem Vergleich mit den „astronomischen“ Zahlen durchaus stand. Allerdings wird oft übersehen, daß in der Astronomie auch extrem kleine Zahlen vorkommen. Im Verlauf der Darstellung der Entwicklungsvorgänge im Weltall werden uns immer wieder große und kleine Zahlen begegnen, die, wenn man sie in der üblichen Weise schreiben würde, nicht nur sehr viel Platz beanspruchen, sondern in dieser Form für numerische Rechnungen unhandlich wäre. Daher empfiehlt es sich, nach vorhandenen Möglichkeiten zu suchen, die solche Zahlen in kurzer Form darzustellen gestatten. Eine der sich bietenden Möglichkeiten besteht in der Potenzschreibweise, die wir uns in Erinnerung rufen wollen. Verständlicherweise müssen wir in diesem Buch darauf verzichten, auf die in der Potenzrechnung gültigen Rechengesetze einzugehen; wir wollen sofort den Versuch machen, einige uns vertraute Zahlen in die neue Gestalt überzuführen.

Man sieht leicht ein, daß die Zahl 1251 auch als Produkt $1,251 \cdot 1000$ geschrieben werden kann. Darüber hinaus läßt sich der Faktor 1000 in das dreifache Produkt $10 \cdot 10 \cdot 10$ zerlegen. An dieser Stelle beginnt unsere Vereinfachung: Wir schreiben

dieses dreifache Produkt *gleicher* Faktoren nicht mehr aus, sondern verwenden hierfür die Schreibweise 10^3 (sprich: „zehn hoch drei“). Sie besagt, daß der angegebene Faktor — die Zahl 10 — dreimal mit sich selbst zu multiplizieren ist. Mit dieser Abkürzung erhält die Zahl 1251 ihre endgültige Form $1,251 \cdot 10^3$. In gleicher Weise lassen sich die ebenfalls willkürlich herausgegriffenen Zahlen 286 und 354000 in $2,86 \cdot 10^2$ und $3,54 \cdot 10^5$ umschreiben.

Beim Vergleich der hochgeschriebenen Zahl, dem Exponenten, mit der Zahl der Nullen des ausgeschriebenen zweiten Faktors (1000, 100 bzw. 100000) fällt auf, daß sie jedesmal übereinstimmen. Allgemein läßt sich hieraus eine Regel ableiten, die besagt, daß der Exponent angibt, wievielmals die 10 mit sich selbst zu multiplizieren ist. Auf diese Art kann jede Zahl, die größer ist als 10, in eine kurze Form gebracht werden. Für Zahlen kleiner als 1, zum Beispiel 0,055 oder 0,0004, gilt eine analoge Regel. Diese Zahlen lassen sich ebenfalls in Produkte der Art $5,5 \cdot 0,01$ bzw. $4,0 \cdot 0,0001$ zerlegen. Darüber hinaus können die zweiten Faktoren in Brüche

$$1/10 \cdot 1/10 = 1/10^2 \text{ und } 1/10 \cdot 1/10 \cdot 1/10 \cdot 1/10 = 1/10^4$$

umgeformt werden. Damit entsteht die schon bekannte Potenzschreibweise, wobei allerdings neu ist, daß sich die potenzierte 10 noch unter dem Bruchstrich befindet. Man hat jedoch vereinbart, die Zehnerpotenz über den Bruchstrich zu schreiben, wenn man den Exponenten mit einem negativen Vorzeichen versieht. Auch diese Regel soll — ohne Beweis — der Potenzrechnung entnommen werden. Die Beispielzahlen erhalten somit ihre endgültige Form $5,5 \cdot 10^{-2}$ und $4,0 \cdot 10^{-4}$. Als Regeln kann man sich merken: Die Anzahl der Nullen vor der ersten von Null verschiedenen Ziffer ist gleich der Größe des Exponenten der Zahl 10, der jetzt allerdings negativ ist. Die bisher noch nicht berücksichtigten Zahlen zwischen 1 und 10 lassen sich in Potenzschreibweise dadurch ausdrücken, daß der Exponent der Grundzahl 10 vereinbarungsgemäß eine Null sein soll ($3,14 = 3,14 \cdot 10^0$).

Eine andere, weit verbreitete Darstellung von Zahlen besteht in ihrer Verwandlung in Logarithmen. Unter den vielen mög-

lichen Logarithmensystemen ist das dekadische System am gebräuchlichsten. Der mit Hilfe einer Logarithmentafel bestimmbare Logarithmus einer Zahl stellt den Exponenten der Grundzahl dar, welcher angibt, wievielmals sie mit sich selbst multipliziert werden muß, um die Ausgangszahl zu erhalten. Im Gegensatz zu den Exponenten in der Potenzschreibweise sind die Logarithmen im allgemeinen keine ganzen Zahlen. Aus der vor dem Komma stehenden Zahl, der sogenannten Kennziffer, läßt sich ähnlich wie bei der Potenzdarstellung der Zahlen die Größenordnung der logarithmierten Zahl ablesen. Als Regel hierfür gilt: Die Kennziffer ist um 1 kleiner als die Anzahl der Ziffern, die bei der entlogarithmierten Zahl vor dem Komma stehen würden. Eine positive Kennziffer bedeutet, daß die Zahl größer als Eins ist; dagegen drückt ein negatives Vorzeichen aus, daß sie kleiner ist als Eins. Falls die Zahl kleiner als Eins ist, dann gibt der Betrag der Kennziffer die Anzahl der Nullen an, mit denen der Dezimalbruch beginnt; d. h. die Null vor dem Komma ist mitzuzählen.

Die der Kennziffer nachgestellte Zahl, die Mantisse, charakterisiert eindeutig die Ziffernfolge der logarithmierten Zahl. Die Mantisse kann aus den Logarithmentafeln abgelesen werden. Die schon bei der Darstellung der Potenzschreibweise verwendeten Zahlen 1251 und 3,14 sowie 0,0004 haben logarithmiert folgendes Aussehen: $\log 1251 = 3,0972$, $\log 3,14 = 0,4969$ und $\log 0,0004 = 0,6021 - 4$ oder $-3,3979$.

Entsprechend den Erfordernissen werden wir in den nachfolgenden Kapiteln wahlweise von beiden Möglichkeiten der Zahlendarstellung Gebrauch machen.

Strahlungsgesetze

Es ist aus Laboruntersuchungen bekannt – und dieser Sachverhalt stimmt mit den theoretischen Ergebnissen überein –, daß von jedem Körper eine elektromagnetische Strahlung ausgeht. Ihre Intensität und spektrale Energieverteilung hängt von der absoluten Temperatur des Körpers und seiner stofflichen Beschaffenheit ab. Bereits G. R. Kirchhoff erkannte, daß Körper mit großem Absorptionsvermögen auch ein großes

Emissionsvermögen besitzen. Die Fähigkeit eines Körpers, Strahlung zu „verschlucken“, ist also gleichbedeutend mit der, sie wieder abzustrahlen. Auf Grund dieses Sachverhaltes läßt sich die Vorstellung eines idealen Körpers entwickeln, der die besondere Eigenschaft hat, die einfallende elektromagnetische Strahlung aller Wellenlängen vollständig zu absorbieren und in Wärme umzuwandeln. Einen solchen Körper bezeichnet man als ideal schwarz oder auch als schwarzen Körper. Berußte oder mit schwarzem Samt überzogene Gegenstände erfüllen diese Forderung nur unvollkommen. Dagegen läßt sie sich durch Hohlkörper aus wärmebeständigen Material gut verwirklichen. Werden die nach außen wärmeisolierten Wände beheizt, so läßt sich durch eine Öffnung in einer der Wände eine Strahlung beobachten, die mit der eines schwarzen Körpers identisch ist. Diese Strahlung wird auch als *Hohlraumstrahlung* bezeichnet. Ihre Energieverteilung ändert sich mit der Temperatur der Wände des Hohlraumes.

Unter bestimmten Voraussetzungen gelang es M. Planck, theoretisch ein Strahlungsgesetz abzuleiten, das die Laboratoriumsmessungen an Hohlraumstrahlern exakt wiedergibt. Das nach ihm benannte Strahlungsgesetz besagt, daß die von einem schwarzen Körper emittierte Energie aus Strahlung *aller* Wellenlängen besteht. Man spricht in diesem Fall von einem kontinuierlichen Spektrum. Die Energieabgabe eines schwarzen Körpers erreicht bei einer durch seine Temperatur bestimmten Wellenlänge einen Maximalwert. Wie bereits M. Wien auf experimentellem Wege fand, verschiebt sich dieses Maximum mit wachsender Temperatur nach immer kürzeren Wellenlängen. So liegen zum Beispiel die Energiemaxima eines schwarzen Körpers, dessen Temperaturen $1 \cdot 10^3$ °K, $5 \cdot 10^3$ °K und $1,5 \cdot 10^4$ °K betragen sollen, im infraroten, sichtbaren (gelben) bzw. ultravioletten Spektralbereich.

Die Summation der in den einzelnen schmal zu wählenden Wellenlängenbereichen abgestrahlten Energie ergibt die von einem schwarzen Körper emittierte Gesamtenergie. Sie hängt nur von seiner Temperatur ab und steigt mit der vierten Potenz der Temperatur an. Dieses Gesetz trägt nach seinen Entdeckern den Namen Stefan-Boltzmannsches-Gesetz. Die Strah-

lungsgesetze von M. Planck sowie von J. Stefan und L. Boltzmann sowie das Wiensche Verschiebungsgesetz haben für die Astrophysik große Bedeutung, weil die Fixsterne näherungsweise als *schwarze Strahler* aufgefaßt werden können.

Atome, ihre Kerne, Elektronenhüllen und Eigenschaften

Die moderne Astrophysik wäre ohne die Kenntnisse auf dem Gebiet der Kernphysik und der Quantentheorie nicht denkbar. Deshalb soll, zumindest ganz kurz, auf einige wichtige Eigenschaften der Atome und ihre Wechselwirkung mit der Strahlung eingegangen werden.

Um die Jahrhundertwende entwarfen aus den damals bekannten experimentellen Daten J. J. Thomson, E. Rutherford und N. Bohr die ersten Atommodelle, die jedoch die Beobachtungen nur bis zu einem gewissen Grade erklären konnten. Trotzdem wurde das Bohrsche Atommodell in der Folgezeit sehr populär. Es stellt ein auf atomare Größenverhältnisse verkleinertes Planetensystem dar. Um den als Zentralkörper wirkenden Atomkern bewegen sich die Elektronen ähnlich wie die Planeten um die Sonne. Die Beobachtungstatsache, daß fast die gesamte Masse des Atoms in seinem Kern vereinigt ist, wurde in dem Bohrschen Atommodell berücksichtigt. Die Anzahl der im Normalfall um den Atomkern kreisenden Elektronen ist für jedes chemische Element charakteristisch.

Nachfolgend sollen am Beispiel des Wasserstoffatoms einige der wesentlichen Eigenschaften der Atome besprochen werden. Das leichteste chemische Element, der Wasserstoff, hat einen sehr einfachen Atomaufbau. Der Kern des normalen Wasserstoffatoms besteht nur aus einem Proton p , dessen Ruhemasse $1,6723 \cdot 10^{-24}$ g beträgt. Außerdem verfügt das Proton über eine Ladung von $1,602 \cdot 10^{-19}$ As. Um das Proton bewegt sich unter normalen Bedingungen ein Elektron e^- in einem Abstand von $5,3 \cdot 10^{-9}$ cm und einer Geschwindigkeit von $2,19 \cdot 10^3$ km/s. Seine Ruhemasse beträgt nur etwa ein Zweitausendstel der Protonenmasse, nämlich $9,108 \cdot 10^{-28}$ g, daneben hat es eine Ladung von $-1,602 \cdot 10^{-19}$ As. Die negative elektrische La-

derung des Elektrons und die positive Kernladung kompensieren sich, so daß das Atom nach außen hin neutral ist.

Beim Vergleich der Atommassen anderer Elemente mit dem des Wasserstoffs zeigt sich, daß die Mehrzahl von ihnen um ein fast ganzzahliges Vielfaches schwerer ist als ein Wasserstoffatom. Die naheliegende Vermutung, daß diese Atome allein aus Wasserstoffkernen, also Protonen bestehen, erweist sich jedoch aus mehreren Gründen als unzutreffend. Tatsächlich erklärt sich die Ganzzahligkeit der Atommassen daraus, daß die Atomkerne dieser Elemente aus Protonen und den fast gleichschweren Neutronen n aufgebaut sind, deren Masse $1,6746 \cdot 10^{-24}$ g beträgt. Wie bereits ihr Name andeutet, besitzen die Neutronen keine elektrische Ladung. Die gegenseitigen Abstände der Protonen und Neutronen in einem Atomkern können bis zu 10^{-12} cm betragen. Bei dieser dichten Packung der auch als Nukleonen bezeichneten Kernbausteine treten Kernkräfte auf, die die elektrostatischen Abstoßungskräfte der gleichgeladenen Protonen weit übertreffen. Mit wachsendem Abstand vom Atomkern sinkt allerdings die Stärke der Kernkräfte sehr rasch ab; dafür sind dann die von den Protonen ausgeübten elektrostatischen Kräfte wirksam. So tritt beispielsweise beim Beschuß von Atomkernen mit positiv geladenen Teilchen im allgemeinen eine Abstoßung durch das elektrostatische Feld des Kerns ein, bevor die stoßenden Teilchen in den Kern eindringen, es sei denn, sie haben außerordentlich hohe Energien. Im Gegensatz dazu können sich die Neutronen dem Kern nähern, ohne eine Abstoßung zu erleiden, bis sie in den Bereich der Kernkräfte gelangen und vom Kern „eingefangen“ werden.

Die zwischen den Nukleonen wirkenden Kernkräfte sind weder durch elektrische oder magnetische Eigenschaften noch durch die Masse des Atomkerns bestimmt.

Die gegenwärtig diskutierten Kernmodelle wurden unter den Bezeichnungen „Tröpfchenmodell“ und „Schalenmodell“ bekannt. Wie entsprechende Experimente nahelegen, ist es möglich, sich die Kernmaterie eines Atomkerns als einen Flüssigkeitstropfen vorzustellen. Aus ihm können – wie bei Flüssigkeiten – Teilchen „verdampfen“, falls es gelingt, durch Zufuhr einer hinreichend hohen Energie die Kernkräfte zu überwinden.

Die Analogie zu Flüssigkeiten wird auch durch die Tatsache unterstrichen, daß die Kernmaterie aller chemischen Elemente nahezu die gleiche Dichte besitzt.

Beim Beschuß von Atomkernen mit positiv geladenen Teilchen zeigen die Beobachtungen, daß die Kerndurchmesser gleichmäßig beim Übergang von den leichten zu den schwereren Elementen anwachsen. Wird dagegen das Experiment mit Neutronen ausgeführt, so ergeben sich für die Atome von verschiedenen Elementen sehr unterschiedliche Einfangsquerschnitte. Diese Schwankungen der Neutronenquerschnitte lassen sich am besten durch die Annahme einer schalenförmigen Anordnung der Nukleonen im Atomkern verstehen.

Bei diesen Betrachtungen darf nicht übersehen werden, daß auch die modernen Kernmodelle nur Annäherungen an die tatsächliche Natur der Atome sind. In dem Maße, in dem sich die theoretischen Kenntnisse erweitern, erlangt der Mensch auch eine immer exaktere Vorstellung der objektiven Prozesse. Außerdem ist zu beachten, daß je nach Art der Experimente, denen die Nukleonen und Elektronen unterworfen werden, ihr Teilchen- bzw. ihr Wellencharakter zu beobachten ist.

Zur kurzen Charakterisierung eines Atomkerns genügt es, die Anzahl der in ihm enthaltenen Protonen unten und die Anzahl aller Nukleonen im Kern oben vor das Symbol des betreffenden chemischen Elementes zu schreiben. Auf diese Weise läßt sich zum Beispiel ein gewöhnlicher Wasserstoffkern durch die Angabe ${}^1_1\text{H}$ eindeutig kennzeichnen. Die entsprechende Bezeichnung für einen Heliumkern lautet ${}^4_2\text{He}$. Hieran ist ersichtlich, daß dieser Heliumkern aus 2 Protonen und 2 Neutronen aufgebaut ist. Häufig werden die im übrigen recht stabilen Heliumkerne auch als Alphateilchen (α -Teilchen) bezeichnet.

Entsprechend der Zahl der im Kern enthaltenen Protonen beträgt die positive Gesamtladung ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung. Diesbezügliche Messungen von G. J. Moseley ergaben, daß die Zahl der in den Atomkernen enthaltenen elektrischen Elementarladungen identisch mit der Ordnungszahl des betreffenden Elements im Periodensystem ist. Es kommt auch vor, daß in Atomkernen mit gleicher Protonenzahl die Anzahl der Neutronen verschieden ist. Solche

Atomkerne gehören dann demselben chemischen Element an, besitzen aber eine unterschiedliche Kernmasse. Derartige Varianten im Atomaufbau innerhalb eines Elements werden als Isotope bezeichnet.

Außer den massereichen Kernbausteinen, den Protonen und Neutronen, und den in der Atomhülle befindlichen Elektronen sind gegenwärtig mehr als 70 weitere Elementarteilchen bekannt. Der Begriff „Elementarteilchen“ wurde allerdings zu einer Zeit geprägt, als noch die Meinung bestand, daß sich diese Teilchen nicht weiter zerlegen lassen. Tatsächlich trifft das nur für die Protonen p , Elektronen e^- , Positronen e^+ und Neutrinos ν zu. Das Positron besitzt die Ruhemasse des Elektrons, ist aber positiv geladen. Außer bei den vier aufgeführten Teilchen, deren Lebensdauer praktisch unbegrenzt ist, lassen sich bei allen Elementarteilchen „Umwandlungsprozesse“ feststellen. Erfolgt zum Beispiel eine „Begegnung“ zwischen einem Elektron und einem Positron, wird die Ruhemassenenergie beider Teilchen in Strahlungsenergie umgewandelt. Diesen Vorgang bezeichnet man als „Paarvernichtung“. Es wird auch der umgekehrte Vorgang beobachtet, bei dem beim Zusammenreffen von Protonen mit Photonen Elektronen und Positronen entstehen. Man spricht in diesem Falle von „Paarerzeugung“. Das zu den Elementarteilchen gerechnete Neutron zerfällt in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino. Der experimentelle Nachweis des Neutrinos und Antineutrinos, deren Ruhemasse weniger als 10^{-30} g beträgt, vielleicht sogar Null ist, war recht schwierig.

Die Neutrinos treten nur in sehr geringem Maße mit anderen Elementarteilchen in Wechselwirkung. Daher können sie ungehindert dicke Schichten durchdringen, zum Beispiel sogar den gesamten Erdkörper. Eine künftige „Neutrinoastronomie“ würde auf Grund dieser Eigenschaft in die Lage versetzt, sogar bis in das Zentrum der Sterne zu „sehen“, was mit den gebräuchlichen optischen Hilfsmitteln prinzipiell unmöglich ist. Die in der Natur spontan vorkommenden Umwandlungen von Elementarteilchen, aber auch von Atomkernen lassen sich im Laboratorium reproduzieren. Hierfür sind jedoch sehr teure Teilchenbeschleuniger erforderlich. In ihnen wird den zum

Versuch verwendeten Elementarteilchen eine so hohe Energie vermittelt, daß sie mit Atomen, die als „Ziel“ dienen, reagieren können. An den dadurch ausgelösten Prozessen lassen sich die Eigenschaften der Kernbausteine und anderer Elementarteilchen studieren. Ein ähnliches Laboratorium, allerdings in kosmischen Ausmaßen, stellen die mittelpunktsnahen Gebiete der Sterne dar. Dort findet unter den vorherrschenden extrem hohen Temperaturen fortwährend eine große Anzahl atomarer Stoßprozesse statt, die auch zu Kernumwandlungen führen. Durch sie wird laufend die Energiemenge freigesetzt, die ein Stern während seiner zeitlich am längsten dauernden Entwicklungsstadien in den Weltraum abstrahlt. Kommt es dabei zu Veränderungen der Effektivität der atomaren Energiequellen, etwa dadurch, daß sich der „Brennstoff“ erschöpft, so wirken sich diese einschneidend auf die innere „Konstitution“ des Sterns aus. Sämtliche Änderungen des inneren Aufbaus eines Sterns und aller damit zusammenhängenden Erscheinungen sind ein Ausdruck für die „Sternentwicklung“.

Nachdem wir speziell den Atomkern und seinen Aufbau skizziert haben, wollen wir die den Kern umgebende Elektronenhülle beschreiben:

Unter den normalerweise auf der Erde herrschenden Bedingungen ist die Anzahl der sich um den Atomkern bewegendenden Elektronen gleich der Protonenzahl, so daß das Atom nach außen elektrisch neutral ist. Die Elektronenhülle hat einen entscheidenden Einfluß auf die spezifischen chemischen und optischen Eigenschaften der Atome, die verschiedenen Elementen angehören. In dem nur noch aus Gründen der Anschaulichkeit zu akzeptierenden Atommodell Bohrs umkreisen die Elektronen den Atomkern in verschiedenen Abständen, etwa so wie die Planeten die Sonne. Im Falle des Wasserstoffatoms besteht die Elektronenhülle lediglich aus einem Elektron. Es kann das Proton auf verschiedenen ausgezeichneten Bahnen umlaufen. Jeder der Bahnen läßt sich ein ganz bestimmter Energiezustand zuordnen. Für den energieärmsten Zustand wurde der Ausdruck Grundzustand oder Grundniveau geprägt. Im Normalfalle verweilt das Elektron in seinem Grundzustand. Wird dem Elektron jedoch Energie zugeführt, so ver-

läßt es ihn und wechselt in einen energiereicheren Zustand über. Dieser Vorgang wird als Anregung und die hierfür erforderliche Energie als Anregungsenergie bezeichnet. Die Anregung kann durch Absorption von elektromagnetischer Strahlung, aber auch durch Energieübertragungen bei Stößen zwischen den Elementarteilchen erfolgen. Der angeregte Zustand bleibt jedoch nur eine kurze Zeitspanne – etwa 10^{-8} s – erhalten, dann geht das Elektron wieder in den Grundzustand über. Die vorher aufgenommene Anregungsenergie wird dabei in Form eines „Lichtblitzes“ wieder ausgestrahlt. Falls sich das Elektron in einem höheren Anregungszustand befand, gelangt es häufig erst über dazwischenliegende Energieniveaus in den Grundzustand. Bei diesem Vorgang wird die Anregungsenergie aufgespalten und in Form mehrerer Lichtblitze abgegeben. Absorbieren sehr viele Atome eines Elementes gleichzeitig Licht der gleichen Wellenlänge λ , so entsteht an der betreffenden Stelle des Spektrums derjenigen Strahlungsquelle, der die Energie entzogen wird, ein Energiedefizit, das als Absorptionslinie erkennbar ist.

Die Energiebeträge E , die ein Elektron aus der einfallenden elektromagnetischen Strahlung aufnehmen kann, um von einem Energieniveau zu einem anderen überzugehen, sind eindeutig durch die sehr wichtige Beziehung $E = hc/\lambda$ bestimmt. Darin sind h und c zwei außerordentlich wichtige Naturkonstanten: h das von Planck eingeführte Wirkungsquantum ($h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Ws²) und c die Vakuumlichtgeschwindigkeit ($c = 2,997 \cdot 10^5$ km/s). Mit Hilfe dieser Gleichung ist man auch umgekehrt in der Lage, aus den beobachteten Absorptions- bzw. Emissionslinien eines chemischen Elements Rückschlüsse auf die Energieniveaus des betreffenden Atoms zu ziehen. Die Wellenlängen der Absorptions- bzw. Emissionslinien werden meistens in Ångström ($1 \text{ Å} \triangleq 1 \cdot 10^{-10}$ m) oder neuerdings auch in Nanometern ($1 \text{ nm} \triangleq 1 \cdot 10^{-9}$ m) angegeben.

Solange das Leuchtelektron von einem diskreten Energieniveau zum anderen übergeht und sich nicht vom Atomkern trennt, spricht man von gebundenen Übergängen. Übersteigt jedoch die dem Elektron zugeführte Energie einen bestimmten

Betrag, so ist der Atomkern nicht mehr in der Lage, das Elektron an sich zu binden, und es verläßt die Atomhülle. In diesem Falle spricht man von einem gebunden-freien Übergang oder kurz von Ionisation. Die hierfür notwendige Mindestenergie wird als Ionisationsenergie bezeichnet.

Selbstverständlich können dem Elektron auch noch höhere Energiebeträge zugeführt werden. Soweit sie nicht für die Ionisationsarbeit verbraucht werden, kommen sie dem davonfliegenden Elektron als Bewegungsenergie zugute. Hieraus wird ersichtlich, daß bei der Ionisation keine spezifische Absorptionslinie im Spektrum sichtbar ist wie etwa bei gebundenen Übergängen. Je nach der Größe der absorbierten Energie liegt die für jeden Ionisationsprozeß individuelle „Absorptionslinie“ in einem nur nach der langwelligen Seite begrenzten Bereich des Spektrums. Die langwellige Grenze ist von Element zu Element verschieden und hängt von der Mindestenergie ab, die zur Ionisation erforderlich ist. Für eine Vielzahl gleichzeitig ablaufender Ionisationsprozesse ergibt sich für jedes Element ein ganzes Band im Spektrum, das sogenannte Seriengrenzkontinuum, aus dem die Energie absorbiert wird – man spricht von einer kontinuierlichen Absorption. Die abgetrennten Elektronen bewegen sich zwischen den Atomen und Ionen umher und vereinigen sich schließlich wieder mit den Ionen. Die dabei freiwerdende Energie wird in Form von Strahlung abgegeben. Die Abstrahlung erfolgt ebenfalls in einem breiten Spektralbereich, so daß bei einer Vielzahl von Rekombinationsprozessen insgesamt wieder ein Kontinuum emittiert wird.

Auch bei der Bewegung eines freien Elektrons im elektrischen Feld eines Ions kommt es zu einer Änderung seiner Energie. Dabei wird die Differenz der Energie des Elektrons vor und nach der Bewegung absorbiert bzw. emittiert. Diese als frei-frei bezeichneten Übergänge verursachen gleichfalls eine kontinuierliche Emission oder Absorption in den Spektren.

Es wäre verfehlt, die hier dargestellten Anregungs-, Ionisations- und Rekombinationsprozesse als einmalige Vorgänge im Sterninnern anzusehen. Dort, aber auch in den Sternatmosphären laufen sie fortwährend ab, und der Prozentsatz der im zeitlichen Mittel ständig ionisierten bzw. angeregten Atome kann

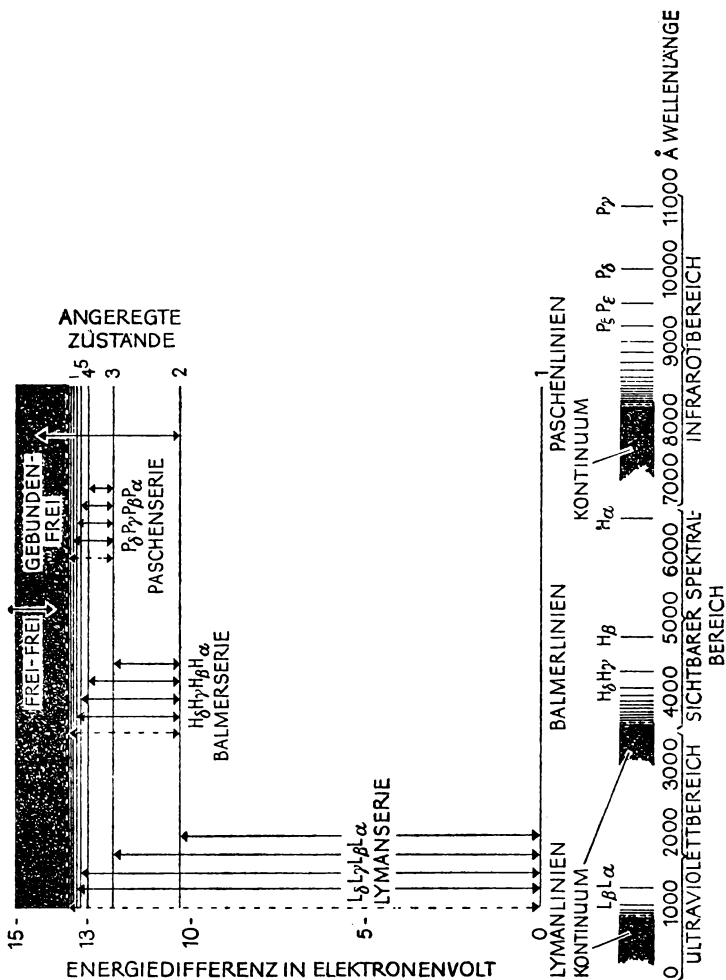


Abb. 1. Die Energieniveaus des Wasserstoffatoms sind als horizontale Linien dargestellt. Jedem Niveau entspricht im Bohrschen Atommodell eine spezielle Bahn des Elektrons. Die Übergänge von einem Energieniveau zu einem anderen sind durch vertikale Linien charakterisiert. Die Zahlen auf der Ordinate geben die Energiedifferenzen der Niveaus gegenüber dem Grundzustand an. Bei der Anregung eines Atoms wird das Elektron auf ein höherliegendes Energieniveau gehoben. Dabei wird Energie verbraucht, und im

für jedes chemische Element berechnet werden. Hierfür ist aber die genaue Kenntnis der Temperatur und der Dichte in den betreffenden Sterngebieten erforderlich.

Die theoretische Untersuchung der von jedem Element zu erwartenden Spektren ergab, daß für die Übergänge der Elektronen von einem Energieniveau zu einem anderen bestimmte Regeln gelten. Danach bestehen für das Auftreten der möglichen gebundenen Übergänge zum Teil recht unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten. Für einige der gebundenen Übergänge ist die Wahrscheinlichkeit für ihr Auftreten so gering, daß man für sie den Ausdruck „verbotene“ Übergänge prägte. Es zeigte sich aber, daß unter den extremen physikalischen Bedingungen im Weltraum solche verbotenen Übergänge unter Umständen eine wesentliche Bedeutung erlangen können.

Einen Einblick in die Energieniveaus des Wasserstoffs vermittelt Abbildung 1. In ihr sind auch einige Übergänge des Elektrons eingetragen. Ihre tatsächliche Zahl, besonders in der Nähe der Ionisationsgrenze, ist außerordentlich hoch.

Die Spektren der anderen Elemente sind zum Teil sehr viel komplizierter als das des Wasserstoffs. Das liegt unter anderem daran, daß bei Mehrelektronensystemen auch Wechselwirkungen zwischen den Elektronen auftreten und die näher am Atomkern befindlichen Elektronen die Kernladung nach außen teilweise abschirmen. Eine Vereinfachung der Verhältnisse tritt nur dann ein, wenn die Atome durch Mehrfachionisation alle Elektronen bis auf eins verloren haben. Dann liegt ein Zustand vor, wie er beim neutralen Wasserstoffatom verwirklicht ist, und die beobachtbaren Spektren der Atome bekommen ein „wasserstoffähnliches“ Aussehen. Allerdings sind die

Spektrum entsteht eine Absorptionslinie. Bei der Rekombination des Elektrons auf das Grundniveau wird Energie frei, die in einer Linie emittiert wird. Die Rekombination kann auch über mehrere Niveaus erfolgen, wobei jedesmal eine Linie emittiert wird. Außer den eingezeichneten Linienserien gibt es noch weitere, deren Spektrallinien aber im fernen Ultrarot liegen. Das schraffierte Gebiet kennzeichnet das Kontinuum, das bei gebunden-freien bzw. frei-freien Übergängen absorbiert bzw. emittiert wird.

charakteristischen Wellenlängen, bei denen die Emissions- bzw. Absorptionslinien auftreten, gegenüber den analogen Wasserstofflinien in Richtung des kurzwelligen Teils des Spektrums verschoben.

R. Bunsen und G. R. Kirchhoff wiesen im Jahre 1859 als erste darauf hin, daß die Emissionslinien eines Elements an derselben Stelle des Spektrums liegen wie die Absorptionslinien. Ferner erkannten sie, daß sich die Gesamtheit der von einem Element absorbierten bzw. emittierten Linien in einer charakteristischen Weise über das Spektrum verteilt. Sie wurden damit zu den Begründern der Spektralanalyse.

Die Spektralanalyse hat bei der Auswertung der Sternspektren eine große Bedeutung. Mit ihrer Hilfe gelangt man zu den wichtigen Aussagen darüber, welche Elemente in den Sternatmosphären vorhanden sind. Es ist jedoch zu beachten, daß aus dem Fehlen von Linien von Elementen nicht unbedingt auf ihre Abwesenheit in der betreffenden Sternatmosphäre geschlossen werden darf. Diese Elemente können dort durchaus vorkommen; sie sind spektroskopisch nur deshalb nicht nachweisbar, weil bei den in der Sternatmosphäre herrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen Übergänge in dem von der Erdoberfläche aus zugänglichen Spektralbereich nicht in nennenswerter Anzahl stattfinden.

Lufthülle der Erde

Die klassische Beobachtungsmethode in der Astronomie besteht in der Untersuchung des Lichtes der Gestirne hinsichtlich seiner Richtung, seiner Qualität und seiner Quantität mit dazu geeigneten Meßapparaturen vom Boden der Erdatmosphäre aus. Bevor jedoch das Sternenlicht von einem astronomischen Instrument aufgefangen werden kann, erleidet es beim Durchgang durch die Atmosphäre einige Veränderungen.

Beschränkt man sich zunächst auf die Betrachtung solcher Beobachtungen, die auf eine genaue Messung von Sternpositionen abzielen, so hat man sich mit der optischen Brechkraft unserer Lufthülle auseinanderzusetzen. Sie bewirkt, daß die aus dem Weltraum von den verschiedenen Sternen einfallenden

Lichtstrahlen aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt werden. Der Betrag der auftretenden Ablenkung hängt von der Winkelhöhe der Gestirne über dem Horizont des Beobachtungsortes und den gerade herrschenden meteorologischen Bedingungen der Atmosphäre ab. Bei der Auswertung der Beobachtungen muß diese als Refraktion bekannte Erscheinung berücksichtigt werden. Sie macht sich bei den Beobachtungen kaum störend bemerkbar. Dagegen kann die Richtungsszintillation die Qualität der Messungen entscheidend herabsetzen. Es handelt sich hierbei um die Erscheinung, daß sich die Sterne im Gesichtsfeld des Fernrohrs laufend völlig ungeordnet um einen mittleren Ort bewegen. Die Ursache dieser irregulären Bewegungen der Sterne sind Temperaturschwankungen in den bodennahen Schichten der Atmosphäre. Die wie Blasen oder Schlieren in einer optischen Linse wirkenden Bereiche unterschiedlicher Temperatur nehmen an der allgemeinen Luftströmung teil und rufen dadurch laufend Veränderungen der Brechkraft der Atmosphäre längs des Weges des einfallenden Sternenlichtes hervor. In besonders stark ausgeprägten Fällen ist die Intensitätsszintillation bereits mit bloßem Auge als ein „Funkeln“ der Sterne wahrzunehmen. Der mittlere Wert der Richtungsszintillation beträgt etwa 1'' (Bogensekunde). Die Szintillation übt auch einen großen Einfluß auf die Qualität der Sternbildchen, genauer gesagt auf die geometrische Figur der Zerstreuungsscheibchen aus. Infolge der riesigen Entfernung von uns bleiben die Sterne auch in den größten Teleskopen theoretisch punktförmige Objekte. Lediglich die Beugung des Sternenlichtes an den Begrenzungen der Fernrohrobjektive bewirkt, daß die Lichtpunkte von konzentrischen, im Wechsel hellen und dunklen Ringen umgeben sind, deren Intensität nach außen rasch abfällt. Die Richtungsszintillation verursacht nicht nur eine „Verschmierung“ der Beugungsringe, so daß der Eindruck einer Sternscheibe entsteht, sondern kann ganz bizarre Formen der Sternscheibchen hervorrufen, die sich außerdem rasch ändern. Unter solchen Bedingungen ist es sehr schwierig, genaue Positionsbestimmungen zu machen, wie sie etwa für die Berechnungen von Doppelsternbahnen erforderlich sind. Bei den in Europa vorherrschenden

meteorologischen Bedingungen gibt es nur sehr wenige Nächte im Jahr, in denen die beobachteten Beugungsscheibchen der Sterne die Qualität besitzen, die man entsprechend der theoretisch errechneten Leistungsfähigkeit des verwendeten Teleskops eigentlich erwarten könnte.

Bei astrophysikalischen Untersuchungen wirkt sich besonders störend die selektive Extinktion der Atmosphäre aus. Darunter wird die Erscheinung verstanden, daß die in der Lufthülle enthaltenen Gase für bestimmte Wellenlängenbereiche der elektromagnetischen Strahlung teilweise bzw. völlig undurchsichtig sind. Verglichen mit dem gesamten Spektralbereich sind die verbleibenden Durchsichtsfenster unserer Lufthülle relativ klein. Einer der Durchsichtsbereiche umfaßt den Wellenlängenbereich von etwa 300 bis 1000 nm, in dem sich auch die Wellenlängen der für das Auge wahrnehmbaren Strahlung befinden. Daher wird dieser Bereich auch als „optische“ Fenster der Atmosphäre bezeichnet. Außerhalb dieses Gebietes, noch weiter im infraroten Spektralbereich, gibt es noch einige schmale Durchlaßfenster in der Atmosphäre, durch die jetzt auch beobachtet werden kann. Ein weiterer Bereich ist für die Strahlung der Wellenlängen von 1 cm bis etwa 30 m durchlässig und wird gewöhnlich „Radiofenster“ genannt. Außerhalb der angegebenen Gebiete vermag die elektromagnetische Strahlung nur bis in bestimmte Höhen über der Erdoberfläche vorzudringen.

Wie wir wissen, verhalten sich die Sterne näherungsweise wie schwarze Strahler. Hieraus geht hervor, daß die Sterne auch in den Spektralgebieten, die von der Erdoberfläche aus nicht beobachtbar sind, einen zum Teil recht erheblichen Prozentsatz ihrer Gesamtstrahlung abgeben. Für die Erforschung der Eigenarten der Sternstrahlung ist jedoch die Kenntnis des sich über den gesamten Wellenlängenbereich erstreckenden Spektrums eine unbedingt notwendige Voraussetzung. Da sie grundsätzlich nicht durch Beobachtungen von der Erdoberfläche aus zu erfüllen ist, bleibt nur die Möglichkeit, die Meßapparaturen in Gebiete oberhalb der Atmosphäre, also in den Weltraum zu transportieren. Dafür kommen als Trägermittel Forschungsraketen, künstliche Erdsatelliten oder auch Ballons in Be-

tracht. Die aus diesem Gebiet schon vorliegenden Beobachtungsergebnisse berechtigen zu großen Hoffnungen. Die „Weltraumastronomie“ wird sich in der kommenden Zeit sehr rasch zu einem wichtigen Beobachtungszweig in der Astronomie entwickeln.

Selbst dann, wenn in naher Zukunft umfangreiche Beobachtungen im Weltraum ohne die verschiedenartigen störenden Einflüsse der Erdatmosphäre möglich sind, werden die erdgebundenen klassischen Beobachtungen nicht völlig hinfällig. Es wird vielmehr eine gegenseitige fruchtbare Ergänzung der auf verschiedene Weise gewonnenen Beobachtungen eintreten.

Einen anschaulichen Eindruck von der begrenzten spektralen Durchlaßfähigkeit der Erdatmosphäre vermittelt Abbildung 2. In ihr sind ferner zu Vergleichszwecken die theoretisch berechneten Energieverteilungskurven von zwei Sternen dargestellt. Da die Sterne nur einen winzigen Bruchteil ihrer Gesamtstrahlung im Radiofrequenzbereich abstrahlen und sehr weit entfernt sind, erhalten wir unser empirisches Wissen vorwiegend durch Beobachtungen im optischen Fenster der Atmosphäre.

Fast das gesamte vorhandene astrophysikalische Beobachtungsmaterial beruht auf Messungen, die vom Erdboden aus gewonnen wurden und deshalb nur schmale Bereiche des Gesamtspektrums umfassen. Für bestimmte theoretische Untersuchungen wäre aber auch die Kenntnis der Energieverteilung in den Teilen des Spektrums nützlich, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt beobachtungsmäßig schwer zugänglich sind. Man ist daher zu Extrapolationen von Beobachtungsergebnissen gezwungen, einem erlaubten Verfahren, das aber Unsicherheiten in sich birgt. Es ist einzusehen, daß mit solchen extrapolierten Meßergebnissen kein echter Vergleich mit den theoretischen Resultaten möglich ist, aus dem sichere Schlüsse über die Verbesserung der theoretischen Ansätze gezogen werden könnten.

Photometrische Grundlagen

In der Astronomie ist es auch gegenwärtig noch üblich, Helligkeiten von Gestirnen in Größenklassen anzugeben. Dieser schon im Altertum von Hipparch eingeführte Begriff dient zur

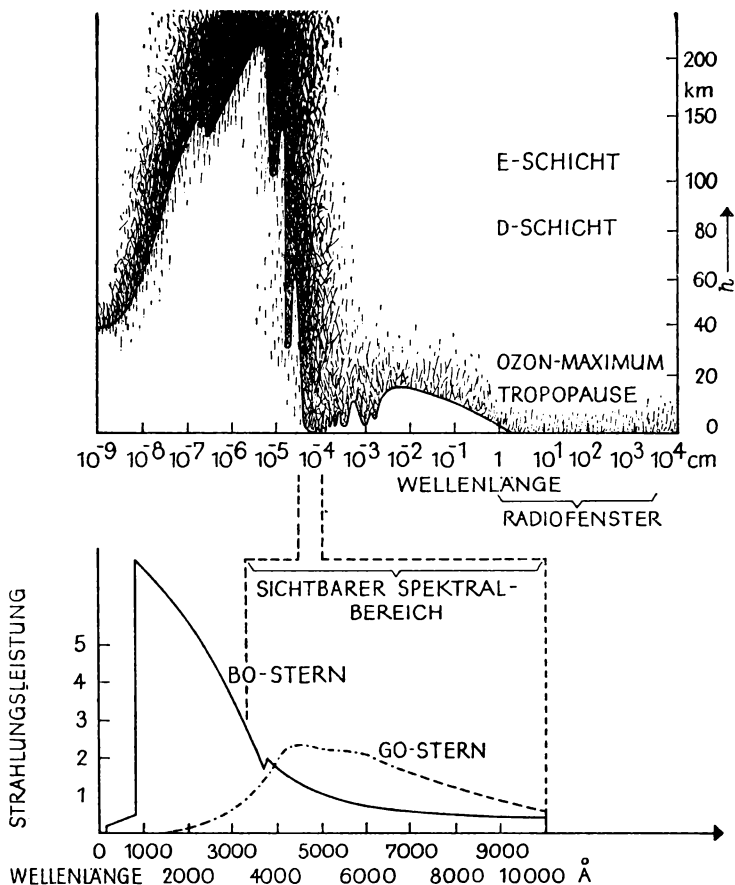


Abb. 2. Genäherter Verlauf der Eindringtiefe der senkrecht in die Erdatmosphäre einfallenden Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Die Kurve gibt diejenigen Höhen h über der Erdoberfläche an, bei denen die Intensität der Strahlung auf 37% des extraterrestrischen Wertes abgesunken ist. Der untere Teil der Abbildung ist eine Ausschnittsvergrößerung des oberen Teils und enthält die theoretisch berechneten Intensitätsverläufe der von einem B0-Stern und einem G0-Hauptreihenstern emittierten Strahlung. Das optische Fenster der Erdatmosphäre ist ebenfalls eingezeichnet. Die Intensitätskurve des G0-Sterns ist aus Gründen der Übersichtlichkeit in Ordinateenrichtung um einen Faktor 10^3 gegenüber der entsprechen-

Einordnung der Sterne in eine Helligkeitsskala. Den hellsten Sternen wird dabei die Größe 1^m (m : magnitudo) zugeordnet; mit abnehmender Helligkeit erhalten die Sterne die Größen 2^m , 3^m usw. Die Sterne der sechsten Größenklasse sind unter günstigen Bedingungen gerade noch mit bloßem Auge zu erkennen. Die ursprünglich nur sechs Größenklassen umfassende Helligkeitsskala wurde nach der Einführung des Fernrohrs in die Astronomie auf eine exakte Basis gestellt und erweitert. So haben noch schwächere Sterne beispielsweise die Helligkeiten 7^m oder sogar 20^m , dagegen noch hellere Objekte als 1^m die Größe 0^m oder auch einen negativen Wert (z. B. -5^m).

Die Verbindung zwischen den vom Beobachter empfundenen Helligkeiten – historisch gesehen entwickelte sich die Photometrie aus der visuellen Photometrie – und der von den Sternen ausgestrahlten Energie stellt das psycho-physische Grundgesetz her. Es sagt aus, daß gleichen Größenklassendifferenzen gleiche Intensitätsverhältnisse entsprechen. Bezeichnet man die Helligkeiten zweier Sterne mit m_1 und m_2 und die von ihnen ausgestrahlten Energien mit I_1 bzw. I_2 , so läßt sich zwischen diesen Größen die Beziehung

$$m_1 - m_2 = c \cdot \lg I_1/I_2$$

aufstellen. Der zahlenmäßige Wert der Konstante c wurde praktischen Erfordernissen angepaßt und beträgt 2,5. Als Nullpunkt der Größenklassenskala diente zunächst der Polarstern, dem man eine scheinbare visuelle Helligkeit von 2^m 12 zuordnete. Erst später stellte sich heraus, daß die Helligkeit gerade dieses Sterns gering veränderlich ist.

Mit der Einführung der Photographie in die Astronomie wurden die Grundlagen für eine objektive Photometrie geschaffen. Darüber hinaus vereinigt die photographische Platte mehrere wichtige Eigenschaften in sich: Abgesehen davon, daß eine aufgenommene Platte ein Dokument ist, das den „Anblick“ des

den Kurve des B0-Sterns gestreckt. Die Strahlung des B0-Sterns wird zum größten Teil in dem vom Grunde der Erdatmosphäre nicht zugänglichen ultravioletten Spektralbereich emittiert. Dagegen fällt das Maximum der Energieabstrahlung des G0-Hauptreihensterns in das „optische“ Fenster der Erdatmosphäre.

Objekts zum Zeitpunkt der Aufnahme für alle Zeiten fixiert hat, erlauben die für photographische Zwecke ausgerüsteten Fernrohre die gleichzeitige Aufnahme ganzer Ausschnitte des Sternhimmels. Diese Aufnahmen können im Laboratorium jederzeit wieder untersucht werden, während dagegen eine visuelle Beobachtung nicht wiederholt werden kann. Als ganz entscheidend beim Vordringen zu schwächsten Sternhelligkeiten erweist sich die akkumulierende Wirkung des photographischen Prozesses. Sie ermöglicht, daß auf langbelichteten Aufnahmen Sterne sichtbar werden, die ein durch das gleiche Fernrohr blickender Beobachter auch bei längerem Hinsehen nicht wahrnehmen könnte.

Zwischen den auf photographischen Aufnahmen durch die Sternstrahlung hervorgerufenen Schwärzungen und den Helligkeiten der Sterne im Größenklassensystem besteht ein gesetzmäßiger Zusammenhang. Die ihn beschreibenden physikalischen Größen müssen jedoch für jede Photoplatte individuell abgeleitet werden, weil bei der Annahme von mittleren Werten die Bestimmung photographischer Helligkeiten sonst zu ungenau würde. Die dennoch verbleibenden Fehler photographisch abgeleiteter Helligkeiten betragen ungefähr $\pm 0^m,05$.

Die genauesten photometrischen Meßergebnisse liefern die lichtelektrischen Verfahren. Hierbei wird der einfallende Strahlungsstrom mit Hilfe von Photozellen unter Ausnutzung des äußeren lichtelektrischen Effekts in elektrische Ströme umgesetzt, deren Stärke von der Intensität des Sternenlichtes abhängt. Der einzige Nachteil dieser Beobachtungsmethode besteht darin, daß es im allgemeinen nur möglich ist, die Sterne einzeln nacheinander zu messen. Deshalb muß schon bei der Photometrie eines relativ kleinen Sternfeldes viel Beobachtungszeit aufgewendet werden. Die auftretenden Meßfehler sind etwa fünf- bis zehnmal kleiner als bei der photographischen Photometrie.

Die in der Astronomie gebräuchlichen Empfängerapparaturen und Photoemulsionen arbeiten zum großen Teil in verschiedenen Spektralbereichen des optischen Fensters der Atmosphäre. Eine Kombination aller derartigen Messungen von einem Objekt vermittelt daher einen Einblick in die Energieverteilung

im Sternspektrum und stellt einen Ersatz für die mit einem Spektrographen direkt aufgenommenen Sternspektren dar. Bereits bei ersten Vergleichen der auf photographischem Wege abgeleiteten Blauhelligkeiten mit den visuell bestimmten Gelbhelligkeiten erkannte man, daß der Differenz beider Helligkeiten eine große astrophysikalische Bedeutung zukommt. Die Differenz der Helligkeiten zwischen dem blauen und visuellen Spektralbereich wird schon seit langem als internationaler *Farbenindex*

$$FI_{\text{int}} = m_{\text{phot}} - m_{\text{vis}}$$

bezeichnet. Sein Beitrag und sein Vorzeichen hängen von der Energieverteilung im Sternspektrum ab. Beide sind ein Maß für die Oberflächentemperatur der Sterne. Wenn diese Beziehung erst einmal geeicht ist, lassen sich mit ihr näherungsweise Temperaturbestimmungen an Sternen durchführen. Insbesondere bei den sehr lichtschwachen Sternen stellt diese Methode die einzige Möglichkeit dar, zu Aussagen über die oben erwähnten Größen zu kommen.

Eine grundlegende Untersuchung über die Größe der Helligkeiten in verschiedenen Spektralbereichen und der Energieverteilung in den Sternspektren ergab, daß sich schon durch drei in verschiedenen Spektralbereichen gemessene Helligkeiten die Energieverteilung in den Sternspektren recht gut charakterisieren läßt. Unter Berücksichtigung der spektralen Durchlässigkeit der Erdatmosphäre, der Eigenschaften der Strahlungsempfänger und der Energieverteilung in den Sternspektren ergibt sich, daß die drei Farbbereiche im ultravioletten, blauen und gelben oder roten Spektralbereich liegen müssen. Ein nach solchen Prinzipien ausgewähltes Mehrfarbensystem ist das *U*(ltraviolett)-*B*(lau)-*V*(isuell)-System. Aus den drei Farbhelligkeiten $m_U = U$, $m_B = B$ und $m_V = V$ lassen sich zwei Farbenindizes, ein kurzwelliger (U-B) und ein langwelliger (B-V), bilden.

Die Helligkeiten der Sterne in den verschiedenen Farbbereichen können über den Farbenindizes in entsprechenden Diagrammen aufgetragen werden. Je nachdem, welcher Farbenindex als Abszisse gewählt wird, spricht man von einem kurz-

welligen bzw. langwelligen *Farben-Helligkeits-Diagramm* (FHD) (siehe z. B. Abb. 17). Ihr Aussehen ist für bestimmte Objekte typisch. So erlauben beispielsweise die *Farben-Helligkeits-Diagramme* der Sterne, die offenen Sternhaufen angehören, Rückschlüsse auf deren Alter.

Es besteht auch die Möglichkeit, die kurzwelligen und langwelligen *Farbenindizes* in einem Diagramm gegeneinander aufzutragen. Dieses sogenannte *Zwei-Farbenindex-Diagramm* (ZFD) leistet bei astrophysikalischen Untersuchungen ebenfalls wertvolle Dienste.

Die bisher besprochenen scheinbaren Helligkeiten stellen, physikalisch gesehen, keine Größen dar, die zu sinnvollen Vergleichen von Sternen untereinander herangezogen werden könnten. Hierfür wäre es erforderlich, den in den scheinbaren Helligkeiten enthaltenen Entfernungseffekt zu eliminieren. Dies geschieht unter Anwendung des *Entfernungsquadratgesetzes*. Es besagt, daß die Intensität einer Strahlungsquelle mit dem Quadrat der Entfernung vom Beobachter abnimmt. Daher ist es durchaus möglich, daß ein „tatsächlich“ sehr heller, aber weit entfernter Stern eine geringere scheinbare Helligkeit als ein naher, in Wirklichkeit aber seiner Helligkeit nach schwacher Stern besitzt. Aus diesem Grunde ist es nur statthaft, Helligkeiten von Sternen zu vergleichen, die sich in jeweils gleichen Entfernungen von uns befinden und von denen man außerdem annehmen darf, daß ihr Licht auf dem Wege zu uns von keinem dazwischengelagerten Medium geschwächt wurde. Da sich aber die Sterne in sehr verschiedenen Entfernungen von uns befinden, müssen die gemessenen scheinbaren Helligkeiten auf eine Einheitsentfernung umgerechnet werden. Die sich ergebende Helligkeit wird als *absolute Helligkeit* M bezeichnet. Zwischen ihr, der *scheinbaren Helligkeit* m und der Entfernung r besteht die Beziehung

$$M - m = 5 - 5 \cdot \lg r.$$

Die Entfernung wird in einem in der Astronomie üblichen Entfernungsmaß *Parsek* (Abk. für *Parallaxensekunde*, Kurzform pc) gemessen. Man versteht hierunter die Entfernung, aus der ein angenommener Beobachter die große Halbachse der Erd-

bahn unter dem Winkel von einer Bogensekunde sehen würde. In metrischem Maß beträgt $1 \text{ pc} = 3,08 \cdot 10^{13} \text{ km}$. Die absoluten Helligkeiten der Sterne beziehen sich, entsprechend einer Übereinkunft, auf eine Einheitsentfernung von 10 pc .

Es darf nicht unerwähnt bleiben, daß die Bestimmung der absoluten Helligkeiten zum Teil auf erhebliche Schwierigkeiten stößt, denn leider befindet sich nicht von jeder Stern-, „sorte“, ein „Vertreter“ gerade in dem Entfernungsbereich, der die Anwendung der genauesten astronomischen Entfernungsbestimmungsmethode, der trigonometrischen Methode, gestattet. In solchen Fällen muß auf andere, aber ungenauere Methoden zurückgegriffen werden, die dann verständlicherweise unsichere Ergebnisse liefern.

Neben den Farbhelligkeiten, die die Strahlung eines Sterns in einem engen Spektralbereich charakterisieren, gibt es noch die *bolometrische Helligkeit*. Sie ist ein Maß für diejenige Helligkeit, die ein Stern haben würde, wenn die gesamte über das Spektrum verteilte Strahlung mit *einem* Empfänger beobachtet werden könnte. Derartige Messungen sind schon wegen der begrenzten spektralen Durchlaßfähigkeit der Erdatmosphäre nicht möglich. Deshalb läßt sich die bolometrische Helligkeit nur aus Extrapolationen von Meßwerten errechnen. Die Beträge der an die Meßwerte anzufügenden Korrekturen hängen von der Energieverteilung in den Sternspektren ab und sind besonders bei denjenigen Sternen sehr unsicher, deren Energiemaxima außerhalb des von der Erdoberfläche aus erfaßbaren Spektralbereichs liegen. Vereinbarungsgemäß ist die bolometrische Korrektur für Sterne, deren Strahlung für das Auge die größte Wirksamkeit besitzt, d. h. für sonnenähnliche Sterne mit $T_e = 6800^\circ \text{K}$, gleich Null. Für die Sonne beträgt die bolometrische Korrektur nur $0^m 06$ und die absolute bolometrische Helligkeit der Sonne ergibt sich zu $+4^m 84$.

Astronomische Beobachtungsinstrumente

Bis zur Erfindung des Fernrohrs und seiner Anwendung in der Astronomie durch G. Galilei im Jahre 1610 wurden die astronomischen Beobachtungen mit bloßem Auge durchgeführt. Sie

bestanden entweder in einem richtungsmäßigen Peilen über einfache Visiervorrichtungen oder einem Schätzen von Sternhelligkeiten.

Das Fernrohr ist inzwischen zu einem unentbehrlichen Hilfsmittel für den beobachtenden Astronomen geworden. Entsprechend der Art und Weise, in der das einfallende Sternlicht gesammelt wird, unterscheidet man zwei Grundtypen von Fernrohren, das Linsenfernrohr und das Spiegelteleskop. Beim Refraktor wird die Brechkraft der optischen Gläser ausgenutzt, um das Sternlicht im Brennpunkt des Objektivs zu vereinigen, wo es dann etwa mit Hilfe von Meßapparaten untersucht werden kann. Beim Spiegelteleskop wird entweder mit dem parabolisch oder sphärisch geschliffenen Hauptspiegel das auftreffende Sternlicht auf Grund des Reflexionsgesetzes im Brennpunkt gesammelt und steht dort zur Beobachtung zur Verfügung. Entsprechend der Untersuchungsaufgabe kann mit dem Auge, selbstverständlich, aber auch mit objektiven Strahlungsempfängern gearbeitet werden.

Die Verwendung des Fernrohrs bei astronomischen Beobachtungen bringt zwei entscheidende Vorteile mit sich. Das Fernrohr ermöglicht nicht nur starke Winkelvergrößerungen, die auch die Messungen sehr kleiner Winkel erlauben, sondern besitzt auch die Fähigkeit, Licht zu sammeln und damit wirksamer werden zu lassen. Dabei ist die Strahlungsintensität, die ein Fernrohr in seinem Brennpunkt vereinigen kann, um so größer, je größer der Objektivdurchmesser des Instrumentes ist. Gleichzeitig verbessert sich mit zunehmendem Objektivdurchmesser auch das Auflösungsvermögen des Fernrohrs. Darunter wird die Eigenschaft eines Instrumentes verstanden, zwei eng benachbarte Beugungsscheibchen im Gesichtsfeld gerade noch voneinander trennen zu können. Nach den optischen Gesetzen hängt das Auflösungsvermögen eines Fernrohrs von seinem Objektivdurchmesser, seiner Brennweite und der Wellenlänge des Lichtes ab, bei dem beobachtet wird. Es gilt die Beziehung

$d = 1,22 \frac{\lambda \cdot f}{D}$, in der D der Objektivdurchmesser, f die Brennweite des Fernrohrs, λ die Wellenlänge des Lichtes und d der lineare Mindestabstand der Zentren zweier Beugungsscheib-

chen bedeuten. Alle Größen werden in Zentimetern angegeben. Durch Umrechnung in das Bogenmaß erhält man das Winkelauflösungsvermögen eines Fernrohrs. Hierfür gilt die Beziehung

$$\gamma = 1,22 \frac{\lambda}{D} \cdot 206265''.$$

Diese Gleichung bringt zum Ausdruck, daß das Winkelauflösungsvermögen eines Teleskops um so besser ist, je größer der Objektivdurchmesser und je kleiner die Wellenlänge des Lichtes sind.

Der Durchmesser des Hauptspiegels des größten Teleskopes auf der Erde beträgt 6 m. Dieses vor kurzem in Dienst gestellte Riesenteleskop wurde in Zelenshukskaya im Kaukasus in 1800 m Höhe errichtet. Die Brennweite des Hauptspiegels beträgt 24 m. Beeindruckend ist auch das Gesamtgewicht des Instrumentes, das sich auf 700 Tonnen beläuft. Die lichtsammelnde Wirkung des 6-m-Spiegels übertrifft die des 5-m-Spiegels auf dem Mt. Palomar um etwa 44%. Der Durchmesser des Objektivs des größten Refraktors beträgt nur 1,02 m.

Für das 6-m-Teleskop soll das Auflösungsvermögen berechnet werden: Unter der Voraussetzung, daß die Wellenlänge des Lichtes, bei der beobachtet werden soll, $\lambda = 555 \text{ nm}$ ist, ergibt sich ein theoretisches Winkelauflösungsvermögen von etwa $2,5 \cdot 10^{-2}$ Bogensekunden. Dieser Wert würde gewährleisten, daß man auf der Mondoberfläche, deren Entfernung mit $3,84 \cdot 10^5 \text{ km}$ angenommen werden soll, gerade noch eine Fläche erkennen kann, deren Ausmaße $50 \text{ m} \cdot 50 \text{ m}$ betragen. Durch die von der Erdatmosphäre hervorgerufene Szintillation, deren Wert mit $1''$ angesetzt wird, verschlechtert sich das Auflösungsvermögen aber derartig, daß tatsächlich nur Gebiete mit einer Erstreckung von mindestens $900 \text{ m} \cdot 900 \text{ m}$, wahrzunehmen sind. Bei diesen Abschätzungen wurde jedoch angenommen, daß die Mondoberfläche völlig eben ist. Das ist jedoch nicht der Fall, und durch Schattenwirkungen sind doch noch kleinere Gebilde auf dem Mond auszumachen.

An diesem Beispiel wird deutlich, wie groß der störende Einfluß der Erdatmosphäre ist. Ergänzend sei bemerkt, daß die

von den wesentlich kleineren Kameras der künstlichen Mondsatelliten aufgenommen und zur Erde übermittelten Bilder Oberflächeneinzelheiten erkennen lassen, die etwa 100mal kleiner sind als diejenigen, die in den Riesenteleskopen wahrzunehmen sind. Die weich auf dem Mond gelandeten automatischen Raumflugkörper vom Typ Luna, Lunochod und Surveyor gewannen sogar Aufnahmen, die noch Einzelheiten in der Größenordnung von Millimetern erkennen lassen. Diese Beispiele zeigen, daß es im „Zeitalter der Raumfahrt“ völlig verfehlt wäre, die großen Spiegelteleskope für die Erforschung der Mondoberfläche einzusetzen. Dafür waren sie von vornherein auch nicht vorgesehen. Die eigentliche Stärke der Riesenteleskope und aller damit vergleichbaren Teleskope liegt in ihrer starken lichtsammelnden Eigenschaft, die die Untersuchung extrem lichtschwacher Objekte erlaubt. Beispielsweise haben die schwächsten mit dem 5-m-Spiegel nachweisbaren Sterne eine Helligkeit von nur 23^m5 . Diese Angabe ist gleichbedeutend damit, daß eine ungefähr 28000 km von der Erde entfernte Kerzenflamme mit diesem Teleskop noch nachweisbar wäre.

Für die Beobachtungen der im Radiofrequenzgebiet emittierten Strahlung der Himmelskörper stehen sogenannte Radioteleskope zur Verfügung, deren Aufbau und Arbeitsweise recht unterschiedlich sind. Ein Teil von ihnen ähnelt stark vergrößerten Ausgaben der im optischen Bereich verwendeten Spiegelteleskope. Die größeren Ausmaße der Radioteleskope werden nicht allein von der Forderung diktiert, möglichst schwache Radiointensitäten zu messen, sondern auch wegen des wesentlich schlechteren Auflösungsvermögens dieser Instrumente benötigt. Die Beobachtungen erfolgen bei Wellenlängen, die mindestens um den Faktor 10^5 größer sind als im optischen Bereich, und das Winkelauflösungsvermögen ist deshalb entsprechend gering. Es ist daher nicht verwunderlich, daß auch das größte in beiden Achsen bewegliche Radioteleskop, der bei Effelsberg (Eifel) aufgestellte 100-m-Spiegel des Max-Planck-Institutes für Radioastronomie in Bonn, bei einer Wellenlänge von 6 cm nur eine Winkelauflösung von 2,5 Bogenminuten besitzt. Dieser Wert ist, verglichen mit dem Auflösungsvermögen

wesentlich kleinerer optischer Teleskope, sehr schlecht. Hieraus wird verständlich, daß eine Identifikation der Radioquellen mit optisch sichtbaren Objekten mit nur einem Radioteleskop sehr schwierig ist.

Eine wesentliche Steigerung des Auflösungsvermögens der vorhandenen Radioteleskope läßt sich nur durch Simultanbeobachtungen eines Objekts mit weit voneinander entfernten Radioteleskopen erzielen. Durch Kombination der von den einzelnen Teleskopen erhaltenen Meßwerte erhält man ein „Bild“ hoher Auflösung von der Radioquelle. Die bisher größte bei diesem Verfahren verwendete Basislänge betrug ungefähr 80% des Erddurchmessers. Mit ihr wurde bei einer Wellenlänge von 13 cm eine Winkelauflösung von 0''001 erreicht. Dieser Wert übertrifft sogar das Auflösungsvermögen der optischen Teleskope.

Abschließend soll noch kurz die Empfindlichkeit radioastronomischer Instrumente mit der optischer Teleskope verglichen werden. Es ergibt sich, daß die modernen Radioteleskope Strahlungsquellen nachzuweisen gestatten, deren Intensitäten noch ungefähr 400mal schwächer sind als die Intensitäten der schwächsten, mit den beiden optischen Rieseninstrumenten gerade noch erfaßbaren Objekte. Es ist daher nicht ausgeschlossen, daß Objekte radioastronomisch beobachtet werden, deren optischer Nachweis mit den zur Verfügung stehenden Teleskopen überhaupt nicht möglich ist.

Beobachtungsgrundlagen

Zustandsgrößen der Sterne

Unter den Zustandsgrößen eines Sterns versteht man physikalische Kennwerte, die ihn als Ganzes eindeutig charakterisieren. Ihr Wert hängt vom gesamten inneren Aufbau des Sterns ab und kann für relativ lange Zeiträume unveränderlich sein. Daß sich die Zustandsgrößen eines Sterns im Laufe der Zeit doch verändern, liegt daran, daß in ihm Prozesse ablaufen, die zu einer Veränderung seines inneren Aufbaus führen. Solche, der direkten Beobachtung nicht zugänglichen Vorgänge sind ein Ausdruck der Entwicklung, die jeder Stern durchmacht. Die aus den Beobachtungen abgeleiteten Zustandsgrößen sind ein außerordentlich wichtiges Hilfsmittel für die notwendige Überprüfung der auf theoretischem Wege erhaltenen Ergebnisse über die Sternentwicklung.

Die nachfolgende Aufzählung der Zustandsgrößen wird mit jeweils einer kurzen Darstellung verbunden, wie die betreffende Größe bestimmt werden kann. Allerdings ist die Darstellung der Bestimmungsmethoden auf ein Mindestmaß beschränkt und deshalb keinesfalls erschöpfend. Das gleiche gilt auch für die Betrachtungen, die eine Wertung der Genauigkeit der verschiedenen Bestimmungsmethoden zum Gegenstand haben. An erster Stelle der Zusammenstellung ist die *Masse* M eines Sterns zu nennen. Sie läßt sich immer dann ermitteln, wenn Gravitationswirkungen zu beobachten sind. Die physikalische Grundlage bei der Auswertung derartiger Messungen stellt das Newtonsche Gravitationsgesetz dar.

In unserem Sonnensystem kann man aus der Bewegung der Planeten um die Sonne deren Masse mit Hilfe des 3. Keplerschen Gesetzes ableiten. Diese Möglichkeit scheidet leider bei

den Einzelsternen aus, da wir aus Gründen der Beobachtungsgenauigkeit nicht in der Lage sind, die eventuell um sie kreisenden Planeten mit Sicherheit nachzuweisen. Dagegen lassen sich Massenbestimmungen bei räumlich benachbarten und um einen gemeinsamen Schwerpunkt kreisenden Einzelsternen, sogenannten Doppelsternen, ähnlich wie im Planetensystem durchführen. In dem aus dem Gravitationsgesetz hervorgehenden 3. Keplerschen Gesetz ist die Massensumme der beiden Doppelsternkomponenten mit der großen halben Bahnachse der *relativen* Bahn a der massenärmeren Komponente $\mathfrak{M}_2$ um die massenreichere Komponente $\mathfrak{M}_1$ und die *Umlaufzeit* U von $\mathfrak{M}_2$ um $\mathfrak{M}_1$ durch die Gleichung

$$\frac{a^3}{U^2} = \mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2$$

verknüpft. In ihr sind die Massen der beiden Sterne in Einheiten der Sonnenmasse, die große halbe Achse a der relativen Bahn in *Astronomischen Einheiten* (Abk. AE; Abstand Erde — Sonne = $1,496 \cdot 10^8$ km) und die Umlaufzeit U in Jahren angegeben. Wie aus diesem Ausdruck hervorgeht, läßt sich für den Fall, daß nur die relative Bahn bekannt ist, lediglich die Massensumme des Doppelsternsystems bestimmen. Nur wenn es gelingt, die individuellen Bewegungen beider Komponenten um ihren *gemeinsamen* Schwerpunkt zu beobachten, wird eine sogenannte absolute Bahnbestimmung möglich. Dann erst kann mit Hilfe des Schwerpunktsatzes aus dem Verhältnis der nun bekannten großen Halbachsen a_1 , a_2 auch das Massenverhältnis berechnet werden:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{\mathfrak{M}_2}{\mathfrak{M}_1}.$$

Mit ihm und der aus der relativen Bahn ermittelten Massensumme lassen sich die Einzelmassen beider Komponenten in Einheiten des Sonnenwertes ableiten.

Der Anwendung dieser genauen Methode der Massenbestimmung sind leider sehr enge Grenzen gesetzt, deren Ursachen in der genauen Entfernungsbestimmung der Doppelsternsysteme liegen. Es darf nicht übersehen werden, daß man die

großen Bahnhalbachsen im Bogenmaß erhält und sie nur dann in das lineare Maß umrechnen kann, wenn die Entfernung des Systems bekannt ist. Weiterhin gilt es zu beachten, daß die große Halbachse a in das 3. Keplersche Gesetz mit der dritten Potenz eingeht. Das bedeutet aber, daß sich schon geringe Fehler in der Entfernungsbestimmung sehr stark auf das Ergebnis auswirken. Daher sind für exakte Massenbestimmungen eigentlich nur Doppelsternsysteme geeignet, die sich in Entfernungen kleiner als 30 pc von uns befinden. Für entferntere Sterne werden die parallaktischen Winkel kleiner als der mittlere Meßfehler ($\pm 0''015$) und die Entfernungsbestimmung entsprechend unsicher. Auf Grund dieser Schwierigkeiten liegen bis jetzt nur für etwa 30 Doppelsternkomponenten hinreichend genau bestimmte Massen vor. Dagegen sind zur Zeit ungefähr 50 000 Doppelstern- und Mehrfachsternsysteme bekannt.

Selbstverständlich besteht die Möglichkeit, bei einer großen Anzahl dieser Doppelsterne, aber auch bei Einzelsternen mit Hilfe anderer Methoden, in die allerdings sehr einschneidende Annahmen eingehen, Massenbestimmungen abzuleiten. Jedoch sind die dabei auftretenden Fehler im allgemeinen so groß, daß die Genauigkeit der Ergebnisse nur für statistische Untersuchungen ausreicht.

Als zweite Zustandsgröße eines Sterns soll die *Leuchtkraft* L genannt werden. Sie stellt ein Maß für die von ihm in der Zeiteinheit im gesamten Spektralbereich ausgestrahlte Energie dar. Anstelle der Leuchtkraft eines Sterns wird auch häufig die ihr äquivalente absolute bolometrische Helligkeit M_{bol} verwendet. Beide Größen sind durch die Beziehung

$$L = 2,72 \cdot 10^{35-0,4M_{\text{bol}}}$$

miteinander verbunden. Die Bestimmung der absoluten bolometrischen Helligkeit M_{bol} ist hinreichend genau allerdings nur möglich, wenn die Entfernung des betreffenden Sterns und seine scheinbare Helligkeit bekannt sind. Außerdem ist die Wirkung der eventuell vorhandenen interstellaren Extinktion unbedingt zu berücksichtigen. Die Sonne besitzt eine Leuchtkraft von $L = 3,90 \cdot 10^{23}$ kW.

Zu den Zustandsgrößen gehört ebenfalls die *effektive Temperatur* T_e . Sie ist die Temperatur, die ein schwarzer Strahler besitzen müßte, um je Flächen- und Zeiteinheit die gleiche Energiemenge auszustrahlen wie der betreffende Stern. Dieser Vergleich setzt voraus, daß die Sternstrahlung identisch mit der Hohlraumstrahlung ist, obwohl eine derartige Gleichheit tatsächlich nicht besteht. Die Rechtfertigung für ein solches Vorgehen rührt aber daher, daß hinreichend genaue Kenntnisse über die Abweichung der Sternstrahlung von der Hohlraumstrahlung in dem zugänglichen Spektralbereich vorliegen. Nach einer entsprechenden Korrektur ist es daher möglich, die Beobachtungswerte mit Energieverteilungskurven schwarzer Strahler zu vergleichen.

Aus den bis jetzt genannten Zustandsgrößen lassen sich weitere durch Kombinationen untereinander ableiten: Mit der Angabe der effektiven Temperatur ist eindeutig bestimmt, wieviel Energie E aus 1 cm^2 Sternoberfläche in der Zeiteinheit (s) austritt. Andererseits gibt die Leuchtkraft L eines Sterns die gesamte je Zeiteinheit von seiner Oberfläche in den Weltraum abgestrahlte Energiemenge an. Folglich erhält man durch die Division beider Größen miteinander –

$$\frac{L}{E} = 4 \pi R^2$$

– die Oberfläche des Sterns und damit auch seinen *Radius* R . Als Einheit wird gewöhnlich der Sonnenradius gewählt, der als einziger Sternradius genau bekannt ist und $6,960 \cdot 10^5 \text{ km}$ beträgt. Abgesehen von der Sonne versagen die trigonometrischen Verfahren zur Radienbestimmung anderer Sterne völlig. Dafür gelang es, mit dem neuentwickelten Intensitätsinterferometer die Durchmesser einiger heller Sterne genau zu messen. Auch bei einigen Doppelsternsystemen, die sich bei ihrer Bewegung in ihren Bahnen periodisch bedecken, ließen sich in einigen Fällen aus den Bahnelementen die Radien der Sterne ableiten. Die Genauigkeit der zuletzt erwähnten Methode ist jedoch nicht sehr hoch.

Falls der Radius und die Masse eines Sterns bekannt sind, ergibt sich seine *mittlere Dichte* $\bar{\varrho}$ aus der Beziehung

$$\bar{\varrho} = \frac{3\mathfrak{M}}{4\pi R^3}.$$

Ferner erlaubt die Kenntnis der Masse und des Radius eines Sterns die Berechnung der *Schwerebeschleunigung* g , die an seiner Oberfläche herrscht. Es gilt die Gleichung

$$g = \frac{G\mathfrak{M}}{R^2},$$

in der neben den schon erklärten Größen die Gravitationskonstante G ($G = 6,668 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$) als Proportionalitätsfaktor neu auftritt.

Die *mittlere Energiefreisetzung* $\bar{\varepsilon}$ je Gramm Sternmaterie und Sekunde ergibt sich aus der Division der Leuchtkraft durch die Masse des betreffenden Sterns

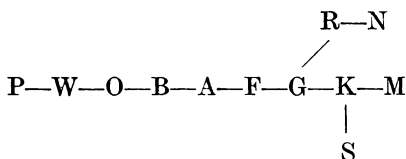
$$\bar{\varepsilon} = \frac{L}{\mathfrak{M}}.$$

Als eine der wichtigsten Zustandsgrößen hat sich der *Spektraltyp* (oder die *Spektralklasse*) eines Sterns erwiesen. Durch seine Angabe wird die Art des Sternspektrums weitgehend charakterisiert. Es besteht im allgemeinen aus einem kontinuierlichen Spektrum, dem eine größere Anzahl von Absorptionslinien überlagert sind. Die Zahl der in den Sternspektren auftretenden Emissionslinien ist dagegen viel kleiner.

Das kontinuierliche Spektrum der Sterne stammt von den ständig ablaufenden gebunden-freien und frei-freien Übergängen in der heißen, gasförmigen Sternmaterie. Da alle in der Sternmaterie enthaltenen Elemente an den Strahlungsprozessen beteiligt sind, beobachten wir nur die Überlagerung der individuellen Spektren. Die sich jeweils am kurzen Ende der Linienspektren anschließenden Bereiche, in denen eine kontinuierliche Strahlung emittiert wird, überlappen sich insgesamt zu einem lückenlosen Band. Die Energieverteilung in einem solchen Spektrum hängt von der effektiven Temperatur des Sterns ab. Die Lage

des Maximums der Energieausstrahlung kann mit Hilfe des Wienschen Verschiebungsgesetzes berechnet werden.

Diesem eng mit dem Planckschen Strahlungsgesetz verbundenen Zusammenhang wurde zunächst keine besondere Beachtung geschenkt. Vielmehr konzentrierte sich die Aufmerksamkeit der Astronomen im vorigen Jahrhundert auf die dem kontinuierlichen Spektrum aufgeprägten Spektrallinien. Mit der von Kirchhoff und Bunsen entwickelten Spektralanalyse gelang es sehr bald, einige der Linien mit Elementen zu identifizieren, die auch auf der Erde vorkommen. Daneben fand man in der Sonnenatmosphäre ein unbekanntes Element, das man Helium („helios“: Sonne) nannte und erst später auf der Erde nachweisen konnte. Bereits im Anfangsstadium dieses neuen Forschungszweiges zwang die Fülle des Beobachtungsmaterials eine strenge Einordnung in ein Schema, das eine genaue Übersicht über die vielfältigen Erscheinungen gewährleistete. Als Richtlinie bei der Aufstellung der verschiedenen Spektralklassen galt die Forderung, einen möglichst gleichmäßigen Übergang der spektralen Merkmale der einzelnen Klassen ineinander zu garantieren. Erst später wurde die große Bedeutung des kontinuierlichen Spektrums für die Spektralklassifikation und die quantitative Spektralanalyse erkannt und das bestehende Klassifikationsschema entsprechend abgeändert. In seiner heutigen Form ist es gleichzeitig eine Temperaturskala. Jede Spektralklasse ist durch einen Großbuchstaben gekennzeichnet. In der Anordnung



stellen die Spektralklassen der sogenannten Hauptfolge eine vom Spektraltyp W nach M laufende Sequenz von Sternen abnehmender Temperatur dar. Neben dieser Hauptfolge treten zwei Nebenfolgen auf, denen die Spektralklassen R, N und S angehören. Zu ihrer feineren Charakterisierung sind alle Spektraltypen mit Ausnahme von P und W dezimal unterteilt.

Falls im Spektrum Besonderheiten auftreten, kann das durch Anhängen von Kleinbuchstaben an den Spektraltyp vermerkt werden.

Im Sprachgebrauch hat es sich eingebürgert, die Spektralklassen von P bis A als „frühe“, die von F bis G als „mittlere“ und die übrigen als „späte“ Typen zu bezeichnen, ohne damit heute noch eine bestimmte kosmogonische Vorstellung zu verbinden. Zusätzlich zu der Einordnung eines Sternspektrums in eine Temperaturskala wird soweit als möglich auch die *Leuchtkraftklasse* eines Sterns angegeben. Die Klassifikation der Sternspektren hinsichtlich Spektraltyp und Leuchtkraftklasse erfolgt mit dafür besonders geeigneten Spektrallinien. So wird der Spektraltyp an Hand des Auftretens „temperaturempfindlicher“ Linien geschätzt, während die Leuchtkraftklasse aus dem Aussehen von „druckempfindlichen“ Linien abgeleitet wird.

Die Temperaturempfindlichkeit bestimmter Linien einiger Elemente erklärt sich aus der Tatsache, daß die entsprechenden gebundenen Übergänge nur in einem engen Temperaturintervall zahlreich genug sind, um nachgewiesen zu werden. Dagegen sind andere Übergänge nur in engen Dichtegrenzen in genügender Menge möglich und erlauben somit Einblicke in die Druckverhältnisse in einer Sternatmosphäre, auf Grund deren Schlüsse auf die Schwerebeschleunigung an der Sternoberfläche möglich sind. Insgesamt unterscheidet man gegenwärtig sieben verschiedene Leuchtkraftklassen, die mit römischen Ziffern bezeichnet werden:

Ia—0:	Überriesen
Ia:	(sehr helle,
Iab:	helle und
Ib:	schwächere)
II:	helle Riesen
III:	normale Riesen
IV:	Unterriesen
V:	Zwerge (Hauptreihensterne)
VI:	Unterkzwerge
wVII:	weiße Zwerge.

Es wurde bereits erwähnt, daß das Auftreten und die Stärke von Absorptionslinien in einem Sternspektrum nicht allein von der chemischen Beschaffenheit der Sternmaterie, sondern in starkem Maße auch von der in der Sternatmosphäre herrschenden Temperatur und von dem Druck abhängen. Daraus geht klar hervor, daß es völlig falsch wäre, aus den meßbaren relativen Linienbreiten der in einem Sternspektrum vorkommenden Absorptionslinien direkt auf eine Häufigkeitsverteilung der chemischen Elemente zu schließen. Die tatsächliche chemische Zusammensetzung der Sternmaterie ergibt sich nur aus einer quantitativen Spektralanalyse, bei der gleichzeitig alle anderen physikalischen Größen, die eine Sternatmosphäre charakterisieren, mitbestimmt werden müssen.

Aus dem Aussehen der Spektrallinien, dem sogenannten Linienprofil, kann eine weitere Zustandsgröße, die *Rotationsgeschwindigkeit* v_{rot} eines Sterns um seine Rotationsachse, ermittelt werden. Dabei macht man von dem Dopplerprinzip Gebrauch, nach dem bei der Bewegung einer Lichtquelle in der Gesichtslinie relativ zum Beobachter eine Frequenzänderung des ankommenden Lichtes eintritt. Falls ein Stern rotiert und seine Rotationsachse nicht zufällig genau in die Richtung zur Erde zeigt, bewegt sich eine Hälfte seiner Oberfläche auf uns zu, die andere von uns weg. Da alle Teile der uns zugewendeten Sternoberfläche zur Entstehung der Linien beitragen, ergibt sich insgesamt eine Linienverbreiterung, deren Größe mit der Rotationsgeschwindigkeit zusammenhängt.

Die durch die Rotation des Sterns verursachte Dopplerverbreiterung kann im allgemeinen von den anderen, allein durch den physikalischen Zustand in der Sternatmosphäre herrührenden Verbreiterungsmechanismen der Linien getrennt werden. Allerdings geht in die Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit der Sterne die wesentliche Voraussetzung ein, daß wir praktisch senkrecht auf die Rotationsachse des betreffenden Sterns blicken. Da diese Annahme beim größten Teil der Sterne kaum erfüllt ist, erhalten wir auch nicht die tatsächlichen Werte der Rotationsgeschwindigkeiten. Setzt man aber voraus, daß die Rotationsachsen der Sterne zufällig im Raum verteilt sind, dann lassen sich aus den beobachteten Geschwindigkeiten

zunächst wertvolle statistische Aussagen über die wahren Rotationsgeschwindigkeiten gewinnen.

Als letzte der zu besprechenden Zustandsgrößen ist das *Magnetfeld* zu nennen. Es macht sich sogar durch eine Aufspaltung der Spektrallinien bemerkbar. Diese als Zeeman-Effekt bekannte Erscheinung beruht auf der Wechselwirkung der um die Atome kreisenden Elektronen mit dem Magnetfeld. Unter dessen Einfluß vollführen die Elektronen neben ihrer Bahnbewegung noch eine Präzisionsbewegung. Dabei überlagert sich die Frequenz der Präzisionsbewegung mit der normalen Strahlungsfrequenz; das führt zur Aufspaltung der Energieniveaus. Wegen der geringen Größe des Zeeman-Effektes sind für derartige Untersuchungen nur Sterne mit wenigen, aber scharfen Linien im Spektrum geeignet. Außerdem müssen die Rotationsachsen dieser Sterne im Idealfall möglichst genau auf den Beobachter gerichtet sein, damit keine Verbreiterung der Spektrallinien durch die Rotation eintreten kann.

Einen Überblick über die vorkommenden Werte einiger Zustandsgrößen vermittelt Tabelle 1. In ihr sind die diesbezüglichen Daten in Einheiten der Sonnenwerte angegeben. Ein Vergleich zwischen den Zustandsgrößen zeigt bei der Leuchtkraft, der mittleren Dichte und der mittleren Energiefreisetzung eine beachtlich große Variationsbreite, während andere Zustandsgrößen, zum Beispiel die Masse und die effektive Temperatur, nur in einem verhältnismäßig schmalen Bereich streuen. Ganz ungewöhnliche Werte finden sich bei den *weißen Zwergen*. Unter ihnen gibt es Objekte, die nur die Größe der Erde haben, deren Masse aber mit der Sonnenmasse zu vergleichen ist. Die sich ergebende außerordentlich hohe mittlere Dichte der gasförmigen Sternmaterie deutet darauf hin, daß hier extreme physikalische Verhältnisse vorliegen. Neben anderen auftretenden Eigenschaften müssen die Atomkerne sehr dicht gepackt sein. In diesem Zustand ist die ideale Gasgleichung nicht mehr gültig und das Verhalten der Materie unter diesen Verhältnissen muß außer einigen anderen Beziehungen von einer speziellen Gasgleichung beschrieben werden. In ihr tritt als physikalischer Parameter nur noch der Gasdruck, dagegen nicht mehr die Gastemperatur auf. Allgemein wird

Tabelle 1: Zahlenwerte einiger Zustandsgrößen der Sterne

Die Zustandsgrößen der Sterne sind in Einheiten der Sonnenwerte angegeben, die am Anfang der Tabelle stehen.

	Spektral- klasse	Leuchtkraft kW	Masse kg	Radius km	effektive Tempera- tur °K	mittlere Dichte g/cm ³	mittlere Energie- freisetzung W/g	Schwerebe- schleuni- gung m/s ²
	Sonne G 1	$3,90 \cdot 10^{23}$	$1,99 \cdot 10^{30}$	$6,960 \cdot 10^5$	5785	1,4	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^2$
Hauptreihen- sterne	B0	$8 \cdot 10^3$	15	9,0	3,8	0,02	50	0,2
	A0	60	3	2,2	1,8	0,3	20	0,6
	F0	6	1,5	1,5	1,3	0,5	4	0,7
	G0	1	1,0	1,0	1,0	1,0	1	1,0
	K0	0,4	0,8	0,8	0,8	1,6	0,5	1,2
	M0	0,06	0,5	0,6	0,6	2,0	0,1	1,4
Riesen- sterne	F0	15	2,5	4	1,0	0,04	6	0,2
	G0	40	3,1	10	0,9	$3 \cdot 10^{-3}$	10	0,03
	K0	80	3,5	25	0,7	$2 \cdot 10^{-4}$	20	$6 \cdot 10^{-3}$
	M0	400	3,8	75	0,6	$9 \cdot 10^{-6}$	100	$7 \cdot 10^{-4}$
Über- riesen	B0	$2 \cdot 10^5$	50	20	4,7	$6 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^3$	0,1
	A0	$2 \cdot 10^4$	15	40	1,9	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^{-3}$
	F0	$6 \cdot 10^3$	13	65	1,1	$5 \cdot 10^{-5}$	500	$3 \cdot 10^{-3}$
	weiße Zwerge							
	A0	$5 \cdot 10^{-4}$	0,6	0,02	1,2	$7 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^3$

dieser ungewöhnliche Zustand der Materie als „entartet“ bezeichnet.

Bereits bei der Aufzählung der verschiedenen Zustandsgrößen wurden einige von ihnen aus der Kombination anderer gewonnen. Darüber hinaus gibt es noch mehr Zusammenhänge zwischen den Zustandsgrößen, von denen hier allerdings nur die wichtigsten Erwähnung finden sollen.

Von grundlegender Bedeutung für die Astrophysik ist die Be-

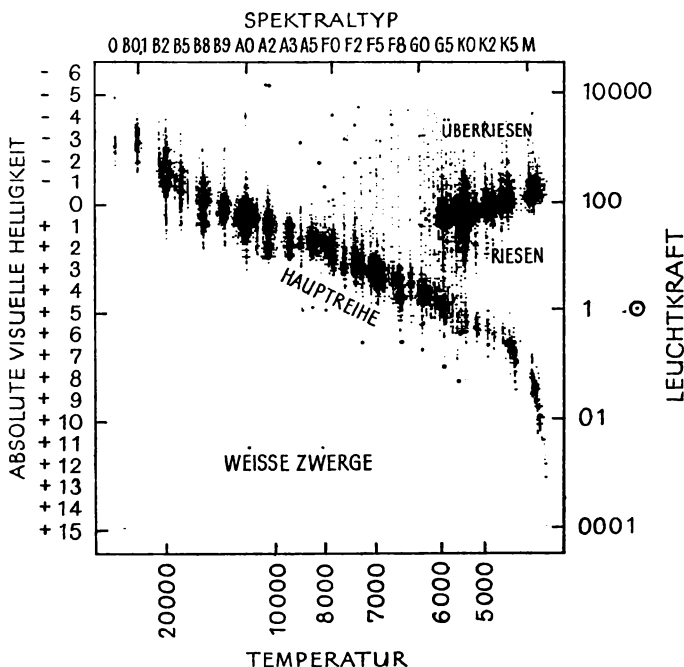


Abb. 3. Lage der Sterne im Hertzsprung-Russell-Diagramm. Die Besetzungsdichte der Sterne ist auf der Hauptreihe, die sich diagonal durch das Diagramm erstreckt, und im Riesenast, der rechts darüber liegt, besonders groß. Zwischen beiden Gebieten befindet sich die Hertzsprung-Lücke. Die streifige Struktur der Sternanordnung rührt von der schematischen Unterteilung in Spektralklassen her und hat keine astrophysikalische Bedeutung. (Bei den Leuchtkräften kleiner als die Sonnenleuchtkraft (1) ist auf der rechten Seite der Ordinate nur die Ziffernfolge nach dem Komma angegeben.)

ziehung zwischen der *effektiven Temperatur* (oder dem Spektraltyp) und der *Leuchtkraft* (oder der absoluten Helligkeit) der Sterne. Nachdem E. Hertzsprung im Jahre 1905 nachgewiesen hatte, daß es Sterne gleicher Temperatur, aber unterschiedlicher Leuchtkraft gibt, trug H. N. Russell 1913 beide Zustandsgrößen in einem Diagramm gegeneinander auf. Dabei zeigte sich, daß sich die Sterne vorzugsweise in zwei getrennten Bereichen anordnen.

In der Folgezeit hat sich das zuverlässige Beobachtungsmaterial so angehäuft, daß nun ein ziemlich klares Bild über die Verteilung der Sterne im *Hertzsprung-Russell-Diagramm* besteht. In Abbildung 3 ist das Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) eines Sternfeldes dargestellt. Bei der Betrachtung des Diagramms fällt sofort die starke Konzentration der Sterne in zwei relativ schmalen Gebieten ins Auge. Der längere der beiden „Äste“ erstreckt sich von den Sternen vom Spektraltyp O (kurz: O-Sterne) mit einer absoluten visuellen Helligkeit von etwa -6^m diagonal durch das ganze Diagramm bis in das Gebiet, in dem sich die M-Sterne befinden, deren absolute visuelle Helligkeit etwa $+14^m$ beträgt. Auf diesem auch als Hauptreihe bezeichneten Ast befinden sich die Sterne der Leuchtkraftklasse V, also die Zwergsterne, zu denen auch unsere Sonne gehört. Rechts, oberhalb der Hauptreihe, erstreckt sich vom Spektraltyp G an bis hin zu den M-Sternen ein weiteres Gebiet, in dem sich die Riesensterne aufhalten. Sie besitzen, verglichen mit den Hauptreihensternen gleichen Spektraltyps, im Mittel eine um 6^m größere absolute Helligkeit.

Das zwischen beiden Ästen etwa beim Spektraltyp F8 liegende Gebiet ist auffallend dünn mit Sternen besetzt und wird gewöhnlich als „Hertzsprung-Lücke“ bezeichnet. Etwa 10^m unter der Hauptreihe befindet sich ein gleichfalls nur schwach mit Sternen besetztes Gebiet, in dem die weißen Zwerge liegen. Die Lage der Sterne, die anderen Leuchtkraftklassen angehören, geht aus Abbildung 3 nicht hervor. Überhaupt darf man nicht außer acht lassen, daß die Einordnung der Sterne in Leuchtkraftklassen ähnlich wie bei der Spektralklassifikation nach einem Baukastenprinzip erfolgt und nicht ganz frei von der subjektiven Beurteilung des Beobachters ist. Da es aber bei

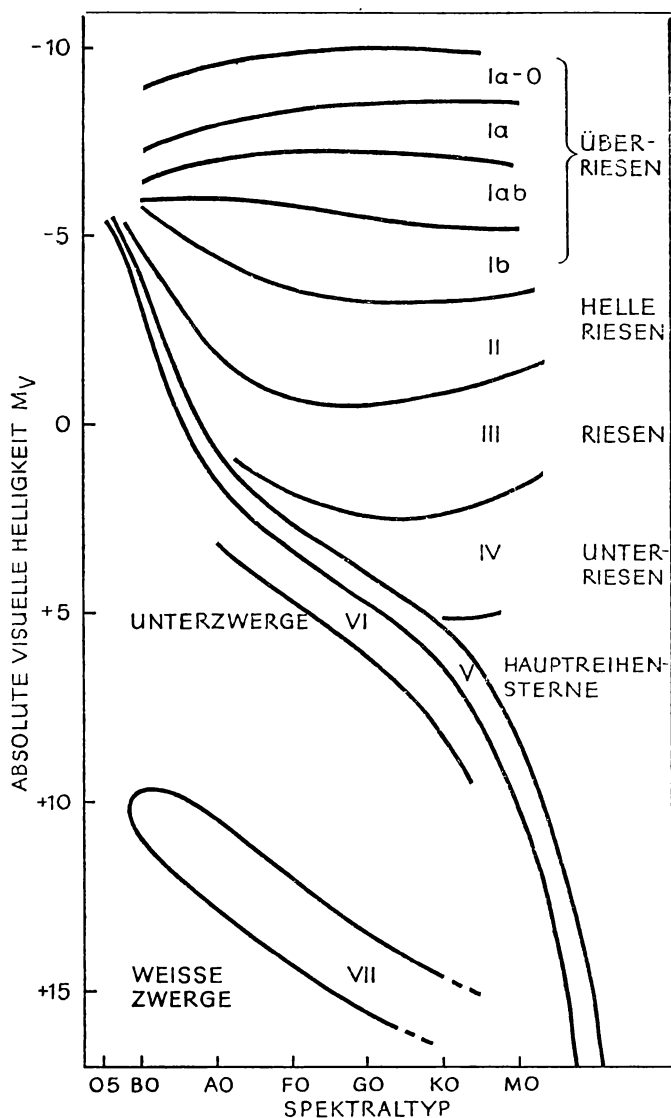


Abb. 4. Lage der verschiedenen Leuchtkraftklassen im Hertzsprung-Russell-Diagramm.

diesen Untersuchungen meistens nur um statistische Aussagen geht, wirken sich Fehlentscheidungen kaum aus.

Auf Grund der vorliegenden Erfahrungen wurde das Hertzsprung-Russell-Diagramm schematisch in ausgedehnte Bereiche unterteilt, in denen sich die typischen Vertreter der einzelnen Leuchtkraftklassen befinden (Abb. 4).

Richtet man das Hauptaugenmerk der Betrachtung des in Abbildung 3 dargestellten Hertzsprung-Russell-Diagramms auf die Sternbesetzungsdichte in beiden Gebieten, so zeigen sie keine bemerkenswerten Unterschiede. Es liegt daher nahe, daraus auf das etwa gleichhäufige Vorkommen von Riesen-

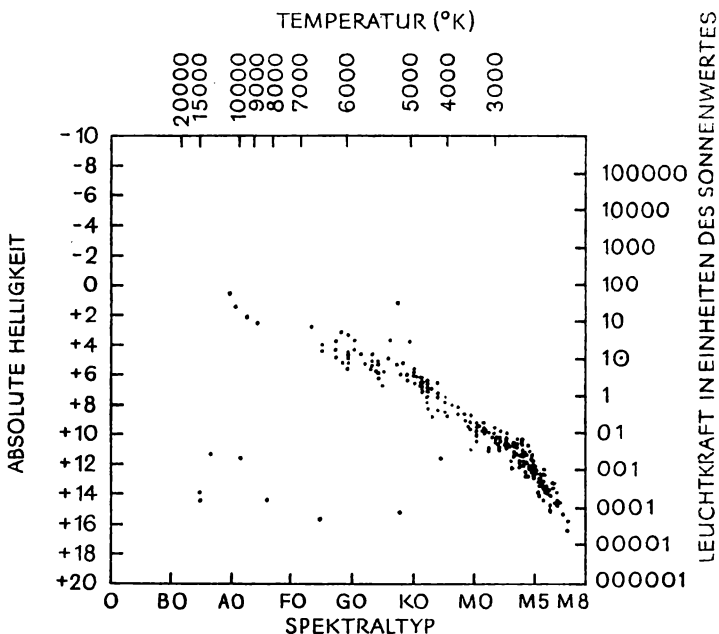


Abb. 5. Hertzsprung-Russell-Diagramm der Sterne der Sonnenumgebung mit Entfernungen bis zu 10 pc. Außer der Hauptreihe ist auch das Gebiet der weißen Zwerge mit Sternen besetzt. Die Riesensterne fehlen in der näheren Sonnenumgebung fast ganz. (Bei den Leuchtkräften kleiner als die Sonnenleuchtkraft ist auf der rechten Seite der Ordinate nur die Ziffernfolge nach dem Komma angeben.)

und Zwergsternen der mittleren und späten Spektraltypen zu schließen. Diese Folgerung wäre jedoch nur dann zulässig, wenn die im Hertzsprung-Russell-Diagramm eingetragenen Sterne alle aus *einem* Raumbereich stammen würden. Das ist aber bei dem in Abbildung 3 gezeigten Diagramm nicht der Fall. Dort sind Sterne, die sich in sehr unterschiedlichen Raumbereichen befinden, eingetragen. Dieses Hertzsprung-Russell-Diagramm stellt gewissermaßen das gerade gewonnene und noch nicht weiterbearbeitete Beobachtungsmaterial dar. Da die absolute Helligkeit der Riesen- und erst recht der Überriesensterne größer als die der Zwergsterne ist, können die erstgenannten bis in viel größere Entfernungen verfolgt werden als die Hauptreihensterne. Das bedeutet aber, daß der mit einem Fernrohr überblickbare Raumbereich bei den helleren Sternen viel größer ist als bei den schwächeren Objekten. Daher ist es ganz natürlich, daß die hellen Sterne gegenüber den schwächeren bei der Beobachtung bevorteilt werden und dieser Effekt bei der Reduktion des Beobachtungsmaterials zu berücksichtigen ist.

Ein Hertzsprung-Russell-Diagramm, das die tatsächlichen Häufigkeiten der Sterne verschiedener Leuchtkraftklassen veranschaulicht, ist in Abbildung 5 wiedergegeben. Darin sind alle Sterne der Sonnenumgebung eingetragen, deren Entfernung nicht größer als 10 pc ist. In diesem Diagramm springt sofort das völlige Fehlen des Riesenastes ins Auge. Auffällig ist ferner, daß die Zahl der weißen Zwerge in der näheren Sonnenumgebung relativ hoch ist. Weiterhin ist längs der Hauptreihe eine deutliche Zunahme der Besetzungsdichte beim Übergang von den frühen zu den späten Spektraltypen zu erkennen. Nach dem vorliegenden Beobachtungsmaterial sind in der Sonnenumgebung die Zwergsterne die am häufigsten vorhandenen Objekte. Mit großem Abstand folgen die weißen Zwerge, deren Beobachtbarkeit wegen ihrer sehr geringen absoluten Helligkeit stark eingeschränkt ist. Riesensterne wurden in der unmittelbaren Sonnenumgebung nicht gefunden. Unter den Hauptreihensternen sind die mit späten Spektraltypen die zahlreichsten, während die frühen Hauptreihensterne relativ selten auftreten.

Durch eine Erweiterung der Entfernungsgrenzen und unter sorgfältiger Berücksichtigung aller dabei auftretenden Auswahl-effekte gelang es, auch einigermaßen sichere Aussagen über die Häufigkeit der Riesen- und Überriesensterne zu gewinnen. Nach diesen Untersuchungen ist die Häufigkeit der Zwergsterne im Mittel ungefähr 100mal größer als die der Riesen- und Überriesensterne zusammengenommen. Die Häufigkeit der weißen Zwerge kann nach vorsichtigen Schätzungen bis zu 50% der Anzahl der Hauptreihensterne betragen. Die letzten Aussagen gelten allerdings nur für die Sternbevölkerung der Sonnenumgebung.

Mit diesen Betrachtungen soll die einführende Beschreibung des Hertzsprung-Russell-Diagramms abgeschlossen werden. In den kommenden Abschnitten wird sie noch erweitert, indem die Eigenheiten dieses Diagrammes mit den Problemen der Sternentwicklung in Verbindung gebracht werden.

Bereits bei der Darstellung der in der Astronomie gebräuchlichen photometrischen Systeme wurde auf den wichtigen Zusammenhang zwischen der effektiven Temperatur und dem Farbenindex hingewiesen. Da in sehr vielen Fällen nur die Möglichkeit besteht, die Farbenindizes der Sterne zu bestimmen, wird diese Größe oft als Maß für die effektive Temperatur verwendet. Der Farbenindex der Sterne läßt sich zusammen mit ihrer Leuchtkraft bzw. ihrer absoluten Helligkeit in einem Diagramm, dem sogenannten Farben-Helligkeits-Diagramm (siehe z. B. Abb. 17 und 18), eintragen, das dem Hertzsprung-Russell-Diagramm völlig äquivalent ist.

Ein weiterer sehr wichtiger Zusammenhang besteht zwischen der Masse der Sterne und den dazugehörigen Leuchtkräften. Am klarsten kommt die Beziehung bei den Hauptreihensternen zum Ausdruck. In Abbildung 6 sind die Leuchtkräfte der Sterne, von denen zuverlässige Beobachtungen vorliegen, über ihren Massen (gemessen in Einheiten des Sonnenwertes) aufgetragen. Die Masse-Leuchtkraft-Beziehung der normalen Riesensterne fällt mit der der Hauptreihensterne zusammen. Dagegen weichen die weißen Zwerge, aber auch einige Komponenten in extrem engen Doppelsternsystemen von dieser Beziehung erheblich ab. Die Masse-Leuchtkraft-Relation der Haupt-

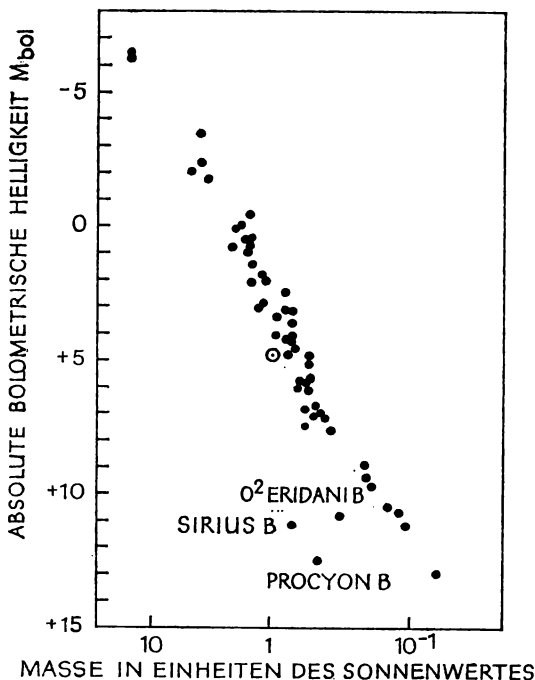


Abb. 6. Masse-Leuchtkraft-Beziehung der Hauptreihensterne. Über den in Einheiten des Sonnenwertes angegebenen Massen der Sterne sind ihre absoluten bolometrischen Helligkeiten eingetragen. Die Sonne ist durch einen Kreis symbolisiert. Die geringe Krümmung der abfallenden Kurve in Richtung schwacher Helligkeiten weist darauf hin, daß sich der in die Masse-Leuchtkraft-Beziehung eingehende Exponent etwas mit der Sternmasse ändert. Die links unterhalb der Hauptreihe liegenden Punkte kennzeichnen die Lage von drei weißen Zwergen, die einer anderen Masse-Leuchtkraft-Beziehung gehorchen.

reihensterne drückt aus, daß die Leuchtkraft eines Sterns einer höheren Potenz seiner Masse proportional ist. In erster Näherung beträgt der Exponent 3,15; er ändert sich aber mit der Sternmasse. Für unsere Betrachtung genügt jedoch die vereinfachte Beziehung

$$L = \text{const} \cdot M^3.$$

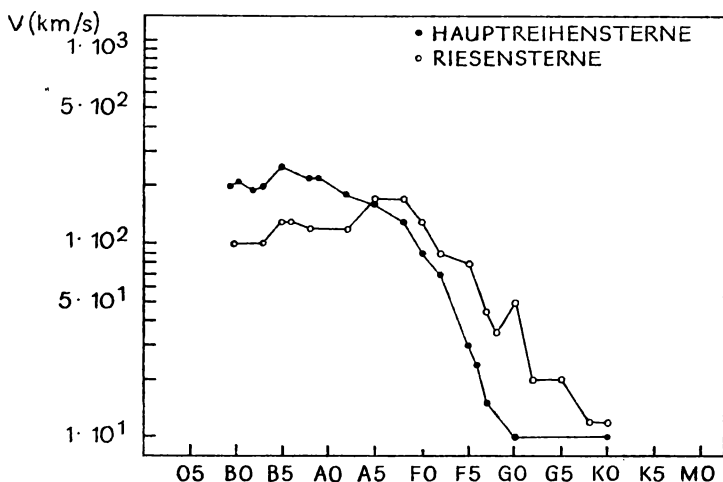


Abb. 7. Zusammenhang zwischen der mittleren Rotationsgeschwindigkeit und dem Spektraltyp für die Hauptreihen- und Riesensterne. Die höchsten Rotationsgeschwindigkeiten werden bei den Sternen frühen Spektraltyps beobachtet. Beide Kurven zeigen den gleichen starken Abfall, der ungefähr beim Spektraltyp F2 einsetzt. Die Rotationsgeschwindigkeiten der M-Sterne liegen bereits unter der Nachweisbarkeitsgrenze.

Trägt man die Spektraltypen zusammen mit den abgeleiteten Rotationsgeschwindigkeiten in einem Diagramm (siehe Abb. 7) gegeneinander auf, so zeigt sich auch zwischen diesen Zustandsgrößen ein Zusammenhang. In Abbildung 7 sind allerdings nur die Mittelwerte der Rotationsgeschwindigkeiten über den Spektraltypen der Sterne eingezeichnet. Der rasche Abfall der mittleren Rotationsgeschwindigkeiten beim Übergang von Sternen frühen Spektraltyps zu späten Sternen ist deutlich zu erkennen. Bei den M-Sternen liegen die Rotationsgeschwindigkeiten bereits unter der Nachweisgrenze.

Neben den schon beschriebenen Zusammenhängen zwischen den Zustandsgrößen existieren noch weitere, die aber nicht so wesentlich für die nachfolgenden kosmogonischen Betrachtungen sind und deshalb bei dieser Besprechung unberücksichtigt bleiben.

Die im vorangegangenen Abschnitt eingeführten Zustandsgrößen charakterisieren die Sterne als Ganzes. Diese Aussagen stellen wertvolle Informationen für bestimmte statistische Untersuchungen dar, erlauben aber noch keinen genauen Einblick in die tatsächlichen physikalischen Verhältnisse in einem Stern. Überhaupt ist es bei jeder Art von Beobachtungen im optischen Spektralbereich und im Radiofrequenzgebiet grundsätzlich ausgeschlossen, in das Innere der Sterne zu „sehen“. Das liegt keinesfalls an der Qualität der astronomischen Geräte oder den störenden Einflüssen der Erdatmosphäre, sondern hat eine rein physikalische Ursache: Die später in den Weltraum gelangende Strahlungsenergie wird im Innern der Sterne durch eine lange Kette von Absorptions- und Emissionsprozessen von Atom zu Atom „weitergereicht“, bis die einzelnen Energie-„Pakete“ (Photonen oder auch Lichtquanten) in die Nähe der Sternoberfläche gelangt sind. Dort ist die Materiedichte schon ziemlich klein, und es besteht nur noch eine relativ geringe Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Lichtquanten wieder auf ein Atom treffen, von dem sie absorbiert werden könnten. Daher verlassen sie zum größten Teil die äußersten Schichten des Sterns ohne weitere Wechselwirkung. Im umgebenden interstellaren Raum ist die Einfangwahrscheinlichkeit für die Photonen noch kleiner als in den Sternatmosphären, aber nicht Null. Darum durchlaufen die meisten von einem Stern ausgesandten Lichtquanten ungehindert den interstellaren Raum. Von ihnen gelangt auch ein Bruchteil zur Erde. Es ist verständlich, daß die beobachtbaren Photonen lediglich Einblicke in den physikalischen Zustand derjenigen Atome in den Sternatmosphären gewähren, von denen sie emittiert wurden. Wie wir aber wissen, befinden sich diese Atome nur in einer dünnen Schicht unmittelbar an der Sternoberfläche.

Natürlich gelangen im statistischen Mittel gelegentlich auch einmal Lichtquanten aus etwas tiefergelegenen Gebieten der Sterne in den Weltraum; jedoch ist ihre Anzahl äußerst gering.

Auf der Sonne wird die Schicht, aus welcher der weitaus größte

Anteil des Sonnenlichtes unmittelbar in den Weltraum gestrahlt wird, als Photosphäre bezeichnet. Ihre Dicke beträgt nur etwa 500 km, das heißt, daß sie, von der Erde aus gesehen, nur unter einem Winkel von $0^{\circ}5'$ erscheint. Aus diesem Grunde scheint die Sonne selbst im Fernrohr einen „scharfen“ Rand zu besitzen.

Die einzige Möglichkeit, direkt in die mittelpunktsnahen Gebiete der Sterne zu „sehen“, besteht in der Beobachtung des von ihnen ausgehenden Neutrinostroms. Wie uns bekannt ist, besitzen diese Elementarteilchen die Eigenschaft wegen ihrer sehr schwachen Wechselwirkung, ungehindert den ganzen Stern zu durchdringen. Allerdings sind noch große technische Schwierigkeiten zu überwinden, um Neutrinos in genügender Anzahl in den dafür geeigneten irdischen Apparaturen zu Reaktionen zu „zwingen“, die Rückschlüsse auf den physikalischen Zustand im Sterninnern erlauben würden.

Der einzige Ausweg aus der bestehenden Situation besteht in einer theoretischen Untersuchung der Verhältnisse im Sterninnern, wobei man die dafür wesentlichen Grundgesetze heranzieht.

Da die Zustandsgrößen eines Sterns von seinem inneren Aufbau abhängen, besteht eine Möglichkeit der Überprüfung der theoretischen Ergebnisse durch den Vergleich der Beobachtungswerte mit den modellmäßig berechneten Zustandsgrößen. Man darf annehmen, daß im Falle einer Übereinstimmung der gemessenen mit den berechneten Zustandsgrößen das betreffende Sternmodell dem tatsächlichen Sternaufbau nahekommt. Bei der Kompliziertheit der Rechnungen lassen sich jedoch vereinfachende Annahmen nicht umgehen. So wird meistens vorausgesetzt, daß Magnetfelder in den Sternen keine Rolle spielen. Außerdem wird die Sternrotation vernachlässigt und der Sternaufbau kugelsymmetrisch angenommen. Als Ergebnis der Modellrechnungen erhält man für jeden Ort im Stern eine Angabe über die physikalisch interessierenden Größen, zum Beispiel Temperatur, Dichte, Druck, und die chemische Zusammensetzung der Sternmaterie. Darüber hinaus ergeben sich Zustandsgrößen für das berechnete Sternmodell.

Innerhalb des relativ kurzen Zeitraums, in dem astrophysikalische Beobachtungen angestellt werden, ließen sich keine verbürgten Veränderungen an den Zustandsgrößen der Sterne nachweisen. Aus davon unabhängigen geologischen Untersuchungen über das Vorkommen von Pflanzen geht ziemlich sicher hervor, daß sich während der letzten 10^9 Jahre das Klima auf der Erde nur ganz unwesentlich geändert haben kann. Daraus folgt aber, daß auch die Leuchtkraft der Sonne in dieser Zeit nahezu gleichgeblieben sein muß. Auch der innere Aufbau der Sonne kann sich nicht während der überdeckten Zeitspanne entscheidend geändert haben. Es ist möglich, diesen Schluß auch auf die Mehrzahl der anderen Sterne zu übertragen. Allgemein bringt diese Aussage zum Ausdruck, daß sich die Sterne zumindest zeitweilig in einem stabilen Gleichgewichtszustand befinden müssen und daß es offenbar Entwicklungsstadien gibt, in denen sich der Sternaufbau durch eine Folge von Gleichgewichtsmodellen charakterisieren läßt. Für solche Phasen der Sternentwicklung lassen sich mathematische Gleichungen aufstellen, die den Sternaufbau unter gewissen Nebenbedingungen zu berechnen getatten. Für unsere Zwecke genügt aber eine Beschreibung des durch sie ausgedrückten physikalischen Sachverhalts.

Im stabilen Zustand erfüllt ein Stern einige Gleichgewichtsbedingungen. Hierzu gehört die Bedingung des mechanischen Gleichgewichts. Sie besagt, daß zu jeder Zeit und in jedem kleinen Raumbereich der dort herrschende Druck gleich dem Gewicht der darüberliegenden Sternmaterie sein muß. Ein Abweichen von dieser Bedingung würde bei einer Druckverkleinerung eine Kontraktion des Sterns bedeuten, während bei einer Druckerhöhung der Stern expandieren würde. Dadurch ändert sich in beiden Fällen der gesamte Aufbau des Sterns grundlegend.

Der im Sterninnern vorhandene Druck setzt sich aus zwei Komponenten, dem Gas- und dem Strahlungsdruck, zusammen. Letzterer entsteht bei der Absorption von Lichtquanten durch Atome bzw. auch Teilchen, weil die Photonen bei jeder Absorption auch einen kleinen Impuls übertragen, dessen Gesamtheit sich wie ein zusätzlicher Druck äußert. Gegenüber

dem Gasdruck ist der Anteil des Strahlungsdruckes recht klein und liefert nur im Innern sehr massereicher Sterne einen bedeutenden Beitrag zum Gesamtdruck.

Da die Sternmaterie im Sterninnern praktisch vollständig ionisiert ist, kann für die Berechnung des Gasdruckes die Zustandsgleichung des idealen Gases

$$P_G = \frac{R_0 T}{\mu}$$

herangezogen werden. Aus ihr ist zu entnehmen, daß der Gasdruck P_G außer von der „lokalen“ Temperatur T und der entsprechenden Dichte ρ von der chemischen Zusammensetzung der Sternmaterie abhängt, die in das mittlere Molekulargewicht μ eingeht. Die ideale Gasgleichung gilt unter den in den Sternen herrschenden physikalischen Bedingungen sogar noch bei Dichten von der Größenordnung 100 g/cm^3 , weil die Materie im Sterninnern praktisch vollständig ionisiert ist. Unter diesen Verhältnissen ist das von jedem Atomkern eingenommene Volumen sehr viel kleiner als das eines neutralen Atoms. Dieser Sachverhalt bedeutet, daß zwischenmolekulare Kräfte (van der Waals Kräfte) erst bei wesentlich höheren Dichten als 100 g/cm^3 eine Rolle spielen.

Eine weitere Stabilitätsbedingung besteht in der Forderung, daß die im Innern der Sterne freigesetzte Energie ständig gleich der in den Weltraum abgestrahlten Energie ist. Dadurch wird gewährleistet, daß sich im Stern keine Gebiete befinden, die sich fortlaufend aufheizen oder abkühlen. Sollte die thermische Gleichgewichtsbedingung erfüllt sein, dann ist auch gewährleistet, daß die Temperaturverteilung im Stern zeitlich konstant ist.

Die numerischen Rechnungen über den Sternaufbau ergeben einen außerordentlich starken Temperaturanstieg in der Nähe des Sternzentrums. Die dort herrschenden Temperaturen betragen in den meisten Fällen mehr als $1 \cdot 10^7 \text{ }^\circ\text{K}$. Unter diesen Bedingungen besitzt ein bestimmter Anteil der Atome schon so hohe Geschwindigkeiten und damit kinetische Energien, daß sie in der Lage sind, die abstoßenden elektrischen Felder anderer Atomkerne zu überwinden. Dadurch werden aber noch

nicht genügend Kernumwandlungen je Zeiteinheit ausgelöst. Eine ausreichende Anzahl ist erst dann vorhanden, wenn auch für Teilchen niedrigerer Geschwindigkeit eine gewisse Wahrscheinlichkeit besteht, die abstoßenden Felder zu überwinden und in den Kern einzudringen. Das ist tatsächlich für einen weiteren Bruchteil der Atome der Fall, wie wellenmechanische bzw. quantenphysikalische Überlegungen zeigen. Diesen quantenmechanischen Effekt bezeichnet man als *Tunneleffekt*. Er wurde von G. Gamow ausführlich beschrieben. Eine nähere Erörterung der bei diesen Vorgängen wichtigen Prozesse wird später erfolgen. Von Interesse soll zunächst nur die Feststellung sein, daß die Energiequellen stark in den zentrumsnahen Gebieten der Sterne konzentriert sind.

Für den Transport der in den inneren Gebieten der Sterne freigesetzten Energie an die Oberfläche kommen prinzipiell drei Mechanismen in Frage: der Strahlungstransport, die Konvektion und die Wärmeleitung. Wenn der Energietransport allein durch Strahlung erfolgt, dann befindet sich der Stern im Strahlungsgleichgewicht. Bei diesem Transportmechanismus „laufen“ die Energiequanten durch frei-freie und gebunden-freie Übergänge zwischen den Atomen hin und her. Dabei gibt es keine Vorzugsrichtung, in der die Emission erfolgt. Das im Stern vorhandene Temperaturgefälle bewirkt aber, daß effektiv mehr Energie in die kühleren außenliegenden Schichten des Sterns abgegeben wird. Greift man sich willkürlich ein kleines Raumgebiet im Stern heraus, so ist sofort einzusehen, daß aus den Gebieten, in denen die Temperatur höher ist, auch im Mittel die Energie der von dort kommenden Lichtquanten größer ist. Dagegen werden aus einem weiter außen gelegenen kühleren Gebiet im statistischen Mittel etwas energieärmere Lichtquanten in das betrachtete Raumgebiet eingestrahlt. Bei der Gegenüberstellung der beiden diskutierten Energieströme zeigt sich, daß der aus dem heißeren Gebiet kommende Strahlungsstrom überwiegt.

Die unmittelbar bei den Kernprozessen freiwerdende Energie entspricht einer extrem kurzwelligen „harten“ Strahlung, die auch als Gammastrahlung (Wellenlängen von Bruchteilen von Nanometern) bezeichnet wird. Im Verlauf der vielfältigen

Wechselwirkung mit den Atomkernen, aber auch mit den freien Elektronen wird die Gammastrahlung (γ -Strahlung) allmählich in eine „weichere“ Strahlung umgewandelt. An der Sternoberfläche erreicht das Energiespektrum schließlich den beobachtbaren Verlauf.

Die Menge der durch die Strahlung nach außen transportierten Energie hängt von der „Undurchsichtigkeit“ der Sternmaterie ab. Diese, auch als *Opazität* bezeichnete Eigenschaft der Materie, beruht auf der Absorption der Strahlung, insbesondere auf den frei-freien und gebunden-freien Übergängen. Wenn die Undurchsichtigkeit der Sternmaterie sehr klein ist, können die Lichtquanten im Sterninnern Strecken von der Größenordnung einiger Millimeter bis Zentimeter zurücklegen, und der Strahlungsstrom ist entsprechend groß. Falls dagegen in einem Gebiet die Opazität der Sternmaterie hoch ist, unterliegen die Photonen schon auf noch kürzeren Strecken verhältnismäßig vielen Absorptionsprozessen, und der sich einstellende Strahlungsstrom ist deshalb niedrig. In einem solchen Gebiet „staut“ sich in gewissem Sinne die von innen kommende Energie; das Temperaturgefälle nach außen wird entsprechend steil.

Wenn es möglich wäre, ein bestimmtes Photon zu markieren und seinen Weg durch den Stern zu verfolgen, so würde man feststellen, daß es auf dem geraden Wege nur etwa 10^3 s benötigt, um an die Sternoberfläche zu gelangen. Im Mittel braucht jedoch ein Photon wegen der vielen „Irrwege“ – die Emission kann in jede beliebige Richtung erfolgen – einige 10^7 Jahre, ehe es die Sternatmosphäre erreicht.

Die Opazität der Sternmaterie hängt außer von ihrer chemischen Zusammensetzung auch von der Temperatur und der Dichte ab. In den mittelpunktsnahen Gebieten der Sterne, wo die Atome vollständig ionisiert sind, entfällt natürlich der Energietransport durch gebundene bzw. gebunden-freie Übergänge. Dafür haben die Gammaquanten so hohe Energien, daß sie sogar die Atomkerne anregen können. Dieser Vorgang ist mit der Anregung der Elektronen in den Atomhüllen durch die energieärmeren Lichtquanten vergleichbar. Die Atomkerne besitzen nämlich gleichfalls verschiedene Anregungsstufen. Unter Emission von Gammaquanten kehren die angeregten

Atomkerne in ihren Grundzustand zurück. Ein merklicher Anteil der Gesamtenergie wird auch durch Streuung der Gammaquanten an freien Elektronen (Compton-Effekt, normale Streuung) transportiert.

Erst in den weiter außen gelegenen Gebieten der Sterne ist die Temperatur so weit abgesunken, daß die Atome zumindest noch einige ihrer Elektronen besitzen. Dadurch ist die Möglichkeit zu Absorptionsprozessen gegeben und der Wert der Opazität relativ groß. Der sich einstellende Strahlungsstrom ist dann unter Umständen so gering, daß er allein nicht mehr die im Innern freigesetzte Energie nach außen transportieren kann. In einem solchen Fall wird ein Teil der Strahlung durch heiße Materie, „wolken“, die infolge ihres geringeren spezifischen Gewichtes in den kühleren Gebieten aufsteigen, nach außen abgeführt. Die Materieballen vermischen sich mit der umgebenden Materie und sinken nach ihrer Abkühlung auf die Umgebungstemperatur wieder in tiefer gelegene Schichten ab, aus denen wieder andere aufsteigen. Diesen Transportmechanismus bezeichnet man als Konvektion. Unter Umständen tritt auch in den mittelpunktsnahen Gebieten der Sterne eine Konvektionszone auf. Das ist dann der Fall, wenn die Energiequellen sehr stark auf einem kleinen Raum konzentriert sind. Dann kann durch den Strahlungstransport allein die freigesetzte Energie nicht abgeführt werden, und es kommt zur Bildung einer Konvektionszone.

Im allgemeinen erstreckt sich eine Konvektionszone nicht über den ganzen Stern. In den von ihr erfaßten Gebieten tritt eine vollständige Durchmischung der Sternmaterie ein.

Die dritte Möglichkeit des Energietransports besteht in der molekularen Wärmeleitung. Allerdings hat dieser Mechanismus nur bei einigen Sterngruppen – zum Beispiel bei den weißen Zwergen – eine praktische Bedeutung. Die wesentlichen Energietransportmechanismen im Stern sind der Strahlungstransport und die Konvektion. Sie können auch gleichzeitig in verschiedenen Gebieten eines Sterns auftreten.

Die hier beschriebenen für den Sternaufbau physikalisch bedeutungsvollen Prozesse lassen sich in eine mathematisch exakte Form bringen. Die Lösung der Gleichungen wäre aber

ohne einige zusätzliche Nebenbedingungen noch nicht möglich. So muß gewährleistet sein, daß die Summe der in den einzelnen Raumteilen des Sterns enthaltenen Masse gleich seiner vorgegebenen Gesamtmasse ist. Außerdem soll die Summe der in den verschiedenen Raumteilen freigesetzten Energie an der Sternoberfläche identisch sein mit der Gesamt-leuchtkraft.

Eine eingehende theoretische Diskussion der den Sternaufbau beschreibenden mathematischen Gleichungen führten H. Vogt 1926 und H. N. Russell 1938 durch. Sie kamen dabei zu dem bemerkenswerten Ergebnis, daß der innere Aufbau eines stabilen Sterns eindeutig durch seine Masse und die chemische Zusammensetzung der Sternmaterie bestimmt ist. Dieser auch als Vogt-Russell-Theorem bezeichnete Eindeutigkeitssatz gilt unter stark vereinfachten mathematischen Voraussetzungen sowie den Annahmen, daß keine störenden Einflüsse durch die Rotation, durch Magnetfelder oder durch Wechselwirkung mit interstellarer Materie vorhanden sind. Inzwischen ergaben neuere Untersuchungen, daß bei Veränderungen der mathematischen Voraussetzungen der Eindeutigkeitssatz in einigen Fällen verletzt wird. Es existieren dann zwei oder sogar mehrere Möglichkeiten, wie ein Stern, der ein bestimmtes Entwicklungsstadium erreicht hat, in seinem Innern aufgebaut sein kann.

Die Auflösung der Grundgleichungen des inneren Aufbaus der Sterne erfolgt durch spezielle mathematische Verfahren mit Hilfe von Rechenautomaten. Das Resultat der Rechnungen sind Zahlentabellen, die über den Verlauf aller interessierenden physikalischen Kennwerte im Sterninnern Auskunft geben. Die Gesamtheit der Zahlenwerte wird als Sternmodell bezeichnet. In Tabelle 2 auf der folgenden Seite sind auszugsweise die Rechenergebnisse über den inneren Aufbau eines Sterns von 2,5 Sonnenmassen zusammengestellt. In ihr ist der Abstand vom Sternzentrum in Dezimalteilen des Sternradius angegeben. Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, befinden sich in einer Kugel mit einer Ausdehnung von der Größe des 0,7fachen Sternradius bereits 99,6% der Gesamtmasse des Sterns. Noch viel stärker sind die Energiequellen zum Sternzentrum hin

Tabelle 2: Zustandsgrößen eines chemisch homogenen Sterns von 2,5 Sonnenmassen (nach M. Schwarzschild)

r/R	M_r/M	L_r/L	T [°K]	ρ [g/cm ³]
0,00	0,000	0,000	$19,8 \cdot 10^6$	48,3
0,10	0,050	0,757	$17,8 \cdot 10^6$	41,0
0,16	0,177	1,000	$14,9 \cdot 10^6$	31,6
0,30	0,627	1,000	$8,9 \cdot 10^6$	9,2
0,40	0,843	1,000	$6,1 \cdot 10^6$	2,7
0,50	0,944	1,000	$4,2 \cdot 10^6$	0,7
0,60	0,984	1,000	$2,8 \cdot 10^6$	0,18
0,70	0,996	1,000	$1,8 \cdot 10^6$	$3,8 \cdot 10^{-2}$
0,80	1,000	1,000	$1,0 \cdot 10^6$	$5,3 \cdot 10^{-3}$
0,90	1,000	1,000	$4,6 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^{-4}$
0,98	1,000	1,000	$8,4 \cdot 10^4$	$6,1 \cdot 10^{-7}$

konzentriert. Schon in einem Abstand vom 0,16fachen des Sternradius hat die Leuchtkraft den Wert, der an der Oberfläche festzustellen ist. Der Verlauf von Temperatur und Dichte ist ebenfalls in Tabelle 2 aufgeführt. Beide Größen fallen vom Zentrum zur Oberfläche rasch ab. Die Leuchtkraft und der Radius dieses Sternmodells betragen das 21,2- bzw. 1,59fache der Sonnenwerte.

Energiefreisetzung in den Sternen

Bei den hohen Temperatur- und Dichtewerten in den zentrumsnahen Gebieten der Sterne sind eine große Anzahl verschiedenartiger Kernprozesse möglich. Dazu gehören auch aufbauende Reaktionen, bei denen Energie freigesetzt wird. Sie haben für die Energiefreisetzung der Sterne eine große Bedeutung.

Die bei den Kernprozessen freigesetzte Energie rührt von der Umwandlung einer Stoffmenge in Strahlung her. Beim Vergleich der Ruhemassen der Elementarteilchen, die vor der Reaktion vorhanden sind, mit der Ruhemasse des Endproduktes fällt auf, daß eine Massendifferenz besteht. Sie ist der Energie der Strahlung äquivalent, die beim Aufbau des

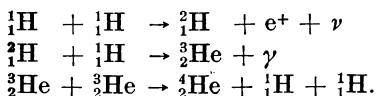
schwereren Atomkerns aus leichteren durch die dabei freiwerdende Bindungsenergie auftritt. Zwischen dem sogenannten Massen„defekt“ Δm und der bei dem Kernprozeß freigesetzten Energie E besteht die von A. Einstein abgeleitete Beziehung

$$E = \Delta m \cdot c^2,$$

in der mit c die Lichtgeschwindigkeit bezeichnet ist.

Im Sterninneren sind die wichtigsten energie„liefernden“ Prozesse die, bei denen Helium aus Wasserstoff aufgebaut wird. Diese Reaktionen sind deshalb so bedeutungsvoll, weil der Wasserstoff das am häufigsten vorkommende Element ist. Außerdem ist der auftretende Massendefekt relativ hoch und daher auch die „Energieausbeute“ – auf jeden aufgebauten Heliumkern bezogen – recht groß.

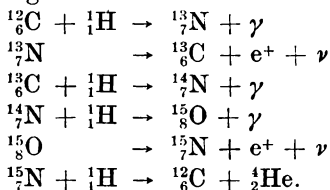
Die direkte Vereinigung zweier Wasserstoffkerne und die daran anschließende Aufnahme von zwei weiteren Protonen wird als Proton-Proton-Reaktion bezeichnet. Sie geht in drei Schritten vor sich. Zunächst bildet sich beim Stoß von Protonen ein Wasserstoffkern mit der Masse 2, ein Deuteron ${}^2_1\text{H}$, wobei ein Positron und ein Neutrino freigesetzt werden. Während sich das Positron unmittelbar danach mit einem Elektron vereinigt und unter Ausstrahlung von Energie verschwindet, verläßt das Neutrino ungehindert den Stern. Im nächsten Schritt des Aufbauprozesses bildet sich beim Stoß eines Deuterons mit einem weiteren Proton ein Heliumkern der Masse 3, also ${}^3_2\text{He}$. Dabei wird ein Gammaquant emittiert. Beim dritten Prozeß vereinigen sich zwei ${}^3_2\text{He}$ -Kerne und bilden einen Helium-4-Kern ${}^4_2\text{He}$ sowie zwei Protonen. Um diesen Prozeß zu ermöglichen, müssen vorher die vorangehenden Aufbaureaktionen jeweils doppelt abgelaufen sein, eine Forderung, die bei der enormen Anzahl von Kernreaktionen im Sterninneren erfüllt ist. Mit den eingeführten Symbolen lassen sich die einzelnen Prozesse wie folgt hintereinander schreiben:



Dabei stehen auf der linken Seite der Reaktionsgleichungen die Ausgangsteilchen und auf der rechten Seite die Endprodukte. Wenn man berücksichtigt, daß ein Teil der freiwerdenden Energie vom Neutrino abgeführt wird, gewinnt der Stern durch die Bildung *eines* Heliumatoms aus vier Protonen eine Energie von $4,3 \cdot 10^{-12}$ Ws.

Die Proton-Proton-Reaktion läuft in nennenswerter Anzahl bereits bei Temperaturen von etwa $4 \cdot 10^6$ °K ab.

Beim Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus entsteht ebenfalls Helium aus Wasserstoff, jedoch übernehmen bei seiner Bildung der Kohlenstoff und der Stickstoff die Rolle von Katalysatoren. Im einzelnen finden folgende Reaktionen statt: Durch den Stoß eines Protons mit einem Kohlenstoffkern $^{12}_6\text{C}$ entsteht unter gleichzeitiger Ausstrahlung eines Gammaquants ein Stickstoffkern $^{13}_7\text{N}$. Dieser ist aber nicht stabil, sondern geht unter Emission eines Positrons und eines Neutrinos in das schwere Kohlenstoffisotop $^{13}_6\text{C}$ über. Das Positron vereinigt sich anschließend mit einem Elektron und verschwindet unter Emission eines Gammaquants. Dagegen verläßt das Neutrino den Stern ohne Wechselwirkung mit der Materie. Beim Stoß mit einem Proton verwandelt sich der $^{13}_6\text{C}$ -Kern in einen gewöhnlichen Stickstoffkern $^{14}_7\text{N}$, wobei ein Gammaquant ausgestrahlt wird. Der Stickstoffkern wird durch einen Stoß mit einem weiteren Proton zu einem instabilen Sauerstoffisotop $^{15}_8\text{O}$ umgewandelt, wobei wieder Energie in Form eines Gammaquants abgegeben wird. Nach kurzer Zeit zerfällt jedoch das Sauerstoffisotop in einen schweren Stickstoffkern $^{14}_7\text{N}$, ein Positron und ein Neutrino. In der letzten Reaktion des Zyklus stößt der $^{15}_7\text{N}$ -Kern mit einem Proton zusammen und zerfällt dabei in einen Kohlenstoffkern $^{12}_6\text{C}$ sowie in einen Heliumkern ^4_2He . Nachstehend sind die sechs Reaktionen des Zyklus zusammengestellt:



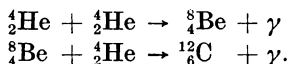
Die beim Aufbau eines Heliumkerns aus vier Protonen nach dem Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus freigesetzte Energie beträgt $4,0 \cdot 10^{-12}$ Ws. Dieser Betrag ist etwas kleiner als der bei der Proton-Proton-Reaktion entstehende. Das kommt daher, daß die beiden beim Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus entstehenden Neutrinos etwas mehr Energie entführen als die beiden bei der Proton-Proton-Reaktion gebildeten Neutrinos.

Die Zahl der in der Zeiteinheit ablaufenden Prozesse hängt in hohem Maße von der Temperatur und der Dichte der Sternmaterie ab. Bei der Proton-Proton-Reaktion wächst die Häufigkeit der Prozesse mit dem Quadrat der Dichte und der 4. bis 6. Potenz der Temperatur. Beim Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus ist die Temperaturabhängigkeit noch viel stärker. Die Temperatur geht dort mit der 16. bis 20. Potenz ein. Bei dieser extrem großen Temperaturabhängigkeit des Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus sind die Energiequellen sehr stark zum Sternzentrum hin konzentriert. Die Folge davon ist, daß die freigesetzte Energie nicht mehr allein durch Strahlungstransport abgeführt werden kann. Deshalb bildet sich in den zentrumsnahen Gebieten des Sterns eine Konvektionszone. Sie bewirkt in den von ihr erfaßten Gebieten eine Durchmischung der Sternmaterie.

In den Hauptreihensternen laufen unter Umständen beide Arten des Wasserstoff„brennens“ parallel ab. Allerdings ist die Proton-Proton-Reaktion bei Temperaturen unter $1,5 \cdot 10^7$ °K ergiebiger als der Kohlenstoff-Zyklus-Stickstoff, der erst bei noch höheren Temperaturen effektiver wird.

Die Riesensterne gewinnen einen erheblichen Anteil ihrer ausgestrahlten Energie aus dem – nach seinem Entdecker benannten – Salpeter-Prozeß. Dieser Energiefreisetzungsmechanismus wird erst bei Temperaturen über $8 \cdot 10^7$ °K wirksam. Dabei laufen im einzelnen folgende Reaktionen ab: Durch den Zusammenstoß von zwei Heliumkernen bildet sich unter Energieausstrahlung ein instabiler Berylliumkern ${}^8\text{Be}$. Obwohl diese Reaktion unter Emission von Energie verläuft, muß für sie insgesamt mehr Energie aufgewendet werden. Der instabile Kern zerfällt wieder sehr rasch. Trotzdem bleiben immer noch genügend viele Berylliumkerne vorhanden, die mit weiteren

Heliumkernen reagieren können und dabei Kohlenstoff $^{12}_6\text{C}$ bilden. Beim Aufbau eines Kohlenstoffkerns durch die Heliumreaktion wird eine Energie von $1,71 \cdot 10^{-12}$ Ws frei:



Die Effektivität des Salpeter-Prozesses steigt bei Temperaturen um $1,4 \cdot 10^8$ °K mit der 30. Potenz der Temperatur an.

In Abbildung 8 ist die Energiefreisetzungsrate für die drei Reaktionsketten in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Dort ist zu erkennen, daß in der Sonne sowohl die Proton-Proton-Reaktion als auch der Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus abläuft. Allerdings ist der zuerst genannte Energiefreisetzungsmechanismus bei der Sonne und allen kühleren Hauptreihensternen ergiebiger als der Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus. In noch heißeren Hauptreihensternen als der Sonne überwiegt in zunehmendem Maße die Energiefreisetzung nach dem Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus. Der Salpeter-Prozeß tritt jedoch nur in den Riesensternen auf.

Die drei ausführlich dargestellten Energiefreisetzungsprozesse tragen den Hauptteil der Energiefreisetzung in den Sternen. Daneben laufen aber auch noch andere Reaktionsketten, die ebenfalls zur Umwandlung von Wasserstoff in Helium führen, in den Sternen ab. Sie liefern jedoch nur in den sonnenähnlichen Sternen einen geringen, einige Prozent umfassenden Anteil an der gesamten Energiefreisetzung.

Der fortwährende Aufbau von Helium aus Wasserstoff nach den beschriebenen Kernprozessen führt in den zentralen Bereichen der Sterne zu einem ständigen Absinken ihres ursprünglichen Wasserstoffgehalts. Daran ändert, auf die Dauer gesehen, auch die Existenz einer eventuell vorhandenen Konvektionszone nichts, die in den davon betroffenen Gebieten für eine Durchmischung der Sternmaterie sorgt. So entsteht im Laufe der Zeit in den Bereichen, in denen die Energie freigesetzt wird und die von der Konvektion erfaßt werden, eine neue chemische Zusammensetzung der Sternmaterie, die sich von der anfangs vorhandenen immer mehr unterscheidet. Nach dem Theorem von Vogt und Russell hängt der innere Aufbau

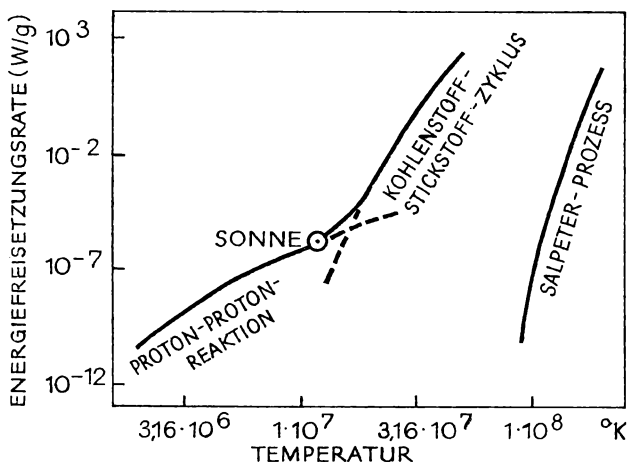


Abb.8. Energiefreisetzungsrates in Abhängigkeit von der Temperatur in den zentralen Gebieten der Sterne für die wichtigsten Kernreaktionen. Im Innern der Sonne ist die Proton-Proton-Reaktion noch effektiver als der Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus, der erst bei noch heißeren Sternen den Hauptteil der Energiefreisetzung übernimmt. Der Salpeter-Prozeß läuft nur in den Riesensternen ab.

eines Sterns von seiner Masse und der chemischen Zusammensetzung der Sternmaterie ab. Daraus folgt aber, daß sich bei einer Änderung der Masse, der chemischen Zusammensetzung bzw. beider Größen der innere Aufbau eines Sterns ändern muß. Da die Energiefreisetzung durch Kernprozesse zu Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Materie in den zentralen Gebieten führt, treten zwangsläufig Änderungen des inneren Aufbaus der Sterne und ihrer Zustandsgrößen ein. Natürlich ist das ein sich allmählich vollziehender Prozeß, der zunächst nicht durch Beobachtungen nachweisbar wäre. Erst im Laufe von Jahrtausenden summieren sich die kleinen Veränderungen, so daß sie sicher beobachtet werden könnten. Solange der Stern auf der Hauptreihe verweilt, deckt er seinen Energiebedarf fast ausschließlich durch die Umwandlung von Wasserstoff in Helium. Das bedeutet aber, daß ihm nur ein begrenzter Energievorrat zur Verfügung steht, der innerhalb

einer bestimmten Zeitspanne verbraucht ist. Unabhängig von der Tatsache, daß schon lange, bevor der Wasserstoff restlos in Helium „verbrannt“ ist, in dem Stern tiefgreifende Änderungen seines inneren Aufbaues vor sich gehen, kann man die maximale Verweildauer der Sterne auf der Hauptreihe zu Vergleichszwecken abschätzen. Da in jedem Gramm Sternmaterie, die chemisch homogen sein soll, der gleiche Energieinhalt ist, dürfte der maximale Zeitraum Δt_H (gemessen in Jahren), den der Stern auf der Hauptreihe zubringt, um so größer sein, je größer seine Masse ist. Andererseits wird die Verweilzeit Δt_H um so kleiner, je größer die Leuchtkraft des Sterns ist. Insgesamt läßt sich dieser Sachverhalt durch die Beziehung

$$\Delta t_H = c_1 \frac{\mathfrak{M}}{L}$$

ausdrücken, in der $\mathfrak{M}$ die Sternmasse und L die Leuchtkraft sind. Mit Hilfe der Masse-Leuchtkraft-Beziehung $L = c_2 \mathfrak{M}^3$ kann man die Leuchtkraft in der vorangehenden Beziehung durch die Masse ersetzen und erhält dadurch die Gleichung

$$\Delta t_H = c_3 \frac{1}{\mathfrak{M}^2}.$$

Sie bringt das zunächst etwas überraschende Ergebnis zum Ausdruck, daß sich die massereicheren Sterne kürzere Zeit im Hauptreihenstadium aufhalten als die masseärmeren. Unter bestimmten Voraussetzungen über die physikalischen Vorgänge in den Sternmodellen hat die Konstante c_3 einen Zahlenwert von $c_3 = 1,1 \cdot 10^{10}$. Einen Einblick in die auf diese Weise abgeschätzten ungefähren Verweilzeiten der Sterne auf der Hauptreihe im Hertzsprung-Russell-Diagramm vermittelt **Tabelle 3**. Aus ihr ist zu entnehmen, daß die gegenwärtig beobachtbaren O-Sterne vor höchstens einigen Millionen Jahren entstanden sein können. Andernfalls hätten sie sich bereits wieder von dem Hauptreihenstadium weg entwickeln müssen. Die Bestimmung des Alters der Erdkruste ergab einen Wert von ungefähr $4 \cdot 10^9$ Jahren, der für das Erdalter als ein unterer

Wert anzusehen ist. Vergleicht man beide Altersangaben, so ist daraus zu entnehmen, daß die Erde etwa tausendmal älter ist als die O-Sterne. Die O-Sterne müssen also relativ junge Objekte im Weltall sein, anders wäre ihre Existenz zur gegenwärtigen Zeit nicht zu verstehen.

Bereits diese verhältnismäßig einfachen Überlegungen berechtigen zu der Schlußfolgerung, daß sich Sterne noch vor – kosmisch gesehen – gar nicht ferner Zeit bildeten. Es darf darüber hinaus angenommen werden, daß auch in der Gegenwart Sterne entstehen können. Diese Behauptung ist keinesfalls eine mechanische Übertragung der Erkenntnis von der fortwährenden Sternbildung in der Vergangenheit auf die Zukunft, sondern findet in bestimmten Beobachtungen eine wesentliche Stütze.

Tabelle 3: Verweilzeiten von Sternen verschiedener Masse auf der Hauptreihe

Masse (in Einheiten der Sonnenmasse)	Spektraltyp	Verweildauer auf der Hauptreihe (in Jahren)
40	O5	$7,0 \cdot 10^6$
7	B5	$2,2 \cdot 10^8$
2,2	A5	$2,3 \cdot 10^9$
1,4	F5	$5,6 \cdot 10^9$
1	G2	$1,1 \cdot 10^{10}$
0,5	M0	$4,4 \cdot 10^{10}$

Aus den vorangegangenen Überlegungen wird ersichtlich, daß die Sterne eine Entwicklung durchlaufen müssen und daß eine der Ursachen dafür die Änderung ihrer chemischen Zusammensetzung ist. Aber auch bei einem eventuellen Massenverlust ändert sich nach dem Vogt-Russell-Theorem der innere Aufbau eines Sterns. Hierbei spielt jedoch der kontinuierliche Massenverlust der Sterne infolge ihrer Energieausstrahlung nur eine untergeordnete Rolle, weil er auch über längere Zeiträume nur einen winzigen Bruchteil der Gesamtmasse ausmacht. Von Bedeutung für die künftige Entwicklung der Sterne sind dagegen solche Vorgänge, bei denen die Sterne

innerhalb kurzer Zeit einen beträchtlichen Teil ihrer Masse verlieren. So kann bei sehr engen Doppelsternsystemen ein relativ starker Massenaustausch im Laufe der Entwicklung einsetzen; aber auch bei Supernovaexplosionen wird ein Teil der Sternmasse in den interstellaren Raum geschleudert.

Die durchgeführten theoretischen Untersuchungen über den inneren Aufbau der Sterne stimmen darin überein, daß es in den stabilen Hauptreihensternen keine vollständige Durchmischung der Materie gibt. Lediglich die zentralen Partien der heißen Sterne bzw. die oberflächennahen Schichten der kühleren Sterne werden von kleineren Konvektionszonen erfaßt. Ziemlich sicher scheint auch zu sein, daß eine eventuell von der Oberfläche recht tief in den Stern reichende Konvektionszone nicht bis in die Gebiete vorstößt, in denen sich die chemische Zusammensetzung der Sternmaterie durch die dort ablaufenden Kernprozesse merklich verändert hat. Falls diese Resultate zutreffen, würde sich die chemische Zusammensetzung der Sternmaterie an der Sternoberfläche noch in ihrem ursprünglichen Zustand zur Zeit der Bildung des Sternes befinden. Dabei wurden stillschweigend noch weitere, durch Abschätzungen begründete Annahmen gemacht, nämlich, daß auch von außen, d. h. aus dem interstellaren Raum keine Materie in nennenswerten Mengen vom Stern „aufgesammelt“ wurde. Sind alle die genannten Voraussetzungen erfüllt, dann kann die aus den spektroskopischen Beobachtungen ableitbare chemische Zusammensetzung der Sternmaterie noch als repräsentativ für den „Baustoff“ angesehen werden, aus dem die Sterne entstanden.

Die bisher an der Sonne, einer kleineren Anzahl von Sternen und leuchtenden Gasnebeln vorgenommenen quantitativen Spektralanalysen führten zu dem sehr wesentlichen Ergebnis, daß die kosmische Häufigkeitsverteilung der Elemente qualitativ recht gut übereinstimmt. Das am häufigsten vorhandene Element ist der Wasserstoff, das zweithäufigste das Helium. Alle schweren Elemente haben gegenüber diesen beiden Elementen eine so geringe Häufigkeit, daß sie bei vielen Untersuchungen zu einer Gruppe zusammengefaßt werden.

Die kosmische Häufigkeitsverteilung der Elemente wurde auch

mit der chemischen Zusammensetzung der Erdrinde und der einiger Meteoriten verglichen. Dabei zeigte sich ebenfalls eine gute Übereinstimmung in der relativen Häufigkeitsverteilung der schwereren Elemente; dagegen traten allerdings große Abweichungen im Gehalt an Wasserstoff und Helium auf. Werden die vorliegenden Ergebnisse der quantitativen Spektralanalysen der Sonne, der Sterne frühen Spektraltyps und leuchtender Nebel zusammengefaßt, so besteht die kosmische Materie im Mittel etwa zu 63 (Massen-)% aus Wasserstoff, zu 36 (Massen-)% aus Helium und zu insgesamt 1 (Massen-)% aus schwereren Elementen. Weiterhin kommt man zu der Schlußfolgerung, daß sich die Himmelskörper offensichtlich aus einem Material bildeten, dessen chemische Zusammensetzung praktisch einheitlich war. Die an verschiedenen Objekten gefundenen Abweichungen von der mittleren kosmischen Häufigkeitsverteilung der Elemente lassen sich größtenteils durch Entwicklungseffekte erklären. Darauf wird jedoch erst später eingegangen.

Interstellare Materie

Es ist schon längere Zeit bekannt, daß der Raum zwischen den Sternen nicht absolut leer ist, sondern mit gas- und staubförmiger Materie erfüllt ist. Allerdings ist die Dichte des interstellaren Mediums extrem niedrig. Wie die Auswertung entsprechender Beobachtungen ergab, besitzt das interstellare Gas eine mittlere Dichte von etwa $1,2 \cdot 10^{-24} \text{ g/cm}^3$. Die mittlere Dichte der staubförmigen Komponente der interstellaren Materie ist noch hundertmal geringer; sie beträgt nur ungefähr $1,3 \cdot 10^{-26} \text{ g/cm}^3$. Diese Zahlenangaben sagen aus, daß sich in einem Kubikzentimeter durchschnittlich nur jeweils ein Gasatom aufhält; in einem Würfel von ungefähr 100 m Kantenlänge würde man nur zwei mikroskopisch kleine Staubteilchen vorfinden. Solche geringen Dichtewerte lassen sich mit den zur Zeit zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten im Laboratorium nicht verwirklichen.

Verglichen mit der in den Sternen vereinigten Materie ist der Anteil der interstellaren Materie an der Gesamtmasse der

Galaxis nicht groß. Im Milchstraßensystem, dem auch unsere Sonne angehört, liegt der Anteil in der Größenordnung von etwa 2%. Trotzdem ist das interstellare Medium ein Bestandteil unserer Galaxis, dessen Erforschung in vielerlei Hinsicht bedeutungsvoll ist. Besonders wichtig und interessant ist in diesem Zusammenhang die Untersuchung der Wechselwirkung zwischen der interstellaren Materie und den Sternen. Nach den bestehenden Vorstellungen können sich unter geeigneten physikalischen Bedingungen auch gegenwärtig noch neue Sterne aus dem interstellaren Medium bilden. Andererseits liegen Anzeichen dafür vor, daß die Sterne fortlaufend Gas in den sie umgebenden Raum abgeben. Von bestimmten Sternen wird vermutet, daß sie sogar Staubteilchen in den interstellaren Raum „blasen“.

Neben den eben erwähnten Vorgängen ist das Studium der interstellaren Materie auch für die Erforschung des räumlichen Aufbaus unseres Sternsystems von ausschlaggebender Bedeutung. Es wurde bereits in einem anderen Zusammenhang erwähnt, daß ohne die sorgfältige Berücksichtigung der lichtabsorbierenden Wirkung des interstellaren Staubes die auf photometrischem Wege abgeleiteten Entfernungen stark von den tatsächlichen abweichen. Damit würde aber auch unsere Vorstellung über die räumliche Ausdehnung des Sternsystems nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmen.

Die Erscheinungsformen der interstellaren Materie sind sehr vielfältig. Dichtere staubförmige Materieansammlungen, die sich zwischen uns und einer weiter entfernten Sternwolke befinden, verraten sich zum Teil durch scheinbare Stern „leeren“. Dagegen kann in der Nähe von heißen Sternen die interstellare Materie auch als leuchtende Erscheinung beobachtet werden. Das Spektrum eines Gasnebels zeigt neben einem Kontinuum eine Anzahl von Emissionslinien. Es handelt sich hierbei um ein Anregungsleuchten. Die vom Nebel emittierte Energie wird der Strahlung benachbarter Sterne entnommen.

Das interstellare Gas wird durch mehrere Mechanismen zum Leuchten angeregt. Für den Wasserstoff und das Helium ist das Rekombinationsleuchten wichtig, bei dem nach der Ionisation dieser Elemente durch die ultraviolette Sternstrahlung

eine Wiedervereinigung der Ionen mit freien Elektronen stattfindet und Energie in Form von Strahlung abgegeben wird. Die Rekombination erfolgt häufig auf das zweite oder dritte Energieniveau. Bei dem anschließenden Übergang in den Grundzustand kommt es zur Emission einiger Spektrallinien. Auch durch Stöße bestimmter Ionen mit Elektronen können tiefergelegene Energieniveaus angeregt werden. Die Enträtselung dieser Linien war recht schwierig, da unter Laboratoriumsbedingungen ihr Auftreten sehr unwahrscheinlich ist („verbotene“ Linien). Unter den extrem niedrigen Dichten im Weltraum erlangen jedoch diese Übergänge eine große Bedeutung.

Ein weiterer Leuchtmechanismus beruht auf der Tatsache, daß Spektrallinien verschiedener chemischer Elemente zufällig die gleiche Wellenlänge haben. Dadurch wird zum Beispiel ein bestimmter Zustand des zweifach ionisierten Sauerstoffs durch eine intensive Linie des einfach ionisierten Heliums angeregt, und es kommt zu einer starken Ausstrahlung im sichtbaren Spektralbereich. Falls auch Staub in der Wolke enthalten ist, wird das Sternenlicht an ihm reflektiert. Dabei entsteht ein kontinuierliches Spektrum.

Durch den Einsatz der Photographie gelang die Entdeckung einer großen Anzahl schwächer leuchtender interstellarer Wolken. Aber auch nichtleuchtende Staubwolken, die sich vor einem hellen Hintergrund befinden, ließen sich nachweisen. Der auftretende Formenreichtum ist bemerkenswert. Neben diesen auffälligen Objekten, deren Dichte bedeutend größer ist als die durchschnittliche Dichte des interstellaren Mediums, kommen weniger dichte, aber offensichtlich weit ausgedehntere Komplexe von staub- und gasförmiger Materie zwischen den Sternen vor.

Der Nachweis der nicht leuchtenden gasförmigen Komponente gelang J. Hartmann am Anfang unseres Jahrhunderts bei spektroskopischen Untersuchungen an engen Doppelsternsystemen. Bei der Durchführung von Radialgeschwindigkeitsmessungen fiel ihm auf, daß einige wenige Absorptionslinien weder an der periodischen Dopplerverschiebung der anderen Linien, die durch die Bahnbewegung verursacht wird, noch an

der durch die Schwerpunktsgeschwindigkeit bewirkten Linienverschiebung teilnahmen. Der Sachverhalt ließ sich nur durch die Annahme verstehen, daß diese Linien nicht in der Sternatmosphäre entstehen, sondern im interstellaren Raum. Die Tatsache, daß Absorptionslinien beobachtet wurden, deutete darauf hin, daß es sich bei dem absorbierenden Medium um ein Gas handeln mußte.

Ebenfalls um die Jahrhundertwende wurden von M. Wolf die ersten grundlegenden Untersuchungen über die räumliche Anordnung des kontinuierlich verteilten Staubes durchgeführt. Bei sorgfältigen Sternzählungen in ausgewählten Himmelsgebieten stellte er fest, daß in manchen Fällen die Zuwachsrates der Sternzahlen beim Übergang zu schwächeren Helligkeiten unter der erwarteten lag. Daraus konnte nach einer genauen Diskussion des Beobachtungsmaterials auf die Anwesenheit feinverteilter staubförmiger Materie geschlossen werden, die das Licht der entfernteren Sterne schwächt.

Auch mit spektroskopischen und lichtelektrischen Methoden läßt sich der interstellare Staub durch seinen Einfluß auf die Energieverteilung in den Sternspektren nachweisen. Für derartige Untersuchungen eignen sich die heißen O- und B-Sterne besonders gut. Beim Vergleich der Spektren der entfernteren Sterne mit den nächstehenden Sternen gleichen Spektraltyps ergab sich, daß die weiter entfernten scheinbar eine andere Energieverteilung im Sternspektrum besitzen. Die Abweichungen vom „normalen“ Verlauf der Energieverteilung in den Spektren nehmen beim Übergang zu kürzeren Wellenlängen immer mehr zu. Daraus ergibt sich, daß die betreffenden Sterne rötter erscheinen, als es nach ihrem Spektraltyp zu erwarten ist. Der Betrag dieser Verfärbung vergrößert sich im allgemeinen mit wachsender Entfernung. Es gilt als erwiesen, daß die durch Beobachtungen an frühen Sternen recht genau untersuchte selektive Absorption durch Staubteilchen verursacht wird, deren Durchmesser in der Größenordnung von 10^{-6} bis 10^{-5} cm liegen.

Neben den Beobachtungen im optischen Spektralbereich besteht auch die Möglichkeit, die interstellare Materie radioastronomisch zu untersuchen. Außer Messungen des Radiokonti-

nuums, das zum Teil von frei-freien Übergängen in ionisierten interstellaren Gaswolken und von einer nichtthermischen Komponente herrührt, sind Untersuchungen an den Emissionslinien besonders nützlich. Fast das gesamte Wissen über die großräumige Verteilung des neutralen Wasserstoffs verdanken wir Beobachtungen an der 21-cm-Linie, die H. C. van de Hulst und unabhängig davon J. S. Schklowskij theoretisch vorausgesagt hatten. Bis zur Gegenwart wurden eine Anzahl weiterer Emissionslinien des ionisierten Wasserstoffs, aber auch des ionisierten Heliums und Kohlenstoffs gefunden.

Der 1963 gelungene radioastronomische Nachweis des von I. S. Schklowskij theoretisch vorausgesagten Hydroxylmoleküls steht am Anfang einer ganzen Serie von Entdeckungen anderer Moleküle im interstellaren Raum. Das erste organische Molekül, Formaldehyd, wurde 1969 gefunden. Später gelang es unter anderen organischen Verbindungen auch Formamid nachzuweisen, das sich bekanntlich aus vier verschiedenen chemischen Elementen aufbaut. Es ist zu erwarten, daß in der vor uns liegenden Zeit noch mehr und noch komplizierter aufgebaute Moleküle entdeckt werden.

Die interstellaren Moleküle konzentrieren sich vorwiegend in sehr dichten Ansammlungen, deren Größe ungefähr den Dimensionen unseres Sonnensystems entspricht. Dabei gibt es sowohl Wolken, in denen nur eine Molekülart auftritt, wie auch solche Objekte, in denen mehrere chemische Verbindungen vorkommen. Die Molekülansammlungen befinden sich in ausgedehnten Wolkenkomplexen der interstellaren Materie. Beispielsweise wurden in dem bekannten Orionnebel mehrere dichte Wolken solcher Moleküle wie z. B. Wasser, Hydroxyl, Kohlenstoffsulfid, Formaldehyd und Methylalkohol lokalisiert. Die Intensität und andere Eigenarten der von den Molekülwolken ausgehenden Radiostrahlung scheinen dafür zu sprechen, daß die von ihnen emittierte Strahlung nach dem Prinzip des Maser- bzw. Lasermechanismus erzeugt wird.

Nach den vorliegenden Kenntnissen läßt sich gegenwärtig noch keine klare Entscheidung darüber fällen, ob die interstellare Materie nur in Wolken unterschiedlicher Ausdehnung und Dichte vorkommt oder ob sich in einem relativ gleich-

mäßig verteilten Medium „Verdichtungen“ befinden. Die lokale Dichte kann in manchen Gebieten durchaus das 5- bis 10fache des mittleren Wertes betragen. Auffällig ist die Tatsache, daß der interstellare Staub fast immer in Verbindung mit dem interstellaren Gas auftritt.

Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des interstellaren Gases ist mit größeren Schwierigkeiten verbunden als die Spektralanalyse der Sternatmosphären. Die bisher erzielten Ergebnisse bestätigen aber, daß zwischen der Elementenhäufigkeit des interstellaren Gases und der in den Sternatmosphären enthaltenen Materie kein grundsätzlicher Unterschied besteht.

Die chemische Zusammensetzung des interstellaren Staubes läßt sich auf spektroskopischem Wege nicht feststellen. Sein Vorhandensein äußert sich in einer kontinuierlichen Absorption des Sternenlichts, ruft aber keine typischen Absorptionslinien wie die Atome hervor. Wie entsprechende Untersuchungen an frühen O- und B-Sternen zeigen, steigt der Betrag der kontinuierlichen Absorption beim Übergang zu kürzeren Wellenlängen an. In verschiedenen Gebieten des Himmels ist jedoch die Wellenlängenabhängigkeit unterschiedlich.

Die Verfärbung des Sternenlichts wird durch die optischen Eigenschaften der Partikeln verursacht und geht letztlich auf ihre chemische Zusammensetzung und Größe zurück. Es ist deshalb nicht möglich, aus den Beobachtungen eindeutig auf die Natur der Teilchen zu schließen. Man beschreitet darum einen anderen Weg: Man berechnet theoretisch für angenommene Teilchenmodelle die zu erwartende Verfärbung des Sternenlichts und vergleicht sie mit den Beobachtungen. Auf diese Weise lassen sich schon einige Teilchensorten aussondern. Aus den verbleibenden Teilchenmodellen ist es auf Grund rein optischer Untersuchungen ausgeschlossen, auf den in der Natur tatsächlich vorkommenden Partikeltyp zu schließen. Ganz abgesehen davon ist es kaum angebracht, von einem Teilchentyp zu sprechen. Es ist eher damit zu rechnen, daß je nach der Art ihrer Entstehung verschiedene Staub „sorten“ existieren.

Die Vorstellungen über die Bildung der Staubteilchen lassen

sich in drei Gruppen einteilen. In der von D. ter Haar, J. H. Oort und H. C. van de Hulst vor etwa 20 Jahren ausgearbeiteten Hypothese entstehen die Partikeln im interstellaren Raum. Ihre chemische Beschaffenheit müßte deshalb etwa die kosmische Elementenhäufigkeit widerspiegeln, d. h., die Teilchen sollten vor allem aus Wasserstoffverbindungen wie Wasser, Ammoniak und Methan bestehen. Auf F. Hoyle und N. C. Wickramasinghe gehen die Überlegungen zurück, nach denen die Staubteilchen in den kühleren Außenschichten der Atmosphäre von Riesensternen kondensieren. Solche Teilchen müßten thermisch sehr widerstandsfähig sein, damit sie sich überhaupt bilden können. Als Material für die auf „heißem“ Wege entstandenen Teilchen kommen vor allem Graphit, Siliziumkarbid, Quarz und einige Silikate in Frage. Wenn diese Teilchen eine bestimmte Größe erreicht haben, „bläst“ sie der Druck der von den Sternen ausgehenden Strahlung gegen die Wirkung der Gravitationskraft in den zirkumstellaren Raum. Auf eine dritte Möglichkeit machte J. Dorschner aufmerksam. Nach seinen Abschätzungen bildet sich der Staub im zirkumstellaren Raum. Während der Frühphase der Sternentstehung sind die jungen Protosterne noch von einer dichten Gashölle umgeben, in der bei ihrer Abkühlung nacheinander eine ganze Anzahl von Molekülen zu kleinen Teilchen kondensieren. Sie können weiter zu großen Brocken anwachsen, aus denen sich zum Teil Körper von planetaren Ausmaßen bilden. Ein anderer Teil der Brocken wird später durch gegenseitige Zusammenstöße wieder zertrümmert. Dabei entstehen auch kleinere Bruchstücke, die durch den vom Stern ausgehenden Strahlungs- und Korpuskeldruck in den interstellaren Raum getrieben werden. Die Teilchen würden vorwiegend aus Silikatgesteinen bestehen, wie sie auf der Erdoberfläche und in Steinmeteoriten vorkommen. Leider erlauben die von der Erde aus möglichen Untersuchungen der optischen Eigenschaften der Teilchen keine eindeutige Entscheidung, welche der möglichen Teilchenmodelle vorkommen, wenn auch bestimmte beobachtete Eigenheiten mehr für die Silikatteilchen sprechen.

Die bisher durchgeführten Betrachtungen über die Eigenschaften der Sterne beschränkten sich auf Objekte, deren Zustandsgrößen über lange Zeiträume hinweg unveränderlich sind. Ein nicht unerheblicher Anteil an der Gesamtzahl der Sterne ändert jedoch seine Zustandsgrößen innerhalb von Monaten, in Extremfällen sogar in Minuten. Diese als veränderliche Sterne oder kurz als Veränderliche bezeichneten Objekte sind bei den Beobachtungen primär dadurch zu erkennen, daß ihre Helligkeiten zeitlichen Schwankungen unterworfen sind. Aus den zu verschiedenen Zeiten beobachteten Helligkeiten kann man sogenannte Lichtkurven ableiten, aus deren Aussehen sich Rückschlüsse auf die Ursachen des Lichtwechsels und aller damit in Verbindung stehenden Erscheinungen ziehen lassen. Auf diese Weise ist es zum Beispiel möglich, die Bedeckungsveränderlichen, d. h. Doppelsterne, bei denen die Ebene der Bahnbewegung beider Komponenten um den gemeinsamen Schwerpunkt zufällig in unserer Blickrichtung liegt und die sich deshalb regelmäßig gegenseitig bedecken, relativ einfach von den physisch veränderlichen Sternen zu trennen.

Bei den physischen Veränderlichen liegen tatsächlich Schwankungen solcher Zustandsgrößen wie Leuchtkraft, Temperatur, Radius, Rotationsgeschwindigkeit, Spektrum oder Magnetfeld vor. Die auftretenden Veränderungen sind in ihrem Charakter sehr mannigfaltig und beruhen sicherlich auf verschiedenen physikalischen Ursachen.

Abgesehen von einigen Ausnahmen ist die Variation der Zustandsgrößen veränderlicher Sterne nicht so groß, daß sich dadurch der innere Aufbau dieser Sterne in fortschreitendem Maße verändern würde.

Die mathematische Durchrechnung von Sternmodellen mit zeitlich veränderlichen Zustandsgrößen steckt infolge des höheren Schwierigkeitsgrades noch in den Anfängen. Man hat zu bedenken, daß an die ohnehin schon recht komplizierten Gleichungen des inneren Aufbaus normaler Sterne zusätzliche mathematische Ausdrücke anzufügen sind, welche die zeitliche Variation der Zustandsgrößen beschreiben.

Die veränderlichen Sterne werden entsprechend dem Charakter ihres Lichtwechsels in verschiedene Kategorien eingeordnet. Die Typenbezeichnung der Veränderlichen leitet sich meistens von dem Namen des Sterns ab, der für die betreffende Gruppe als charakteristisch angesehen wird. Daneben besitzt jeder Veränderliche, über dessen Lichtwechsel gesicherte Kenntnisse vorliegen, einen eigenen Namen. Er setzt sich gewöhnlich aus einer Buchstabenkombination oder einer Zahl und dem Namen des Sternbildes zusammen, in dem sich der veränderliche Stern befindet.

Ungefähr 95% der physischen Veränderlichen befinden sich im Hertzsprung-Russell-Diagramm in bestimmten Gebieten des Riesen- und Überriesenastes. Bis auf einen geringen Anteil gehören diese Objekte aller Wahrscheinlichkeit nach zu den Pulsationsveränderlichen. Unter diesem Begriff werden die Sterne zusammengefaßt, die mehr oder weniger periodisch ihren Radius, aber auch ihre Temperatur und Leuchtkraft ändern. Zu dieser großen Gruppe gehören die W Virginis-, Delta-Cephei-, RR-Lyrae-, Mira-Sterne, einige andere Untertypen und die halbperiodischen Veränderlichen. Insbesondere die Delta-Cephei- und die RR-Lyrae-Sterne zeichnen sich im allgemeinen durch eine große Regelmäßigkeit ihrer Lichtwechsel aus. Außerdem wurde an den Veränderlichen beider Typen eine wichtige Eigenschaft entdeckt: Zwischen der Periodenlänge und ihrer absoluten Helligkeit bestehen gesetzmäßige Zusammenhänge. Sie besagen, daß mit zunehmender Periode auch die absolute Helligkeit der Sterne größer wird. Mit Hilfe dieser fundamentalen Beziehung werden Entfernungsbestimmungen sehr weit entfernter Objekte auch dort möglich, wo die trigonometrische Methode versagt. Zur Erzielung genauer Ergebnisse ist es jedoch erforderlich, die Perioden-Helligkeits-Beziehungen der W Virginis-, Delta-Cephei- und RR-Lyrae-Sterne sorgfältig zu eichen.

Neben den periodischen Veränderlichen gibt es auch Gruppen von Riesensternen mit einem völlig irregulären Lichtwechsel.

Von den übrigen physischen Veränderlichen sind die Mehrzahl Zwergsterne mit Spektren später als F. Ihr Lichtwechsel ist durch mehr oder weniger unregelmäßig wiederkehrende

Helligkeitsanstiege und Lichteinbrüche gekennzeichnet. Allerdings gibt es auch hier feine Unterschiede in der Art des Lichtwechsels, die zur Aufteilung der Hauptreihensterne in Untertypen führten.

Die zu den jungen Hauptreihenveränderlichen gehörenden Sterne vom Typ T Tauri und RW Aurigae scheinen dazu zu neigen, Gruppen zu bilden, die sich bevorzugt in Ansammlungen von interstellarer Materie aufhalten.

Als wichtigstes Ergebnis der vorangegangenen Betrachtungen darf man die Tatsache ansehen, daß sich bestimmte Gruppen physischer Veränderlicher in unterschiedlichen und zum Teil recht scharf begrenzten Bereichen des Hertzsprung-Russell-Diagramms (siehe Abb. 9) aufhalten. Offensichtlich verkörpern die verschiedenen Veränderlichtentypen ganz unterschiedliche Entwicklungsphasen der Sterne. Während der Lichtwechsel der T-Tauri-Sterne gewissermaßen als „Kinderkrankheit“ der Sterne angesehen werden kann, läßt sich der Pulsationslichtwechsel als eine Art „Alterserscheinung“ der Sterne interpretieren.

Sternsystem

Die Untersuchung der räumlichen Verteilung der Sterne und ihrer Bewegungsverhältnisse gehört zu den Forschungsaufgaben der Stellarstatistik. Als deren Begründer ist W. Herschel anzusehen, der vor mehr als 150 Jahren systematische Sternzählungen in ausgewählten Himmelsfeldern durchführte. Die von ihm vorgenommene Beschränkung auf einige Eichfelder entsprang der Notwendigkeit, die enorme Beobachtungs- und Reduktionsarbeit überhaupt bewältigen zu können.

Aus beobachtungstechnischen Gründen erfaßte Herschel nur einen kleinen, die Sonne umgebenden Teil der riesigen Sternansammlung, die wir als Milchstraßensystem, Galaxis oder Sternsystem bezeichnen. Herschel stellte fest, daß die Sternverteilung in dem von ihm überblickten Teil räumlich begrenzt war und daß sie eine starke Abplattung aufwies. Eine ähnliche großräumige Anordnung der Sterne wurde später für das gesamte Milchstraßensystem festgestellt.

Das auch mit bloßem Auge auffällige Band der Milchstraße markiert die Richtungen, in denen wir in der Ebene der dünnen Scheibe entlangblicken. Verständlicherweise häufen sich dort längs der Sichtlinien die Sterne und verschmelzen in ihrer Gesamtheit zu einem diffus leuchtenden Ganzen.

Die tatsächlichen räumlichen Dimensionen des Milchstraßensystems gelang es erst viel später abzuleiten, als der Einfluß der interstellaren Absorption berücksichtigt wurde und verfeinerte stellarstatistische Untersuchungsmethoden zur Verfügung standen. †

Die Erforschung unserer Galaxis ist keine einfache Aufgabe, da die Sonne in ihr keine besondere räumliche Stellung einnimmt, von der aus eine ungehinderte Übersicht über das ganze System möglich wäre. Daher befinden wir uns etwa in der Lage eines Spaziergängers, der sich in einem ihm unbekannten Wald befindet und dessen Ausdehnung, Bewachungsdichte sowie die Verteilung der Baumarten studieren soll, wobei ihm noch teilweise der Ausblick durch Unterholz versperrt ist. Bei den stellarstatistischen Untersuchungen ging es nicht allein darum, die räumliche Verteilung und die Bewegung der Sterne im Milchstraßensystem zu klären, sondern darüber hinaus das gleiche für alle anderen Objekte zu tun. Als ein wichtiges Problem erwies sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob die außerhalb der Milchstraße befindlichen Spiralnebel, die man in großer Anzahl beobachten kann, tatsächlich Nebel sind, die zu unserem Sternsystem gehören oder nicht. Schon Th. Wright (1750) und I. Kant (1755) äußerten die Vermutung, daß die Spiralnebel weitentfernte Sternsysteme seien, so weit entfernt, daß man bei der Beobachtung die einzelnen Sterne nicht mehr zu trennen vermag. Die Bestätigung dieser Behauptung wurde durch Beobachtungen im Jahre 1923 erbracht, als es mit dem 2,5-m-Spiegel des Mount-Wilson-Observatoriums gelang, einzelne Veränderliche in verschiedenen benachbarten Spiral„nebeln“ nachzuweisen. Die Veränderlichen gehören zum Teil dem Delta-Cephei-Typ an, so daß die Möglichkeit gegeben war, ihre Entfernung zu bestimmen. Die ermittelten Entfernungen waren so groß, daß kein Zweifel an der extragalaktischen Natur der Spiralnebel blieb.

In der Folgezeit wurden in einer Reihe weiterer Sternsysteme auch alle Objekte hoher Leuchtkraft entdeckt, wie sie im Milchstraßensystem vorkommen.

Die Erkenntnis, daß die Spiralnebel weitentfernte Sternsysteme sind, wirkte sich sehr befruchtend auf die Erforschung unserer Galaxis aus. Das Studium der an den Sternsystemen auftretenden typischen Strukturmerkmale regte dazu an, gezielt nach entsprechenden Eigenschaften im Milchstraßensystem zu suchen.

Die Sternsysteme werden ihrer Form nach in drei Gruppen eingeteilt: in elliptische, spiralförmige und unregelmäßige Systeme. Am seltensten sind die irregulären Systeme, die nur aus einzelnen Sternwolken bestehen. Relativ häufig kommen dagegen die elliptischen Systeme vor, die sehr regelmäßig aufgebaut sind und deren Sterndichte zum Zentrum hin stark zunimmt. Die spiralförmigen Systeme bestehen aus einem zentralen Kern, um den sich in einer flachen Scheibe einige Spiralarme winden. Diese Arme sind jedoch nicht immer deutlich zu erkennen und können gelegentlich auch in einzelne Sternwolken aufgelöst sein.

Eine Entscheidung darüber, welchem Grundtyp unser Sternsystem angehört, ist durch einen gedanklichen Vergleich möglich. Man hat sich zu diesem Zweck in die Lage eines Beobachters zu versetzen, der sich im Innern der erwähnten Arten von Sternsystemen befindet, und müßte sich vorstellen, welcher Anblick des Himmels sich ihm jeweils bieten wird. Als Ergebnis dieses Gedankenexperiments kann man feststellen, daß unsere Galaxis ein spiralförmiges Sternsystem sein muß, da die bei uns beobachtbare Sternverteilung am Himmel nur durch einen derartigen Grundtyp verständlich wird. Durch diesen Hinweis wird der Stellarstatistik eine konkrete Forschungsrichtung gegeben. Zu ihren Hauptaufgaben gehört unter anderem die Suche nach dem galaktischen Kern und die Identifikation von Spiralarmen mit Hilfe geeigneter Spiralarmindikatoren.

Bei seinen Untersuchungen am Andromeda„nebel“ fand W. Baade, daß zwischen den Sternen im Kerngebiet und den Sternen in den Spiralarmen offensichtlich ein grundlegender

astrophysikalischer Unterschied besteht. Während die Spiralarmstruktur entscheidend durch die absolut hellen Sterne frühen Spektraltyps geprägt wird, die häufig in jungen offenen Sternhaufen vorkommen, enthält das kernnahe Gebiet vorwiegend Risensterne verschiedener Spektraltypen. Auf Grund dieser Tatsache teilte Baade 1944 die Sterne schematisch in zwei Gruppen ein, die er Stern„bevölkerungen“ oder Populationen nannte. Der Population I gehören beispielsweise die jungen O- und B-Sterne und die Mitglieder der jungen offenen Sternhaufen an, die das Bild von der Spiralstruktur wesentlich bestimmen. Zur Population II rechnete er die Riesensterne und Unterzwerge, die in den zentralen Gebieten der Galaxis auftreten. Allerdings findet man diese Objekte auch außerhalb dieses Bereichs, zum Beispiel in den Kugelsternhaufen (siehe Foto). Sie verteilen sich in einem großen kugelsymmetrischen Raum um das Zentrum des Sternsystems.

Die von Baade getroffene Grobeinteilung der Sterne in zwei Populationen bringt tieferliegende physikalische Unterschiede der Sterne zum Ausdruck. Bereits die Darstellung der beiden Populationen im Hertzsprung-Russell-Diagramm (siehe Abb. 9) läßt merkliche Abweichungen erkennen. So befinden sich die Hauptreihensterne der Population II, die Unterzwerge unter der Hauptreihe der Population-I-Sterne. Auch die Riesensterne beider Sternbevölkerungen liegen in verschiedenen Gebieten des Diagrammes. Der Riesenast der Population-II-Sterne gabelt sich etwa beim Spektraltyp G0 in einen horizontalen und einen weiter abfallenden Teil, der in die Hauptreihe einmündet. Die erwähnten Abweichungen sind durch die unterschiedliche chemische Zusammensetzung und das verschiedene Alter der Sterne beider Populationen bedingt. Bei den Sternen der Population I ist der Anteil der Elemente, die schwerer als Helium sind, größer als bei den Sternen der Population II.

Die ursprüngliche Einteilung der Sterne in zwei Populationen wurde inzwischen durch ein verfeinertes Schema ersetzt. Es umfaßt insgesamt fünf Populationen, welche die von Baade aufgestellten Populationen enthalten. In Tabelle 4 sind die neugeschaffenen Populationen mit einigen ihrer typischen Ver-

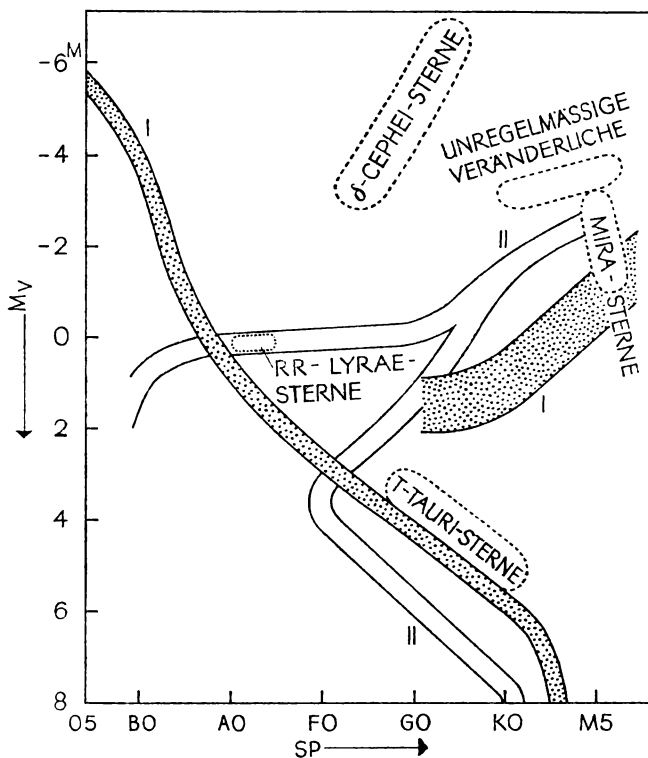


Abb. 9. Schematisches Hertzsprung-Russell-Diagramm für die von Baade ursprünglich getroffene Einteilung in die beiden Populationen I und II. Die Lage einiger Typen von physischen Veränderlichen ist ebenfalls mit angegeben.

treter zusammengestellt. Sie stellen in der angegebenen Reihenfolge eine Alterssequenz dar, bei der von der Halopopulation zur extremen Population I das Alter der Objekte immer geringer wird.

In ihrer räumlichen Anordnung unterscheiden sich die Vertreter der einzelnen Populationen gleichfalls. Die Konzentration zur galaktischen Ebene ist bei den jüngsten Objekten am stärksten und wird beim Übergang zu den älteren Populatio-

nen immer schwächer. Auch in den Bewegungsverhältnissen bestehen beträchtliche Unterschiede zwischen den einzelnen Populationen. Während sich die jüngeren Objekte vorwiegend in der Milchstraßenebene bewegen, besitzen die Vertreter der älteren Populationen im Mittel größere Bewegungskomponenten senkrecht zur galaktischen Ebene.

Das bisher gesammelte Beobachtungsmaterial bestätigte die geäußerte Vermutung, daß unsere Galaxis ein Spiralsystem ist. Es gelang nämlich, in der Sonnenumgebung einige Spiralarmteile nachzuweisen.

Der größte Durchmesser der Milchstraße beträgt ungefähr $3,0 \cdot 10^4$ pc, die mittlere Dicke der galaktischen Scheibe am Ort der Sonne dagegen nur $5 \cdot 10^2$ pc. Unser Sternsystem stellt somit eine sehr flache Scheibe dar. Die Sonne befindet sich in einem Abstand von rund $1 \cdot 10^4$ pc vom Zentrum der Galaxis und liegt offensichtlich an der Innen-, „kante“ eines Spiralarmes. Zwischen der Sonne und dem galaktischen Zentrum wurde ein zweiter Arm gefunden. Ein dritter Spiralarmteil liegt weiter draußen, ungefähr in der Gegend des Antizentrums. Das Zentralgebiet der Galaxis hat eine Ausdehnung von etwa $3 \cdot 10^3$ pc. Es befindet sich – von uns aus gesehen – im Sternbild Schütze, ist aber hinter einer größeren Ansammlung absorbierender Materie verborgen. Daher ist die Beobachtung des Zentralgebiets im sichtbaren Spektralbereich nicht möglich. Der Kern und das Zentralgebiet wurden jedoch durch Infrarotaufnahmen und Radiobeobachtungen nachgewiesen. Die empfangene Infrarotstrahlung des Kerns kommt aus einem Gebiet von nur etwa 10 pc Ausdehnung, das richtungsmäßig mit der starken Radioquelle Sagittarius A zusammenfällt. Nach vorsichtigen Abschätzungen deutet die Intensität der beobachteten Infrarotstrahlung darauf hin, daß in dem relativ kleinen Raumbereich eine Masse von ungefähr $3 \cdot 10^7$ Sonnenmassen konzentriert ist. Im zentralen Teil des Kerns ist innerhalb einer Kugel von 1,5 pc Durchmesser die Materiedichte etwa 10^7 mal größer als die in der Sonnenumgebung. Ähnliche physikalische Verhältnisse dürften im Kern des Andromedanebels vorliegen.

Das Milchstraßensystem ist von einer sphärischen Komponente, dem Halo, umgeben, dessen Ausdehnung ungefähr

Tabelle 4: Einteilung der Populationen

Halopopulation II	Zwischen- population II	Scheibenpopulation	Ältere Population I	Extreme Population I
Kugelsternhaufen RR-Lyrae-Ver- änderliche mit Perioden des Lichtwechsels größer als 0,4 Tage Unterzweige	Langperiodische Veränderliche mit Perioden des Lichtwechsels kleiner als 250 Tage, Spektralklasse früher als M 5 Sterne mit hohen Geschwindigkeiten senkrecht zur galaktischen Ebene	Sterne des Kerns des Milchstraßen- systems Novae RR-Lyrae-Sterne mit Perioden des Lichtwechsels kleiner als 0,4 Tage Sterne mit relativ schwachen Metall- linien im Spektrum	A-Sterne Sterne mit rela- tiv starken Metalllinien im Spektrum	Interstellare Materie Junge Sterne innerhalb der gegenwärtig vor- handenen Spiral- arme Überriesen RW-Aurigae-Sterne T-Tauri-Sterne Offene Sternhaufen mit starker Kon- zentration zur galaktischen Ebene Delta-Cephei-Sterne

Mittleres Alter der Objekte in 10^9 Jahren

6	5 bis 6	1,5 bis 5	0,1 bis 1,5	kleiner als 0,1
Chemische Zusammensetzung: Verhältnis der Masse der Elemente schwerer als Helium zur Masse des Wasserstoffs				
0,001	0,01	0,02	0,03	0,04

$5 \cdot 10^4$ pc beträgt. Der Halo wird von den Objekten, die zur Halopopulation gehören, bevölkert; aber auch Wasserstoffwolken wurden dort nachgewiesen. Im Halo ist die Sterndichte wesentlich geringer als in der galaktischen Scheibe.

Die Sterne und das interstellare Medium führen eine systematische Bewegung um das Zentrum des Milchstraßensystems aus, der im allgemeinen noch geringe individuelle Geschwindigkeitsanteile überlagert sind. Für die Sonne beträgt die Umlaufgeschwindigkeit etwa 250 km/s und die Dauer eines Umlaufes um das Zentrum der Galaxis etwa $2,5 \cdot 10^8$ Jahre.

Das Alter des Milchstraßensystems wird auf $1,5 \cdot 10^{10}$ Jahre geschätzt. Insgesamt vereinigt unsere Galaxis eine Masse von ungefähr $1,3 \cdot 10^{11}$ Sonnenmassen in sich.

Um sich ein anschauliches Bild von der räumlichen Sterndichte etwa in der Sonnenumgebung zu machen, kann man sich die Sterne einmal als Kugeln von 1 mm Durchmesser vorstellen. Verkleinert man ihre gegenseitigen Entfernungen im gleichen Maßstab, dann würden sie in diesem Modell einen mittleren Abstand von 100 km haben. Im Kerngebiet der Galaxis ist die Sterndichte jedoch viel größer.

In den Spiralarmen konzentrieren sich nicht nur die jungen Sternhaufen und Einzelsterne, sondern auch die interstellare Materie und alle anderen Objekte, die zur extremen Population I gehören. Aus den abgeleiteten Raumgeschwindigkeiten der jungen Sterne und ihrem ermittelten Maximalalter darf man schließen, daß sie sich noch nicht allzu weit von den Orten entfernen konnten, an denen sie entstanden. Offenkundig markieren sie die Orte in der Galaxis, in denen sich noch vor kosmisch kurzen Zeiträumen neue Sterne bildeten.

Es ist anzunehmen, daß auch gegenwärtig an bestimmten Stellen in den Spiralarmen noch günstige Bedingungen für Sternneubildungen bestehen.

Der Raum zwischen den Spiralarmen ist vorwiegend mit Sternen der Scheibenpopulation erfüllt, die sich ziemlich gleichmäßig in der galaktischen Ebene verteilen. Selbstverständlich sind diese Objekte auch in den Spiralarmgebieten anzutreffen. In der Sonnenumgebung liegt daher ein Gemisch von Sternen vor, die zu unterschiedlichen Populationen ge-

hören. Selbst Sterne der Halopopulation wurden in unserer Nachbarschaft gefunden. Sie sind infolge exzentrischer Bahnen um das galaktische Zentrum in die Nähe der Sonne gelangt.

Entwicklung der Sterne

Kurzer historischer Überblick

Es erscheint uns zunächst als schwer verständlich, wieso gerade derartig wichtige Fragen wie die nach der Natur der Sterne und ihrer Entwicklung erst im vorigen Jahrhundert in die wissenschaftliche Untersuchung einbezogen wurden. Man muß bedenken, daß sich die Astronomie – abgesehen von dem damals noch relativ geringen physikalischen Grundwissen – seit ihren Anfängen vorwiegend mit Problemen der Positions- und Zeitbestimmung beschäftigt hat, zu denen erst später die Himmelsmechanik trat. Darum ist es auch nicht verwunderlich, daß man in den Sternen zunächst nur leuchtende Massenzentren sah, für die es galt, „Regeln für die Bewegung jedes Gestirns zu finden, aus welcher sein Ort für jede beliebige Zeit“ (F. W. Bessel) bestimmt werden konnte. Die physikalischen Eigenschaften der Sterne seien „zwar der Aufmerksamkeit nicht unwert“ (F. W. Bessel), aber nicht die eigentliche Aufgabe der Astronomie. Es war daher ein großer Fortschritt, als im vergangenen Jahrhundert in steigendem Maße die physikalischen Eigenschaften der Sterne erforscht wurden. Unter anderem versuchte man auch, eine Antwort auf die Frage nach der Entstehung und Entwicklung der Sterne zu bekommen. Im Laufe der Zeit stellte sich heraus, daß die Energiequellen der Sterne ebenso aufmerksam untersucht werden mußten.

An den Anfang unserer Betrachtungen über die Sternentwicklung sollen einige ältere Vorstellungen über die in den Sternen wirksamen Energiefreisetzungsprozesse gestellt werden. Gerade sie geben einen guten Einblick in den jeweiligen Stand der Kenntnisse auf physikalischem Gebiet während eines bestimmten Zeitraumes.

Auf der Grundlage des von ihm gefundenen Gesetzes von der Erhaltung der Energie versuchte J. R. Mayer (1846) den Ausgleich des Energieverlustes der Sonne infolge der ständigen Abstrahlung mit einstürzender meteoritischer Materie zu erklären. Dabei sollte sich seiner Meinung nach die kinetische Energie der einfallenden Teilchen in Wärme umwandeln. Gegen diese Hypothese ist unter anderem einzuwenden, daß zur Aufrechterhaltung der enormen Sonnenleuchtkraft fortwährend beträchtliche Mengen meteoritischer Materie in die Sonne stürzen müßten. Der daraus resultierende Massenzuwachs würde mit der Zeit eine nachweisbare Veränderung der Bahnen aller dem Sonnensystem angehörenden Himmelskörper bewirken. Derartige Bahnveränderungen wurden jedoch nicht festgestellt. Abgesehen davon ergäbe sich ein Alter für die Sonne, das etwa tausendmal kleiner ist als das aus geologischen Untersuchungen ermittelte Erdalter. Wegen der genannten Widersprüche hatte die Hypothese von Mayer bald ihre Bedeutung verloren.

H. von Helmholtz (1854) und Lord Kelvin (1861) sahen als mögliche Energiequelle der Sonne deren Gravitationsenergie an. Durch ständige Kontraktion sollte sich die Gravitationsenergie in Wärmeenergie und Strahlungsenergie umwandeln. Das führe einerseits zu einer Temperaturerhöhung im Sonneninnern, andererseits zu einer Nachlieferung der ausgestrahlten Energie. Die Zeit, in der dieser Vorgang bei der Sonne tatsächlich abläuft, beträgt aber nur $4,4 \cdot 10^7$ Jahre. Auch dieser Wert ist noch viel kleiner als das abgeleitete Alter der Erdkruste. Daraus geht ebenfalls hervor, daß zur Deutung des hohen Alters der Sonne und der anderen Sterne die Umwandlung mechanischer Energie in Wärme als alleinige Energiequelle nicht in Frage kommen kann. Nach den vor allem von N. Lockyer entwickelten Vorstellungen sind die Sterne zunächst recht ausgedehnte Gaswolken geringer Dichte, die langsam kontrahieren. Dabei wird potentielle Energie in Wärme umgewandelt, so daß die Temperatur im Innern der Wolken ständig ansteigt. Einen Teil ihrer Energie strahlen diese „Ursonnen“ ab. Entsprechend der zunächst geringen Temperatur erfolgt die Emission vorwiegend im infraroten,

später im roten Spektralbereich. In diesem Stadium der Entwicklung käme dem Stern auf Grund seiner Zustandsgrößen ein Platz im Überriesen- bzw. Riesengebiet des Hertzsprung-Russell-Diagramms zu. Im weiteren Verlauf der Kontraktion erhöht sich die Temperatur des Sternes, und er bewegt sich vom Riesenast weg auf die Hauptreihe zu, deren oberes Ende er schließlich erreicht. Die nachfolgende langsame Abkühlung des Sternes infolge der Ausstrahlung soll dann längs der Hauptreihe erfolgen, so daß am Ende der Entwicklung der Stern als roter Zwergstern erlischt.

Die Lockyersche Hypothese gilt jedoch heute als widerlegt, weil bei ihr die gleichen Einwände gelten, die schon gegen die Vorstellungen von Helmholtz und Kelvin erhoben wurden. Die Kontraktionszeiten sind zu kurz. Bei der Sonne liegt das Kontraktionsalter, das man theoretisch berechnen kann, weit unter dem aus geologischen Untersuchungen bestimmten Alter der Erdkruste.

Als eine indirekte Hilfe bei der Suche nach der tatsächlichen Natur der Energiequellen der Sterne erwies sich die 1896 entdeckte natürliche Radioaktivität. Wie damalige Abschätzungen ergaben, könnte die Sonne ihre abgestrahlte Energie aus der beim spontanen Zerfall des Radiums freigesetzten Energie decken, wenn der Anteil des Radiums ungefähr den millionsten Teil ihrer Gesamtmasse betragen würde. Allerdings ist damit eine andere und entscheidende Schwierigkeit nicht beseitigt, die darin besteht, daß die Halbwertszeit des Radiums nur 1560 Jahre beträgt. Danach hätte die Sonne schon nach einigen tausend Jahren nur noch einen Bruchteil ihrer ursprünglichen Leuchtkraft. Zur Aufrechterhaltung dieser Hypothese sah man sich daher gezwungen, Prozesse in Betracht zu ziehen, bei denen Radium in genügender Menge nachgeliefert wird. Diese Überlegungen führten jedoch alle zu recht unwahrscheinlichen Anfangsbedingungen, die in der Natur kaum verwirklicht sein dürften.

Ogbleich die zuletzt erwähnte Hypothese schon bald nach ihrer Ausarbeitung an Bedeutung verlor, lenkte sie doch die Aufmerksamkeit der Physiker auf den atomaren Bereich, um dort nach bestehenden Möglichkeiten der Energiefreisetzung

zu suchen. Bereits 1929 wiesen R. d' E. Aktinson und F. G. Houtermans darauf hin, daß unter den im Sterninnern herrschenden Temperaturen durchaus Kernprozesse ablaufen können. Im Jahre 1938 gaben H. Bethe und C. F. von Weizsäcker eine Folge von Kernreaktionen an, bei denen Energie freigesetzt wird. Diese Reaktionskette wurde später unter der Bezeichnung Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus bekannt.

Es gilt heute als erwiesen, daß die Gesamtheit der Kernprozesse die Hauptenergiequelle der Sterne ist, die während der zeitlich am längsten dauernden Phasen der Sternentwicklung wirksam ist. In den relativ kurzen Zwischenphasen kann jedoch die bei der Kontraktion der Sterne freigesetzte potentielle Energie zur ausgestrahlten Energie beitragen.

Die in letzter Zeit bei der Erforschung der Sternentwicklung erreichten Fortschritte haben unsere Kenntnisse bedeutend erweitert. Trotzdem ist unser Wissen über bestimmte Entwicklungsphasen noch sehr lückenhaft. Beispielsweise besteht über die bei der Sternbildung wirksamen Vorgänge noch keine restlose Klarheit. Selbstverständlich gibt es eine Anzahl begründeter Hypothesen, für die jeweils einige Argumente sprechen. An eine Entscheidung darüber, welche Prozesse in der Natur verwirklicht sind, kann aber gegenwärtig noch nicht gedacht werden. Man darf hierbei nicht übersehen, daß es nicht allein darum geht, die Richtigkeit dieser oder jener Hypothesen zu beweisen oder sie zu widerlegen. Es muß auch die Frage geklärt werden, ob in verschiedenen Entwicklungsphasen der Galaxis eventuell unterschiedliche Entstehungsmöglichkeiten der Sterne dominiert haben.

Unter diesem Gesichtspunkt werden im folgenden alle wichtig erscheinenden Hypothesen erwähnt. Damit wird zugleich der Rahmen abgesteckt, in dem sich die moderne Forschung auf diesem Gebiet bewegt. Alle Wertungen über den Wahrheitsgehalt der verschiedenen Theorien entspringen dabei unserem heutigen Erkenntnisstand. Neue Forschungsergebnisse könnten in den nächsten Jahren durchaus zur Veränderung der Wertung führen.

Über die Entstehung der Sterne gibt es gegenwärtig zwei völlig entgegengesetzte Vorstellungen. Nach der einen Auffassung bildeten sich die Sterne durch Kondensation feinst verteilter Materie, nach der anderen gingen die Sterne aus Ansammlungen extrem dicht gepackter Materie hervor, die sich allmählich im Raum verstreuten. Mit beiden Konzeptionen lassen sich jeweils einige Beobachtungsdaten in Einklang bringen. Aus dieser teilweisen Übereinstimmung kann gegenwärtig noch keine eindeutige Entscheidung für oder gegen die eine oder andere der beiden konträren Hypothesen fallen.

Die Vorstellung von der Bildung der Sterne aus Materie geringer Dichte stützt sich vor allem darauf, daß sich die jüngsten Sterne fast immer in dichteren Wolken interstellarer Materie befinden, zumindest aber in ihrer Nachbarschaft auftreten. Es ist daher nicht unbegründet, die interstellare Materie als das übriggebliebene „Baumaterial“ der gerade entstandenen Sterngeneration anzusehen. Aus ihm könnte später unter geeigneten Bedingungen eine neue Sterngeneration hervorgehen. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang die Beantwortung der Frage, ob es einen physikalischen Prozeß gibt, der die „Kondensation“ von lokalen Wolken interstellarer Materie mit einer Dichte von ungefähr 10^{-24} g/cm³ zu dem in den Sternen festgestellten Wert ermöglicht. Es hat den Anschein, als ob dieser Entstehungsprozeß mehr die jüngeren Sterne in der Galaxis betrifft. Wie wir wissen, gibt es aber sehr viele Sterne, die tausendmal älter sind als die jüngsten Objekte. Vielleicht gab es für die alten Sterne im Milchstraßensystem andere Entstehungsbedingungen. Es erscheint daher interessant, danach zu fragen, ob auch für die erste und älteste Sterngeneration in unserer Galaxis die Möglichkeit für ihre Bildung aus einem Zustand geringer Dichte gegeben war. Die Lösung dieses Problems läuft auf die Frage hinaus, ob aus einer massereichen, ausgedehnten Gaswolke sehr geringer Dichte Sterne entstehen können. Für diese Untersuchung wird vorausgesetzt, daß der Gasnebel vorwiegend aus Wasserstoff besteht und sich in innerer Bewegung befindet. Zunächst muß die Mindestmasse

eines solchen Nebels abgeschätzt werden, die erforderlich ist, damit er sich unter der Einwirkung der eigenen Gravitation zusammenzieht. Allgemein läßt sich feststellen, daß die hierzu erforderliche Masse um so größer sein muß, je geringer die Dichte des Nebels und um so höher die in ihm herrschende Temperatur ist.

F. Hoyle führte eine derartige Betrachtung über das Verhalten eines Wasserstoffnebels durch, für den eine Anfangsdichte von 10^{-27} g/cm³ vorausgesetzt wurde. Es zeigte sich, daß die im Nebel eventuell vorhandene kinetische Energie zum Teil für die Ionisation des ursprünglich neutralen Wasserstoffs verbraucht wird. Die Wasserstoffwolke heizt sich dadurch allmählich zu einer Temperatur von $1,5 \cdot 10^4$ °K auf. Eine Kontraktion der Wolke setzt jedoch nur dann ein, wenn die thermische Bewegung der Atome nicht ausreicht, die Gravitationswirkung des gesamten Nebels zu überwinden. Unter der zusätzlichen vereinfachenden Voraussetzung, daß Magnetfelder keine Rolle spielen, konnte Hoyle die für eine Kontraktion notwendige Mindestmasse des Nebels abschätzen. Sie beträgt etwa $1,4 \cdot 10^{10}$ Sonnenmassen; das sind ungefähr 10% der Gesamtmasse unseres Milchstraßensystems.

Falls der Wasserstoff in der Wolke zum größten Teil ionisiert ist, wird die bei der Kontraktion freigesetzte potentielle Energie in Form von Strahlung abgegeben. Deshalb erfolgt die Kontraktion des Nebels isotherm bei der schon angegebenen Temperatur von $1,5 \cdot 10^4$ °K. Die Dichte der Materie erhöht sich dabei fortwährend. Schließlich erreicht die Dichte einen kritischen Grenzwert, bei dem, unter der herrschenden Temperatur, Teilmengen von der die Wolke bildenden Materie gravitationsinstabil werden und zu kontrahieren beginnen. Daher zerfällt der Nebel in einem gewissen Stadium in kleinere Teile, in denen der Kontraktionsvorgang weiter abläuft. Auch in diesen Gebieten kommt schließlich die isotherme Kontraktion an einem bestimmten Zeitpunkt zum Stillstand, geht aber nach einer erneuten Teilung in noch kleinere Bereich weiter. Der Wechsel von isothermer Kontraktion und nachfolgender Teilung endet erst, wenn in den Untergebieten die Materiedichte so groß geworden ist, daß die Strahlung aus den inneren

Teilen der kleinen Wolken nicht mehr ungehindert in den Weltraum gelangen kann. In diesem Stadium ist der Opazitätskoeffizient so angestiegen, daß die bei der Kontraktion freiwerdende Energie zu einem beträchtlichen Teil zur Aufheizung der Materie beiträgt.

Die Masse der kleinsten Untergebiete liegt in der Größenordnung von einer Sonnenmasse. Die Dichte im Zentrum dieser Materieansammlungen beträgt nun ungefähr $5 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3$, während ihre Radien etwa das Tausendfache der Sternradien betragen. Die angegebenen Zahlenwerte zeigen, daß diese „Protosterne“ noch weit vom stabilen Zustand eines Hauptreihensterns entfernt sind.

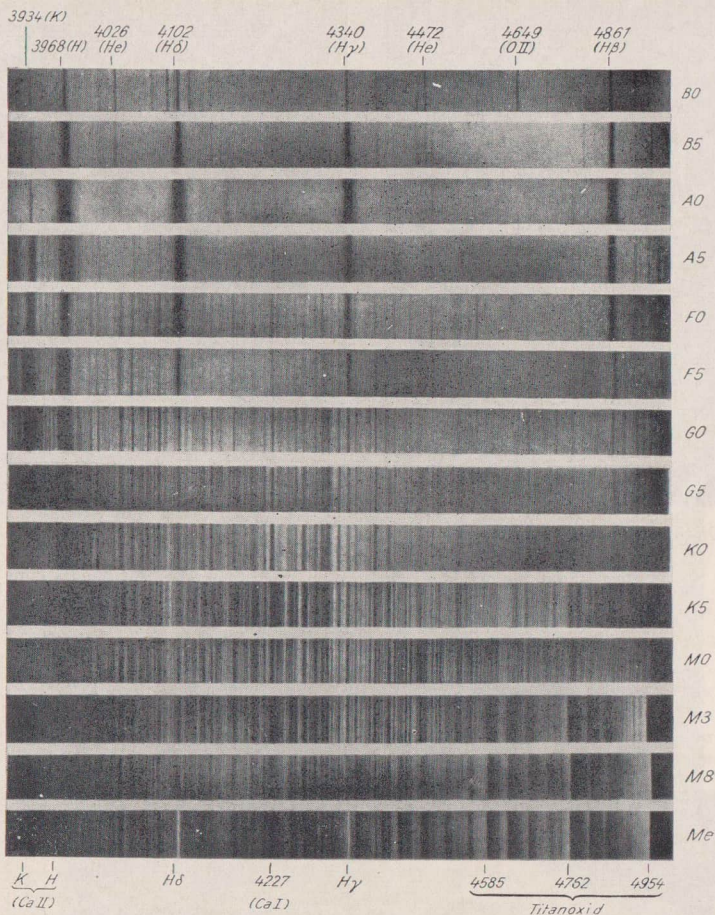
Wie bereits erwähnt wurde, bestehen in den kühleren Außengebieten der die Protosterne umgebenden Nebelhüllen günstige Bedingungen für die Kondensation und das weitere Wachstum von Staubteilchen. Der entstehende Stern ist in diesem Entwicklungsstadium von einer dichten Hülle aus Gas und Staubteilchen umgeben. Diese Partikel absorbieren die vom Stern kommende Strahlung und emittieren sie anschließend im infraroten Spektralbereich. Möglicherweise stellt ein gewisser Prozentsatz der entdeckten Infrarotsterne solche extrem jungen Sterne dar. Später, in einem sehr fortgeschrittenen Stadium der Kontraktion ist die ultraviolette Strahlung und Korpuskularstrahlung der jungen Sterne sehr intensiv, so daß durch den Strahlungs- und Korpuskeldruck der zirkumstellare Staub z. T. in den interstellaren Raum „geblasen“ werden kann. Dadurch und durch das Anwachsen der kleinen Teilchen zu größeren Brocken setzt ein „Aufklaren“ der dichten Hülle ein; der Stern wirft gewissermaßen den ihn umgebenden Kokon ab. Wie entsprechende Beobachtungen nahelegen, scheinen einige sehr junge Sterne Reste ihrer ehemals dichten Staubhülle noch zu besitzen.

Auch im interstellaren Raum kann der Strahlungsdruck vor allem der heißen Sterne hoher Leuchtkraft auf die Staubteilchen einen Einfluß ausüben. Befinden sich in der Nachbarschaft solcher heißen Sterne interstellare Gas- und Staubwolken, so können unter Umständen durch den von ihnen verursachten Strahlungsdruck zu bestimmten Gebieten der ursprüng-

lichen Wolke überdurchschnittlich viele Staubeilchen hin- „geblasen“ werden, die dort eine bestimmte Zeit verweilen. Von der Staubansammlung geht auch eine geringfügige Gravitationswirkung aus, derzufolge die in der Nähe befindlichen Teilchen angezogen werden können und sich eventuell der Wolke anschließen. Natürlich ist in ihr auch interstellares Gas enthalten. Falls die Wolke gravitationsinstabil wird, beginnt sie zu kontrahieren. Allerdings kommt dieser Vorgang zum Stillstand, wenn der dabei ständig steigende Gasdruck einen vergleichbaren Wert gegenüber der Gravitationskraft und dem Strahlungsdruck angenommen hat. Es wird vermutet, daß in dieser Entwicklungsphase die Wolke in kleinere Bestandteile zerfällt, in denen sich die Kontraktion fortsetzt. Dieser Vorgang soll sich solange wiederholen, bis die Strahlung die Stoffe nicht mehr durchdringen kann. Sollten die Sterne auf diese Weise entstehen, so müßte ein erheblicher Anteil ihrer Masse aus interstellarem Gas bestehen.

Auch die Möglichkeit der Sternbildung unter dem Einfluß heißer Sterne wurde erwogen. Dabei ging man von der Voraussetzung aus, daß sich in einem Komplex von Wasserstoffwolken ein heißer O- oder B-Stern befindet, dessen intensive ultraviolette Strahlung – bis zu einer bestimmten, von den Zustandsgrößen des Sternes abhängigen Entfernung – den neutralen Wasserstoff ionisiert. Der davon erfaßte Raumbereich ist im allgemeinen kleiner als der gesamte Wolkenkomplex. Während die Temperatur des ionisierten Wasserstoffs etwa $1,5 \cdot 10^4$ °K beträgt, liegt sie beim neutralen Wasserstoff bei $1 \cdot 10^2$ °K. Da der Gasdruck proportional mit der Temperatur ansteigt, ist er in dem Raumbereich, in dem der Wasserstoff ionisiert ist, etwa hundertmal größer als in den neutralen Außengebieten. Folglich setzt eine Expansion des ionisierten Gases in die umliegenden kühleren Gebiete ein. Dabei bewegt sich die Front des heißen Gases mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 10 km/s vorwärts. Diese Expansionsbewegung kann dazu führen, daß einzelne Wolken infolge ihrer Beschleunigung den Wolkenkomplex verlassen.

Es ist nicht ausgeschlossen, daß in den Verdichtungszone die Bildung von Protosternen vor sich geht, sofern eine Gravita-



Spektralaufnahmen von Sternen, die unterschiedlichen Spektralklassen angehören. Die erfaßten Linien der Balmerreihe des Wasserstoffs sind markiert, ebenfalls die Linien H und K des einfach ionisierten Kalziums. Die Zahlen geben die Wellenlängen der Linien in Ångström an.

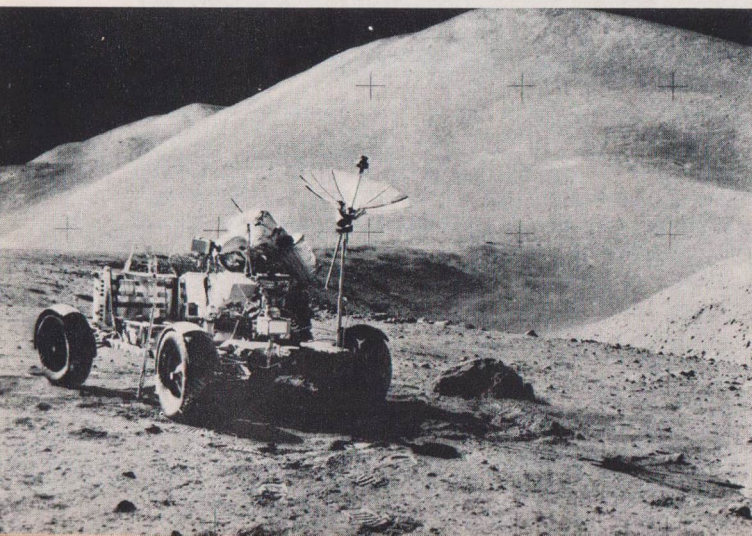


Elliptisches Sternsystem NGC 205



*Spiralförmiges Sternsystem
M 33*

Sehr unterschiedliche Oberflächenformen konnten von Scott und Irvin während ihres Aufenthaltes auf dem Mond studiert werden. Im Hintergrund sind die Erhebungen der Apeninnen zu erkennen. Im Mittelgrund rechts ist ein Teil der Hadleyrille zu sehen. Über ihr am Abhang der Apeninnenberge liegt der St. Georgs Krater, der durch den rechten Bildrand abgeschnitten wird.





Irreguläres Sternsystem NGC 3034 = M 82 (im Bild unten), das als Radioquelle unter der Bezeichnung 3C 231 bekannt ist. Die Aufnahme wurde im Lichte der Wasserstofflinie H_{α} gemacht und zeigt die leuchtenden Wasserstoffwolken. Einzelne aus dem Kern dieser Galaxis herausschießende Wasserstoff-Filamente sind ebenfalls zu erkennen.

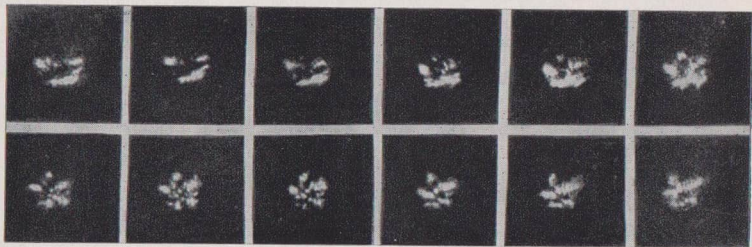
Oben die spiralförmige Galaxis M 81.



Elliptisches System NGC 4486 (Hubble-Typ EO peculiar), das mit der starken Radioquelle Virgo A identisch ist. Aus den mittelpunkts-nahen Gebieten der Galaxis geht ein leuchtender Materiestrahl hervor, in dem einzelne Knoten zu erkennen sind. Das von dem Strahl emittierte Licht ist polarisiert. Wahrscheinlich entsteht das Licht durch Synchrotronprozesse.

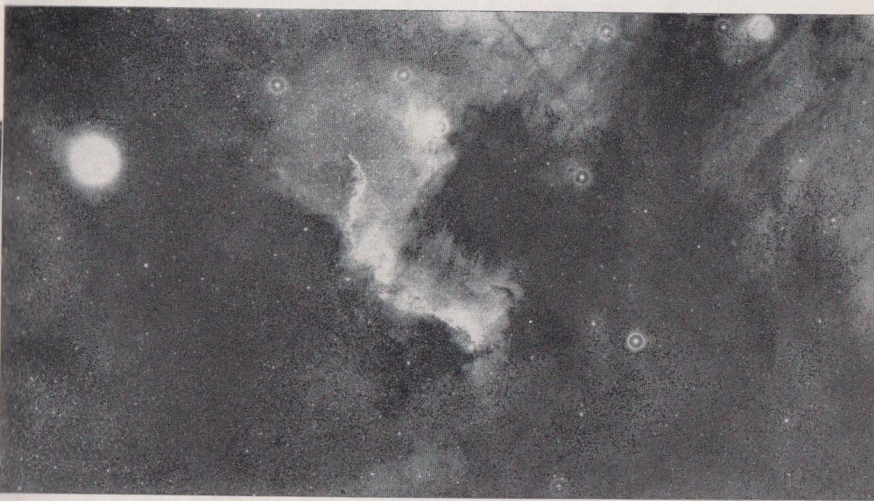
Kugelsternhaufen M 3 im Sternbild Jagdhunde. Sein Durchmesser beträgt 32 pc. Die Anzahl der ihm angehörenden Sterne wird auf etwa 100 000 geschätzt.





Momentaufnahmen ($1/15$ s) von Aldebaran (α Tauri) mit einer Fernsehapparatur an einem langbrennweitigen Teleskop im zeitlichen Abstand von 10 s. Die unregelmäßigen Formen der Sternbildchen werden durch die veränderlichen atmosphärischen Einflüsse hervorgerufen. Ohne den störenden Einfluß der Erdatmosphäre wäre die Beugungsfigur des Sternes kreisförmig und hätte nur etwa $\frac{1}{10}$ des Durchmesseres der aufgenommenen Bildchen.

Teil des Nordamerikanebels NGC 7 000. Das Licht der hellen Gebiete rührt im wesentlichen von den durch die kurzwellige Sternstrahlung zum Leuchten angeregten Wasserstoffatomen her. Die Stern,,leeren“ werden durch nichtleuchtende vorgelagerte Wolken von Staubpartikeln vorgetäuscht.





Die Plejaden, ein offener Sternhaufen im Sternbild Stier. Das Licht einiger der hellen Sterne wird an der dort befindlichen staubförmigen interstellaren Materie reflektiert. Die faserförmige Struktur der Reflexionsnebel ist gut zu erkennen.

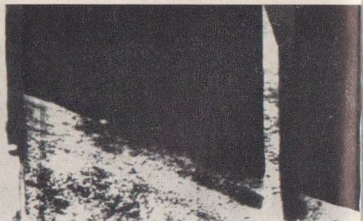
Der Orionnebel (rechts) gehört zu einem ausgedehnten Komplex von gas- und staubförmiger Materie an, deren Gesamtmasse auf etwa 700 Sonnenmassen geschätzt wird. In der Nähe der dunklen „Bucht“ in der Bildmitte befinden sich die vier Trapezsterne, die wahrscheinlich erst vor einigen 10^4 Jahren die Hauptreihe erreicht haben. Das Licht dieser und einiger anderer früher Sterne regt die Gasmassen zum Leuchten an.





Offene Sternhaufen κ und ζ Persei im Sternbild Perseus.

Nahaufnahme des Mondbodens durch Luna 9. Die körnige Struktur der Mondoberfläche ist gut zu erkennen, ebenfalls einige flache Vertiefungen. Der Stein im linken Bildteil – mit dem dunklen Schatten – hat einen Durchmesser von 15 cm.



tionsstabilität auftritt, d. h. der Gasdruck kleiner als die Gravitationskraft ist. Entsprechende Abschätzungen zeigen, daß die unter solchen Bedingungen erforderliche Mindestmasse der Gaswolken ungefähr 400 bis 800 Sonnenmassen betragen muß. Da jedoch, wie die Untersuchungen ferner zeigen, ein einzelner Stern vom Spektraltyp O5 bis B0 in der Lage ist, eine umgebende Gasmasse von 10^3 bis 10^5 Sonnenmassen „wegzublasen“, kann es gelegentlich auch zur Zusammenballung solcher Wolken kommen, die die genannte Mindestmasse besitzen.

Nach den skizzierten Vorstellungen über die Bildung der Sterne wäre eine Erklärung der Entstehung der verschiedenen Sternpopulationen möglich. So könnte man sich die Sterne der Halopopulation aus einem vorwiegend aus Wasserstoff bestehenden Gasnebel entstanden denken. Die jüngeren Sterne der extremen Population I dürften sich dagegen aus interstellarer Materie gebildet haben. Von ihr wird angenommen, daß sie sich zum großen Teil schon einmal im Sterninnern befand, später aber wieder in den interstellaren Raum gelangte.

W. A. Ambarzumjan stellte eine Hypothese auf, nach der sich die Sterne aus überdichteter Materie bildeten. Er sieht eine wesentliche Stütze seiner Konzeption in der Tatsache, daß sich in der Galaxis die gasförmige Materie und die jungen Sterne ausbreiten und im Raum zerstreuen. Die Verdichtung der diffusen Materie zu Sternen entzieht sich dagegen der direkten Beobachtung und kann daher nur indirekt erschlossen werden. Weiterhin läßt sich gegen die Verdichtungshypothese der Einwand vorbringen, daß noch weitgehend ungeklärt ist, wie sich die kontrahierenden Gasmassen von ihrem Drehimpuls befreien. Hieraus und unter Beachtung weiterer Fakten ergibt sich die Möglichkeit, daß diese Objekte gemeinsam bei der Explosion von hypothetischen dichten Körpern entstanden sind, deren physikalische Eigenschaften allerdings noch nicht genau bekannt sind.

Für die Bildung von Galaxien – und damit auch von Sternen – bei der Explosion dichter Körper spricht auch die Tatsache, daß bei einigen Sternsystemen, zu denen auch unser Milchstraßensystem gehört, fortwährend Materie dem Kern entströmt. Dieser Vorgang wird durch nichts ausgeglichen, so

daß die äußeren Partien der Galaxien ständig auf Kosten des Kerns anwachsen. Die Effektivität des Prozesses scheint so hoch zu sein, daß die während der „Lebenszeit“ einer Galaxis aus dem Kern austretende Materie mit der Menge der in ihr befindlichen interstellaren Materie vergleichbar ist.

Vor einigen Jahren gelang die Entdeckung, daß sich in den Kernen einer gewissen Anzahl von Galaxien vor einigen Millionen Jahren offensichtlich explosionsartige Vorgänge unvorstellbaren Ausmaßes abgespielt haben müssen. In deren Folge wurden gewaltige Gasmassen ausgestoßen, aus denen sich zum Teil kleine Galaxien bildeten.

Aus diesen Beobachtungen läßt sich schließen, daß der Kern eines Sternsystems, zumindest innerhalb eines bestimmten Zeitraums, ein aktives Zentrum ist, das Material in die anderen Teile der Galaxie liefert. In einigen Fällen scheint der Kern einer großen Galaxie nicht nur Einfluß auf die Entwicklung des eigenen Sternsystems zu haben, sondern darüber hinaus auch für die Entstehung der benachbarten Begleiter-Galaxien wirksam zu sein. Über den physikalischen Zustand der Materie in den aktiven Kernen von Sternsystemen ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch relativ wenig bekannt. Auf die spezielle Problematik der Aktivität von Kernen einiger Galaxien wird im Zusammenhang mit der Betrachtung der Entwicklung von Galaxien eingegangen.

Die Forschungsergebnisse der Zukunft werden es erweisen, welche Hypothese über die Entstehung der Sterne der Realität am nächsten kommt. Gegenwärtig läßt sich jedenfalls noch kein abschließendes Urteil fällen, weil noch zu viele Probleme ungelöst sind.

Kontraktionsstadium der Sterne

In der Entwicklungsphase, in der die Strahlung die Gas- und Staubwolken nicht mehr durchdringen kann, verläßt die bei der Kontraktion freigesetzte Energie, wie bereits ausgeführt, nicht auf direktem Wege den Protostern und die ihn umgebende Hülle. Sie wird im Verlauf einer Reihe von Absorptions- und Emissionsprozessen von den Atomen und Staub-

teilchen zu den peripheren Gebieten der zirkumstellaren Hülle transportiert und dort im infraroten Spektralbereich abgestrahlt.

Während in den vorangegangenen Betrachtungen über die Frühstadien der Sternentwicklung vor allem die Vorgänge in der zirkumstellaren Hülle dargestellt wurden, soll jetzt das Schwergewicht auf die Beschreibung der physikalischen Prozesse im Sterninnern gelegt werden. Offensichtlich wird die weitere Entwicklung eines Sterns im Kontraktionsstadium entscheidend davon bestimmt, welcher Transportmechanismus für die Energie wirksam wird.

Die weitere Entwicklung eines Protosterns im Kontraktionsstadium wird entscheidend davon bestimmt, welcher Mechanismus des Energietransports wirksam wird. Bei einem Protostern ist in den äußeren Sphären die Temperatur noch so niedrig, daß mit dem Auftreten zweier Grenzzonen gerechnet werden muß, in denen sich der physikalische Zustand der Materie ändert. In der äußeren Zone dissoziiert das Wassermolekül, in der weiter innen liegenden Zone wird der Wasserstoff ionisiert. In beiden Zonen nimmt die Opazität so stark zu, daß die Energie nicht mehr allein durch die Strahlung nach außen transportiert werden kann. Hier tritt die Konvektion als zusätzlicher Transportmechanismus auf. Sie erfaßt schließlich den gesamten kontrahierenden Stern.

Unter so vereinfachenden Voraussetzungen wie der Vernachlässigung möglicherweise vorhandener interstellarer Magnetfelder und des Drehimpulses der prästellaren Wolke läßt sich die Entwicklung der Protosterne berechnen. Wie Untersuchungen zeigen, erreichen die kontrahierenden Protosterne für eine kurze Zeit eine sehr hohe Leuchtkraft, die das Hundert- bis Tausendfache der Leuchtkraft im späteren Hauptreihenstadium betragen kann. Der Protostern wäre in diesem Entwicklungszustand im Überriesen- oder Riesenast (siehe Abb. 10) des Hertzsprung-Russell-Diagramms zu suchen. In der Folgezeit nimmt seine Leuchtkraft stark ab, während sich seine effektive Temperatur nur unwesentlich ändert. Die Folge davon ist, daß der Protostern im Hertzsprung-Russell-Diagramm fast geradlinig auf die Hauptreihe „hinabfällt“. In

dieser Phase setzt bei einer Temperatur von einigen hunderttausend $^{\circ}\text{K}$ das „Deuteriumbrennen“ ein, bei dem sich schwerer Wasserstoff in das leichte Heliumisotop ${}^3\text{He}$ unter Ausstrahlung eines Gammaquants verwandelt. Da jedoch der Protostern vorerst völlig konvektiv durchmischt sein dürfte, kann sich noch keine chemische Inhomogenität herausbilden. Wie die theoretischen Untersuchungen ferner ergaben, nimmt die Kontraktionsgeschwindigkeit einer Gaswolke mit ihrer Masse zu. Aus diesem Grunde gelangt ein massereicher Protostern viel eher in die Nähe der Hauptreihe als ein zu gleicher Zeit „gestarteter“ massearmer Stern. Vor Erreichen der Hauptreihe verlangsamt sich die Kontraktion, und die Leuchtkraft ändert sich nur ganz unerheblich. Gleichzeitig bildet sich die den ganzen Stern durchziehende Konvektionszone zurück.

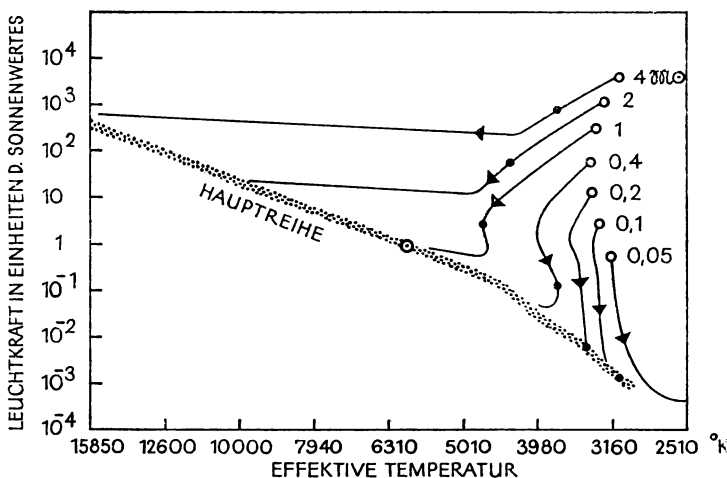


Abb. 10. Entwicklungswege von Sternmodellen unterschiedlicher Masse im Hertzsprung-Russell-Diagramm während des Kontraktionsstadiums. Die offenen Kreise markieren die Anfangszustände, in denen die Modellrechnungen begonnen wurden. Die vollen Kreise kennzeichnen das Ende der Phase im Kontraktionsstadium, in dem die Sterne vollständig konvektiv durchmischt werden. Im Gegensatz zu den massereichen Sternen nimmt die Leuchtkraft der massearmen Sterne im Kontraktionsstadium um mehrere Größenordnungen ab. Die Lage der Sonne auf der Hauptreihe ist durch einen Kreis angegeben (nach C. Hayashi).

Außerdem hat die in dieser Phase im Innern herrschende Temperatur schon so hohe Werte erreicht, daß bereits vor dem Erreichen der Hauptreihe das „Wasserstoffbrennen“ einsetzt. Die dabei freiwerdende Energie addiert sich zu der Kontraktionsenergie, so daß sich tatsächlich die Gesamtleuchtkraft etwas erhöht. Je näher der Stern an die Hauptreihe heranrückt, um so mehr verringert sich das Tempo der Kontraktion. Dafür wird – infolge der noch ständig steigenden Temperaturen – die Energiefreisetzung durch Kernprozesse immer effektiver. Schließlich kommt die Kontraktion völlig zum Stillstand, und die Kernenergiequellen decken den Energiebedarf allein. Die Temperatur im Sterninnern ist nun so hoch geworden, daß der innere Gasdruck ausreicht, um die Last der darüberliegenden Sternmaterie zu tragen. Die Leuchtkraft der Sterne sinkt in dieser Entwicklungsphase wieder etwas ab, weil jetzt der von der Kontraktion herrührende Energiebeitrag entfällt. Der Stern wird damit zu einem stabilen Hauptreihenstern.

Die Entwicklung der masseärmeren Sterne geht in den letzten Phasen des Kontraktionsstadiums etwas anders vor sich. Für Sterne, deren Massen zwischen 0,26 und 0,08 Sonnenmassen liegen, beginnt ebenfalls das „Deuteriumbrennen“ im Kontraktionsstadium. Ein vollständiger Ablauf der Proton-Proton-Reaktion in der letzten Phase des Kontraktionsstadiums, bei der ${}^4_2\text{He}$ entstehen müßte, findet bei ihnen infolge der relativ geringen Temperaturen nicht statt.

Bei den Sternen, deren Masse unter 0,08 Sonnenmassen liegt, bleiben die Temperaturen immer so niedrig, daß überhaupt keine nennenswerte Anzahl von Kernprozessen mehr abläuft. Bei diesen Sternen erreicht die Temperatur am Ende ihrer Kontraktionsphase ein Maximum. Danach kühlt der Stern langsam aus, und die Sternmaterie gerät in den entarteten Zustand. Da die Leuchtkraft solcher Objekte sehr gering ist, nennt man sie auch „schwarze Zwerge“. Sie befinden sich am unteren Ende der Hauptreihe und bewegen sich während ihrer Abkühlung im Hertzsprung-Russell-Diagramm nach rechts unten.

Das Kontraktionsstadium eines Sterns, der etwa die Masse und die chemische Zusammensetzung der Sonne aufweist, ist

in Abbildung 11 wiedergegeben. Die an dem Entwicklungsweg im Herzprung-Russell-Diagramm eingetragenen Zeiten vermitteln anschaulich, wie schnell die ursprünglich sehr hohe Leuchtkraft abnimmt. Bereits nach dem Ablauf von ungefähr

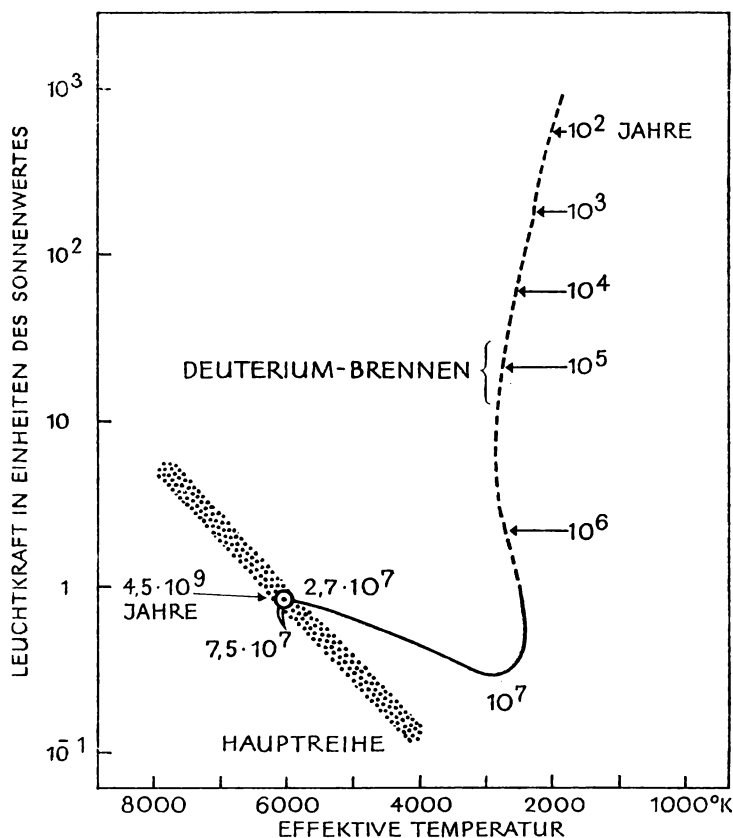


Abb. 11. Kontraktionsweg eines Sternmodells mit einer Sonnenmasse bis zum Hauptreihenstadium. Die angegebenen Zeiten werden vom Anfang der Entwicklungsrechnungen gezählt und gewähren einen Einblick in die unterschiedliche Geschwindigkeit des Kontraktionsvorganges. Längs des gestrichelten Entwicklungsweges wird der Stern vollständig konvektiv durchmischt.

$1,4 \cdot 10^7$ Jahren setzen im Sterninnern die ersten Kernprozesse ein – wenn man vom Deuteriumbrennen absieht –, und nach etwa $2,7 \cdot 10^7$ Jahren hat der sonnenähnliche Stern den ihm zukommenden Platz auf der Hauptreihe eingenommen.

Wie die bisherigen Berechnungen zeigen, hängt der Entwicklungsweg, den die kontrahierenden Protosterne im Hertzsprung-Russell-Diagramm durchlaufen, von ihrer Masse und der chemischen Zusammensetzung der Sternmaterie ab. Die Kontraktionsgeschwindigkeit der Protosterne ist am Anfang so hoch, daß nur eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit dafür besteht, Sterne in diesem Entwicklungsstadium direkt zu beobachten. Erst wenn sie in die Nähe der Hauptreihe gelangt sind, besteht eine reale Aussicht, sie beobachten zu können.

Sterne im Hauptreihenstadium und ihre Entwicklung zu roten Riesen

Nachdem ein Stern auf die Hauptreihe gelangt ist, verbleibt er dort den größten Teil seines „Lebens“. Während dieser Entwicklungsphase wird in den heißen, mittelpunktsnahen Gebieten durch Kernprozesse laufend Wasserstoff in Helium verwandelt, wobei Energie freigesetzt wird. Wie schon erwähnt, dominiert bei den massearmen kühleren Sternen die Proton-Proton-Reaktion, während in den massereichen heißen Sternen die Energie überwiegend im Verlaufe des Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus freigesetzt wird. In der Sonne überwiegt die Proton-Proton-Reaktion (siehe Abb. 8). Der durch die Kernumwandlungen im Sonneninnern hervorgerufene Verlust an Ruhemasse beträgt in der Sekunde $4,3 \cdot 10^6$ t. Dieser Wert erscheint zunächst sehr hoch, ist jedoch, verglichen mit der Gesamtmasse der Sonne, nur eine verschwindende Größe. Eine Überschlagsrechnung ergibt, daß die Sonne ungefähr erst nach 10^{10} Jahren etwa ein Tausendstel ihrer Masse durch Energiefreisetzungsprozesse verloren hat. Für die anderen Sterne ist der Massenverlust entsprechend ihrer Leuchtkraft noch größer oder kleiner, aber auch dort gegenüber der jeweiligen Gesamtmasse zu vernachlässigen. Der fortwährende Aufbau von Helium aus Wasserstoff durch die Kernprozesse hat ein allmäh-

liches Absinken des Wasserstoffanteils in den zentralen Bereichen der Sterne zur Folge. Bei den massereichen Sternen führt die im Innern wirksame Konvektion ständig Sternmaterie heran, in der noch der ursprüngliche Anteil des Wasserstoffs gegeben ist. Trotz allem erhöht sich in der konvektiv durchmischten Zone schließlich der Heliumanteil. Im Gegensatz dazu werden die äußeren Gebiete der Sterne von dieser Konvektion nicht erfaßt, so daß dort die ursprüngliche chemische Zusammensetzung erhalten bleibt.

Im Laufe der Zeit entsteht als Folge der mit der Energiefreisetzung zusammenhängenden Vorgänge eine neue chemische Zusammensetzung im Sterninnern. Diese wiederum verursacht aber nach dem Eindeutigkeitssatz von Vogt und Russell eine Änderung des gesamten inneren Sternaufbaus. Die kontinuierlichen Veränderungen der chemischen Zusammensetzung eines Teils der Sternmaterie führen dazu, daß sich immer wieder ein neuer stabiler Zustand einstellt. Diese Änderungen beeinflussen natürlich auch die Zustandsgrößen. Die während der Sternentwicklung hervorgerufenen Effekte wären jedoch im Hauptreihenstadium erst nach kosmisch langen Zeiträumen nachweisbar.

Das Wesentliche bei der Betrachtung der Entwicklungsvorgänge besteht darin, in allen Entwicklungsphasen der Sterne nichts Endgültiges in dem jeweiligen inneren Aufbau und den zugehörigen Zustandsgrößen zu sehen, sondern immer nur den besonderen, gerade erreichten Entwicklungsstand. Ganz in diesem Sinne ist auch die von M. Schwarzschild gegebene Formulierung des Vogt-Russell-Theorems zu verstehen, daß der „physikalische Zustand und Aufbau eines Sterns während aller Phasen seiner Entwicklung eindeutig durch seine Masse und ursprüngliche chemische Zusammensetzung bestimmt ist“. Auch bei dieser Fassung des Eindeutigkeitssatzes ist zu beachten, daß an seiner Allgemeingültigkeit, wie bereits erwähnt, einige Abstriche zu machen sind.

Bei der Einführung des Hertzsprung-Russell-Diagramms (siehe Abb. 3) waren die von der Hauptreihe und dem Riesenast belegten Flächen des Zustandsdiagrammes als Gesamtheit der Örter angesehen worden, die charakteristisch für einen stabilen

Sternaufbau sind. Wie die bisherigen Betrachtungen über das Kontraktionsstadium ergaben, stellen sich aber auch schon in der Nähe der Hauptreihe Zustände ein, die praktisch stationär sind, die nur wegen ihrer „Kurzlebigkeit“ gegenüber dem Hauptreihenstadium für den Beobachter sehr schwer zu erfassen sind. Die Hauptreihe in Hertzsprung-Russell-Diagramm kann in diesem Sinne als eines der Gebiete angesehen werden, in dem sich die Sterne wegen ihrer langen Verweilzeit in diesem Stadium „stauen“, während andere Bereiche des Diagramms verhältnismäßig rasch durchlaufen werden.

Die längs der Hauptreihe in Richtung auf die masseärmeren Sterne zunehmende Besetzungsdichte ist weniger das Resultat der unterschiedlich langen Verweilzeiten von Sternen verschiedener Masse. Vielmehr liegen gesicherte Beobachtungen dafür vor, daß bei Sternneubildungen mehr masseärmere als massereiche Sterne entstehen. Infolge der langen Entwicklungszeiten der massearmen Sterne auf der Hauptreihe ist daher zu erwarten, daß sich dort ganz unterschiedlich alte Objekte aufhalten. Durch Beobachtungen ist es im allgemeinen nicht möglich, beispielsweise die jungen K- und M-Sterne von den alten zu unterscheiden. Je weiter man jedoch die Hauptreihe nach „oben“ geht, d. h., je massereicher die Sterne werden, um so mehr wird der mögliche Altersbereich eingeschränkt, den die dort befindlichen Sterne überdecken können.

Die Verweildauer im Hauptreihenstadium hängt im wesentlichen von der Masse eines Sterns ab und ist bei den massereichsten Sternen am kürzesten. Die durch das Wasserstoffbrennen in den zentralen Gebieten der Sterne verursachten Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Sternmaterie äußern sich in einer laufenden Umgestaltung des Sternaufbaus und Änderungen der Zustandsgrößen. Die Leuchtkraft und der Radius der Sterne nehmen gegen Ende des Hauptreihenstadiums etwas zu, was im Hertzsprung-Russell-Diagramm in einem „Abwandern“ von der Hauptreihe sichtbar wird (siehe Abb. 12). Allerdings ist die Verschiebung so geringfügig, daß diese Sterne noch zur Hauptreihe gerechnet werden.

Der Verlauf und die Dauer der weiteren Entwicklung der

Sterne hängen in hohem Maße von ihrer Masse ab. Daher müssen wir Sterne mit mehr als 2 Sonnenmassen, Sterne mit mittleren Massen (zwischen 1 und 2 Sonnenmassen) und massearme Sterne getrennt darstellen.

Die *massearmen* Sterne entwickeln sich so langsam, daß sich auch die ältesten von ihnen seit der Bildung des Milchstraßensystems noch nicht von der Hauptreihe fortbewegt haben. Es ist deshalb fast ausgeschlossen, Entwicklungseffekte an ihnen studieren zu können.

Bei den *massereichen* Sternen hingegen ist bereits nach relativ kurzer Zeit der Wasserstoffanteil in den zentralen Gebieten stark abgesunken. Wenn er bis auf 1% des ursprünglichen Wertes zurückgegangen ist, läßt die Effektivität der Kernprozesse rasch nach. Das Wasserstoffbrennen kommt zum

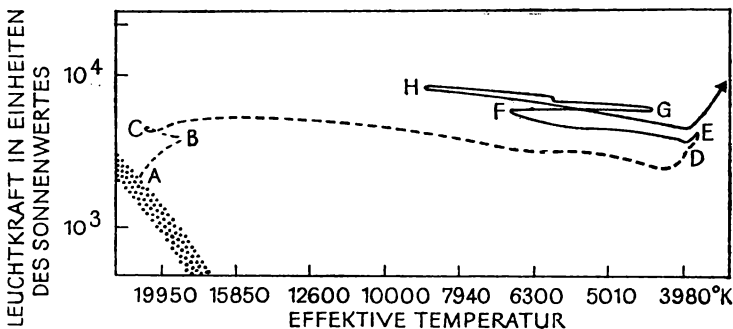


Abb. 12. Berechneter Entwicklungsweg eines Sterns mit 7 Sonnenmassen im Hertzsprung-Russell-Diagramm. Die Hauptreihe ist schematisch durch eine Schraffur gekennzeichnet. Der gestrichelte Teil des Entwicklungsweges markiert die Phasen, in denen das Wasserstoffbrennen stattfindet. Die durchgezogenen Teile des Entwicklungsweges geben an, daß auch das Heliumbrennen abläuft. Zwischen den mit A bis C bezeichneten Punkten des Entwicklungsweges finden die Wasserstoffprozesse vorwiegend im Kern statt. Von C bis D erfolgt die Energiefreisetzung in einer Schalenquelle. Von D bis G brennt das Helium im Kern und der Wasserstoff in einer Schalenquelle. Von G bis kurz vor das Ende des berechneten Entwicklungsweges sind zwei Schalenquellen im Kern vorhanden: in der inneren laufen Salpeter-Prozesse ab, und in der äußeren brennt der Wasserstoff (nach R. Kippenhahn et al.).

Erliegen, und die Konvektionszone bildet sich in den mittelpunktsnahen Bereichen zurück. In dieser Phase beginnt ein Stern als Ganzes zu kontrahieren. Die damit verbundene Temperaturerhöhung hält die Leuchtkraft etwa auf gleicher Höhe wie vorher. Im Hertzsprung-Russell-Diagramm (siehe Abb. 12) bewegt sich ein solcher Stern wieder ein kleines Stück auf die Hauptreihe zu. Infolge der Kompression der Sternmaterie steigt auch in den noch wasserstoffhaltigen Bereichen um den Heliumkern die Temperatur sehr stark an, und das Wasserstoffbrennen setzt in einer schmalen Kugelschale ein. Die Zone, in der die Wasserstoffprozesse ablaufen, „brennt“ sich im Laufe der Zeit nach außen durch; die Masse des ausgebrannten Kerns vergrößert sich fortwährend. Gleichzeitig kontrahiert der nahezu isotherme Heliumkern. Die damit verbundene ständige Dichteerhöhung ist so groß, daß der Heliumkern in der Lage ist, die Last des über ihm befindlichen Materials zu tragen. Wenn jedoch der Massenanteil des Heliumkerns 10% der Gesamtmasse des Sterns überschreitet, setzt eine rasche Kontraktion des Kerns ein, die mit einer Aufheizung verbunden ist. Die über dem Kern liegenden noch wasserstoffhaltigen Schichten stürzen ebenfalls nach innen und gelangen dadurch in Bereiche höherer Temperatur und Materiedichte. Trotzdem verringert sich zunächst noch die Energiefreisetzung. Während in dieser Entwicklungsphase die mittelpunktsnahen Gebiete im Stern kontrahieren, expandiert gleichzeitig seine Hülle. Dabei verringern sich die effektive Temperatur und die Leuchtkraft des Sterns; er bewegt sich im Hertzsprung-Russell-Diagramm (siehe Abb. 12) relativ schnell auf das Gebiet der roten Riesen zu. Im selben Zeitraum entwickelt sich von den weiter außen gelegenen Schichten nach innen eine Konvektionszone, die zum dominierenden Energietransportmechanismus wird. Die Konvektionszone durchmischt in dieser Phase etwa 70% Gesamtmasse des Sterns.

Infolge der Expansion der äußeren Schichten des Sterns ist die Opazität der Sternmaterie relativ gering geworden; die Strahlung kann die Sternatmosphäre besser verlassen, und die Leuchtkraft des Sterns steigt rasch wieder an. Ihr weiteres Anwachsen wird allerdings gestoppt, wenn das Wasserstoff-

brennen in der Schalenquelle um den Heliumkern nachläßt. Etwa zu diesem Zeitpunkt hat sich im Kern infolge der schon erwähnten Kontraktion eine derartige Temperatur- und Dichteverteilung eingestellt, daß nun die als Salpeter-Prozeß bezeichneten Heliumreaktionen einsetzen. Nach dem Zünden des Heliumbrennens im Kern gibt es zwei atomare Energiequellen; denn weiter außen findet noch das Wasserstoffbrennen in einer dünnen Kugelschale statt.

Wenn der Heliumvorrat im Kerngebiet des Sterns erschöpft ist, verlagern sich die Salpeter-Prozesse ebenfalls in eine Kugelschale, während der entstandene Kohlenstoffkern kontrahiert. Weiter außen laufen in einer zweiten Kugelschale noch Wasserstoffprozesse ab. Nach dem Erlöschen des Wasserstoffbrennens deckt die heliumbrennende Schale allein den Energiebedarf. In dieser Entwicklungsphase setzt wieder eine Kontraktion des gesamten Sterns ein.

In dem zuletzt betrachteten Zeitraum ändern sich die Zustandsgrößen des Riesensterns ständig, und er durchläuft im Hertzsprung-Russell-Diagramm (siehe Abb. 12) einen komplizierten Entwicklungsweg. Dabei kreuzen die massereichen Riesensterne mehrmals das Gebiet im Hertzsprung-Russell-Diagramm, in dem sich die veränderlichen Sterne vom Typ Delta Cephei aufhalten. Die Riesensterne werden in gewissen Zeiten „anfällig“ gegen Pulsationsinstabilitäten, kommen aber immer wieder zu einem stabilen Zustand zurück. Die Dauer der eingelagerten Veränderlichenphasen ist unterschiedlich groß. Für einen Stern von 7 Sonnenmassen, der im Laufe seiner Entwicklung als Riesenstern insgesamt fünfmal den Streifen im Hertzsprung-Russell-Diagramm durchquert, in dem sich die Delta-Cephei-Sterne befinden, beträgt nach den theoretischen Berechnungen die Zeitdauer höchstens $3,5 \cdot 10^5$ Jahre, im kürzesten Falle nur $2,4 \cdot 10^3$ Jahre.

Vor der weiteren Betrachtung der Entwicklung der massereichen Riesensterne soll die Entwicklung der *Sterne mit mittleren Massen* dargestellt werden.

In der Nähe der Hauptreihe verläuft die Entwicklung der Sterne mit mittleren Massen zwischen 1 und 2 Sonnenmassen ähnlich wie die der massereichen Sterne. Nachdem der Wasser-

stoff im Kerngebiet ausgebrannt ist, verlagert sich die Energiefreisetzung in eine Kugelschale um ihn; der Stern „wandert“ im Hertzsprung-Russell-Diagramm von der Hauptreihe ab. Da jedoch die Temperatur im Kerngebiet wesentlich niedriger ist als in den massereichen Sternen und außerdem eine relativ hohe Dichte vorliegt, beginnt dort das Elektronengas zu „entarten“. In diesem Zustand ist die Materie sehr dicht gepackt, und es gilt eine Gasgleichung, die praktisch unabhängig von der Temperatur ist. Infolge der hohen Dichte – ungefähr $1 \cdot 10^5 \text{ g/cm}^3$ – ist der Heliumkern in der Lage, dem von außen auf ihn wirkenden Druck zu widerstehen. Es kommt deshalb auch zu keiner Kontraktion, und die Temperaturerhöhung bleibt in engen Grenzen. Infolge der in der Kugelschale ablaufenden Wasserstoffreaktionen nimmt die Masse des Heliumkerns ständig zu.

Die Leuchtkraft des Sterns wächst in dieser Entwicklungsphase rasch an; er bewegt sich im Hertzsprung-Russell-Diagramm zum Riesenast hinauf.

Im Sterninnern wird – trotz der sehr geringen Temperaturabhängigkeit der für den entarteten Zustand gültigen Gasgleichung – der Heliumkern so heiß, daß gerade das Heliumbrennen einsetzen kann. Kurz danach kommt es im Stern zu einer Erscheinung, die als „Heliumblitz“ bezeichnet wird.

Der *Heliumblitz* (Helium-flash) entsteht, weil die beim Salpeter-Prozeß freiwerdende Energie in der entarteten Materie des Kerns verbleibt und zu seiner Temperaturerhöhung beiträgt. Die ansteigende Temperatur entfacht das Heliumbrennen noch mehr, und die freiwerdende Energie führt zu einem weiteren Temperaturanstieg, der wiederum die Energiefreisetzung beschleunigt. Als Folge davon „geht“ der Stern thermisch „durch“. Der Prozeß endet jedoch bereits nach wenigen Minuten, weil die inzwischen im Heliumkern gespeicherte Energie ausreicht, um die Entartung der Materie aufzuheben. Die Materie verhält sich wieder wie ein ideales Gas; der Kern beginnt infolge der hohen Temperatur zu expandieren und sich abzukühlen. Zwangsläufig sinkt dadurch die hohe Energiefreisetzungsrates wieder ab.

Eine nennenswerte kurzzeitige Vergrößerung der von außen zu

beobachtenden Leuchtkraft des Sterns wird kaum eintreten, da die beim Heliumblitz entstehende Energie in seinem Innern verbraucht wird. Nach der „Explosion“ im Sterninnern setzt sich das Heliumbrennen in dem nicht mehr entarteten Kern ähnlich wie bei den massereichen Sternen fort.

Aus der bisherigen Betrachtung der Entwicklung der massereichen Sterne bis zum Abklingen des Heliumbrennens im Kerngebiet während des Stadiums der roten Riesen könnte man erwarten, daß nach einer anschließenden Temperaturerhöhung der Kohlenstoff zu „brennen“ beginnt. Möglichkeiten bestehen dafür, wenn genügend hohe Temperaturen und Dichten vorliegen. Nach Modellrechnungen von P. Paczyński für Sterne von 10 und 15 Sonnenmassen zünden sie das „Kohlenstoffbrennen“ in dem nichtentarteten Zentralgebiet. Dagegen setzt das Kohlenstoffbrennen in Sternen mit 3,5 und 7 Sonnenmassen nach Berechnung des gleichen Astronomen in einem entarteten Kern ein. Vor dem Einsetzen der Kohlenstoffprozesse ist die Temperatur nicht im Zentrum am größten, sondern in der heliumbrennenden Schale.

Nach den vorliegenden Ergebnissen scheint sich im Stern ein physikalischer Zustand einzustellen, der extrem hohe Energieverluste durch Neutrinos vermeidet. Im Zentralgebiet des Sterns beginnt nämlich die Temperatur zu sinken und verursacht dadurch eine Verringerung seiner Neutrino-Leuchtkraft. Als Folge dieser Entwicklung stellt sich ein ungewöhnlicher Temperaturverlauf im Sterninnern ein. Das Maximum der Temperatur liegt nicht mehr im Sternmittelpunkt, sondern in der heliumbrennenden Schalenquelle, in der die Energie freigesetzt wird. Die Temperatur beträgt dort ungefähr $2,7 \cdot 10^8$ °K. Durch eine derartige Temperaturverteilung wird nicht nur Energie nach außen transportiert, sondern auch nach innen. Dort wird sie in Neutrinoenergie umgewandelt und von den Neutrinos nach außen abgeführt.

In diesem späten Entwicklungsstadium wurde eine Erscheinung entdeckt, die eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Heliumblitz hat. Aus entsprechenden Berechnungen ist zu entnehmen, daß in der heliumbrennenden Schalenquelle Instabilitäten auftreten. Bei geringer Temperaturerhöhung wird die Energie-

freisetzung so stark angefacht, daß die entstehende Energie nicht abtransportiert werden kann. Sie trägt somit zur weiteren Temperaturerhöhung bei und bewirkt ein zusätzliches Ansteigen der Energiefreisetzung. Gleichzeitig beginnt aber die Schalenquelle zu expandieren, und die bei den Kernprozessen freiwerdende Energie wird dabei verbraucht. Als Folge davon kühlt sich wiederum dieser Sternbereich ab und kontrahiert anschließend. Erneut wird der instabile Zustand erreicht, und die auch als „thermischer Puls“ bezeichnete Energieerscheinung tritt wieder auf.

Ein derartiger Zyklus dauert einige tausend Jahre. Wie oft sich diese Erscheinung wiederholt, kann allerdings noch nicht gesagt werden, da die diesbezüglichen Berechnungen nach dem sechsten Puls zunächst abgebrochen wurden. Bis jetzt ist nur erwiesen, daß sich die verschiedenen Pulse zwar ähneln, aber nicht identisch sind. Ungeklärt ist auch, ob die thermischen Pulse die weitere Entwicklung des gesamten Sterns merklich beeinflussen oder ob sie nur unwesentliche Erscheinungen der „normalen“ Sternentwicklung sind.

Die theoretisch berechneten Aufenthaltsdauern von Sternen verschiedener Masse in den wichtigsten Entwicklungsstadien sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Aus ihr geht hervor, daß sich die Sterne die längste Zeit auf oder zumindest in der Nähe der Hauptreihe aufhalten. Das Gebiet zwischen der Hauptreihe und dem Riesenast, die „Hertzsprunglücke“, wird dagegen recht schnell durchlaufen. Daraus wird verständlich, warum dieser Bereich im Hertzsprung-Russell-Diagramm so dünn mit Sternen besetzt ist.

Tabelle 5: Zeitdauer der einzelnen Entwicklungsphasen für Sterne unterschiedlicher Masse (nach I. Iben jr.)

Masse	15	9	5	2,25 Sonnenmassen
Hauptreihenstadium	$1,03 \cdot 10^7$	$2,17 \cdot 10^7$	$6,77 \cdot 10^7$	$4,96 \cdot 10^8$ Jahre
Übergang zum Riesenast (Hertzsprung-Lücke)	$1,00 \cdot 10^5$	$3,24 \cdot 10^5$	$2,60 \cdot 10^6$	$8,84 \cdot 10^7$ Jahre
Riesenstadium	$1,56 \cdot 10^6$	$4,02 \cdot 10^6$	$1,70 \cdot 10^7$	— Jahre

Erst im Riesenast verweilen die Sterne wieder eine etwas längere Zeit, und die Besetzungsdichte im Hertzsprung-Russell-Diagramm ist entsprechend größer.

Einige Entwicklungswege für Sternmodelle verschiedener Masse sind in Abbildung 21 zusammen dargestellt. Dieses Hertzsprung-Russell-Diagramm bietet einen guten Überblick über die dabei auftretenden Unterschiede in den Entwicklungswegen. Besonders auffällig sind die schleifenartigen Bewegungen der massereichen Sterne im Gebiet des Riesenastes.

Sternentwicklung nach dem Riesenstadium

Die Besprechung der theoretischen Untersuchungen über die Entwicklung der Einzelsterne endete beim Stadium der Riesensterne. Dabei blieb noch die wesentliche Frage unbeantwortet, wie die daran anschließende Entwicklung der Sterne weitergeht. In diesem Zusammenhang wurde bereits erwähnt, daß unter günstigen physikalischen Verhältnissen Kohlenstoffprozesse einsetzen. Es ist zu vermuten, daß nach ihrem Versiegen nach einer Dichte- und Temperaturerhöhung noch schwerere Elemente zu brennen beginnen. Infolge der enorm hohen Dichte im Innern der weitentwickelten Sterne werden nun physikalische Prozesse wirksam, die bis dahin bedeutungslos waren. Vor allem die Gravitationsenergie beginnt wieder eine große Rolle zu spielen. Bei den sehr hohen Dichten kann ihr Betrag den der Kernenergie um mehr als das 10fache übersteigen. Bei den nun vorliegenden Dichteverhältnissen im Sterninnern beginnt das Elektronengas insgesamt zu entarten. Die Elektronen üben einen Druck aus, der temperaturunabhängig ist, aber mit der Dichte wächst. Dadurch wird eine dauerhafte Stabilisierung des Sterns gewährleistet. Dieser Zustand ist charakteristisch für die weißen Zwerge. Allerdings können nur diejenigen Sterne weiße Zwerge werden, deren Masse einen Grenzwert von 1,4 Sonnenmassen nicht überschreitet. Da aber nur Sterne mit größeren Massen die hier zur Diskussion stehenden Entwicklungsphasen bis jetzt erreichen konnten und die beobachteten weißen Zwerge im Mittel Massen von 0,6 Sonnenmassen besitzen, müssen sie einen Massen-

verlust erlitten haben. Hierfür wurden mehrere Möglichkeiten in Betracht gezogen. Ein Mechanismus besteht in dem „Sternwind“ der von einigen Riesen- und Überriesensternen ausgeht. Man versteht hierunter einen Korpuskelstrom, der ständig in den interstellaren Raum entweicht. Wie groß der davon herrührende Massenverlust jedoch ist, läßt sich aus den spektroskopischen Beobachtungen nur sehr unsicher ermitteln.

Bei der Sonne wurde der „Sonnenwind“ mit Hilfe von Raumsonden gemessen. In der Nähe der Erde beträgt die Teilchendichte im Mittel 5 Protonen/cm³, die sich mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 400 bis 500 km/s bewegen. Aus diesen Daten ergibt sich, daß der ständige Massenverlust der Sonne durch den Sonnenwind etwa 20% des Massenverlustes durch die Strahlung beträgt.

Es wird vermutet, daß einige Riesensterne einen Teil ihrer Masse in Form einer relativ dichten Gashülle abstoßen. Sie tritt als sogenannter planetarischer Nebel in Erscheinung. Nach etwa 20 000 Jahren hat er sich im interstellaren Raum verteilt. Auf einen anderen wirksamen Prozeß der Massenabgabe stieß man bei der Durchrechnung der Entwicklung von engen Doppelsternsystemen.

Wesentlich für die nachfolgenden Überlegungen ist die an sich selbstverständliche Tatsache, daß sich die theoretisch bis ins Unendliche erstreckenden Gravitationswirkungen der beiden Komponenten eines Doppelsternsystems überlagern. Für einen weitentfernten Körper äußert sich die Gravitationswirkung beider Komponenten jedoch so, als ob sie von einem Massenpunkt ausginge. Ein relativ naher Körper kann sich dagegen in Gebieten befinden, in denen entweder die Gravitationswirkung der einen oder der anderen Komponente überwiegt. Dazwischen gibt es eine Grenzfläche, in der sich die Gravitationswirkungen beider Sterne gerade ausgleichen. Anstelle der Kraftfelder werden oft ihre Potentiale angegeben, die mit ihnen im engen Zusammenhang stehen. Auch bei ihnen lassen sich durch alle Punkte gleichen Potentials Flächen legen. Im Abbildung 13 sind gerade die Potentialflächen eingezeichnet, innerhalb derer die Potentialflächen der beiden Komponenten noch völlig getrennt sind.

Bei den hier zur Diskussion stehenden Berechnungen von R. Kippenhahn und A. Weigert wurde vorausgesetzt, daß der eine Stern eine Masse von 2 Sonnenmassen, der andere eine Masse von 1 Sonnenmasse besitzen soll und der gegenseitige Abstand beider Komponenten 6,6 Sonnenradien beträgt. Die Entwicklung beider Sterne verläuft genauso wie bei gleichartigen Einzelsternen. Die massereichere Komponente erreicht natürlich in der Entwicklung bald einen Vorsprung und beginnt zuerst, als Ganzes zu expandieren und im Hertzsprung-Rus-

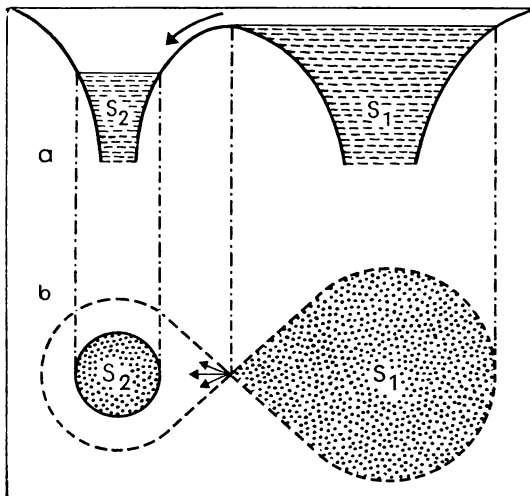


Abb. 13.a) Vereinfachtes Modell zur Darstellung der Anziehungsverhältnisse in engen Doppelsternsystemen. Die zwei Flüssigkeitsmengen S_1 und S_2 sind durch einen Wall endlicher Höhe voneinander getrennt. Dadurch steht ihnen nur jeweils ein begrenztes Volumen zur Verfügung. Würde man die Flüssigkeitsmenge S_1 noch etwas vergrößern, dann erfolgte ein Überlauf nach S_2 .

b) Modell von den Anziehungsverhältnissen in engen Doppelsternsystemen. Während der Stern S_1 das ihm zur Verfügung stehende birnenförmige Volumen gerade ausfüllt, hat der Stern S_2 noch etwas Platz. Bei einer geringfügigen Ausdehnung von S_1 fließt Materie von S_1 nach S_2 an der durch die Pfeile markierten Stelle über, weil Oberflächenteile des Sterns S_1 in den Bereich geraten, wo die Anziehungskraft von S_2 dominiert (nach R. Kippenhahn und A. Weigert).

sell-Diagramm von der Hauptreihe abzuweichen. Gegen Ende des Wasserstoffbrennens im Kerngebiet füllt der Stern das ihm „zustehende“ Volumen ganz aus (siehe Abb. 13). Bei weiterer Expansion strömt Materie über die kritische Grenzfläche, die von dem masseärmeren Begleiter aufgenommen wird. Bei dem Expansionsvorgang verliert der massereiche Stern nach und nach seine äußeren wasserstoffhaltigen Schichten, während der im wesentlichen aus Helium bestehende Kern übrigbleibt. In dieser Phase ändert sich der Sternaufbau vor allem wegen des ständigen Massenverlustes. Im Hertzsprung-Russell-Diagramm (siehe Abb. 14) bewegt sich der Stern etwa parallel zur Hauptreihe nach unten, wobei seine

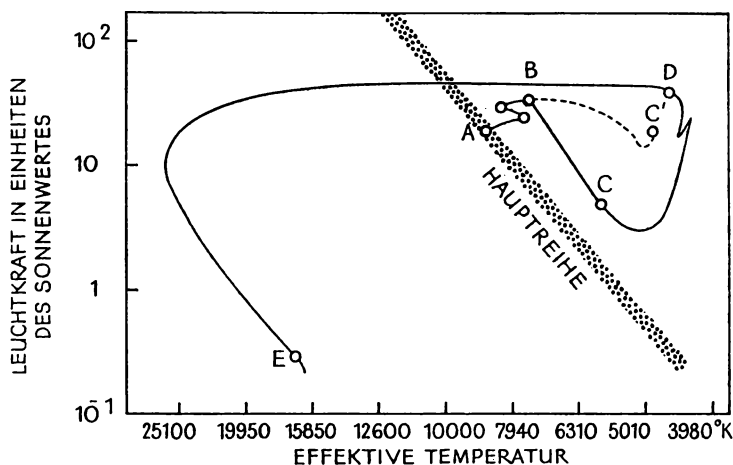


Abb. 14. Entwicklungsweg eines Sterns mit zwei Sonnenmassen, der einem engen Doppelsternsystem angehört. Vom Punkt A bis B läuft seine Entwicklung wie bei einem Einzelstern ab, dann füllt der Stern das ihm zustehende Volumen aus. Bei einer weiteren Expansion im Laufe seiner Entwicklung verliert der Stern Masse an die masseärmere Komponente, deren Anfangsmasse mit 1 Sonnenmasse angenommen wurde. Ohne den Massenverlust würde sich der Stern auf dem gestrichelt eingezeichneten Entwicklungsweg nach C' bewegen. Die Massenabgabe erfolgt sehr rasch, während sich der Stern von B nach C bewegt; danach geht sie langsamer vonstatten und setzt sich mit einer Unterbrechung bis zum Punkt D fort. Im Punkt E gelangt der Stern in das Gebiet der weißen Zwerge (nach A. Weigert).

Leuchtkraft ständig abnimmt. Im gleichen Zeitraum verschiebt sich die zweite Komponente infolge des Massenzuwachses und der damit verbundenen Leuchtkrafterhöhung auf der Hauptreihe nach oben.

Natürlich beeinflußt der Massenaustausch auch die Bahnelemente des Doppelsternsystems. So verlagert sich der Schwerpunkt des Systems aus der Nähe der ursprünglich massereichen Komponente zur ehemals masseärmeren Komponente (siehe Abb. 15). Auch der gegenseitige Abstand und die

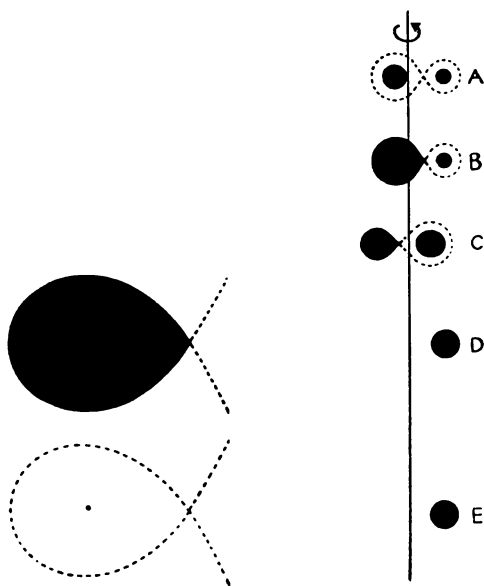


Abb. 15. Änderungen der kritischen Potentialflächen im Laufe der Entwicklung eines engen Doppelsternsystems. Die von den Sternen eingenommenen Volumina sind schwarz eingezeichnet, die maximal erlaubten gestrichelt dargestellt. Die durchgezogene senkrechte Gerade markiert die Rotationsachse des Systems. Die infolge des Massenaustausches zwischen den Komponenten auftretende Schwerpunktsverlagerung und die Abstandsänderungen in dem Doppelsternsystem sind deutlich zu erkennen. Die Buchstaben stellen den Zusammenhang zu den in Abbildung 14 dargestellten Entwicklungsphasen her (nach R. Kippenhahn und A. Weigert).

Umlaufzeiten der beiden Sterne um den gemeinsamen Schwerpunkt nehmen neue Werte an. Damit vergrößert sich auch das „erlaubte“ Volumen, das dem entwickelten Stern zur Verfügung steht. Er kann weiter expandieren und wird dadurch zu einem roten Riesenstern, dessen Leuchtkraft anwächst. Etwa gleichzeitig läßt der Massenverlust nach und kommt schließlich völlig zum Erliegen. Die Restmasse des Sterns beträgt nur noch 0,26 Sonnenmassen. Davon sind 96% in dem Heliumkern vereinigt, während die restlichen 4% auf die wasserstoffreiche Hülle entfallen. Die dem Stern verbliebene Masse ist zu gering, um die in seinem Inneren herrschende Temperatur durch Kontraktion so weit zu erhöhen, daß das Heliumbrennen anläuft. Der Energiebedarf des Sterns wird daher nur von Wasserstoffprozessen in einer Schalenquelle gedeckt, während die Elektronen im Heliumkern in den Zustand der Entartung übergehen. Außerdem beginnen die äußeren Sphären des Sterns zu kontrahieren. In dieser Entwicklungsphase bewegt sich der Stern bei etwa gleichbleibender Leuchtkraft im Hertzsprung-Russell-Diagramm vom Riesenast weg auf die Hauptreihe zu und kreuzt sie schließlich. Etwa gleichzeitig werden die Wasserstoffreaktionen immer seltener, und im Stern findet keine Energiefreisetzung mehr auf der Basis von Kernprozessen statt. Während der entartete Heliumkern praktisch nicht mehr kontrahiert, schrumpft die Wasserstoffhülle sehr stark zusammen, als Folge davon tritt eine beträchtliche Verminderung der Leuchtkraft ein. Der Stern hat nun die typischen Eigenschaften eines weißen Zwerges. Solange seine Restbestände an Wärmeenergie ausreichen, strahlt er sie aus. Zuletzt erfolgt die Energieabstrahlung im infraroten Spektralbereich. In dem für die weißen Zwerge charakteristischen Zustand können die Sterne lange Zeiträume verweilen.

Durch die skizzierten Berechnungen wurde ein bis dahin unverständenes Problem gelöst, wie in manchen Doppelsternsystemen die masseärmere Komponente den fortgeschrittenen Entwicklungsstand verkörpert, während die massereichere Komponente entwicklungsmäßig jünger ist. Auf die letzten Entwicklungsstadien der Sterne, die massenmäßig den Grenzwert von 1,4 Sonnenmassen überschreiten, soll nun eingegan-

gen werden. Im Innern dieser Sterne sind in den Zentralgebieten unter den extrem hohen Dichten die Elektronen entartet. Mit einer Kontraktion des Kernes wächst seine Dichte, und die Energie des entarteten Gases wird so hoch, daß Elektronen in die Atomkerne eindringen. Dort verwandeln sich die Elektronen zusammen mit den Protonen in Neutronen. Dieser Vorgang wird als inverser β -Zerfall bezeichnet. Da die Elektronen für die Druckstabilisierung des Sternes verlorengegangen sind, kommt es zu einer Schrumpfung des entarteten Kernes, bis er zusammenbricht. Bei diesem Kollaps des Sternes zu Neutronendichten wird innerhalb weniger Sekunden ein hoher Betrag von Gravitationsenergie freigesetzt. Der Vorgang verursacht unausweichlich die Explosion des Sternes und hat die Ausmaße, die bei den Erscheinungen der Supernovae beobachtet werden. Nach der Explosion bleibt ein Neutronenstern übrig, dessen Durchmesser in der Größenordnung von 10 bis 30 km liegt und in dem die Dichte auf 10^{12} g/cm^3 angewachsen ist.

Für eine bestimmte Zeitspanne wird ein Neutronenstern als Pulsar beobachtet werden können. Im Gegensatz zu den weißen Zwergen ist aber noch nicht gesagt, daß der Stern in ein stabiles Endstadium gelangt ist. Die Theorie der Neutronensterne sagt für sie ebenfalls eine obere Grenzmasse voraus. Wird sie überschritten, dann setzt ein unaufhaltsamer Gravitationskollaps ein. Die Untersuchung der dabei auftretenden physikalischen Verhältnisse erfordert die Berücksichtigung relativistischer Effekte. Die gewaltige Massenkonzentration führt zu einer starken Raumkrümmung, die schließlich zu einer Abschnürung der Masse führen kann. Die Folge davon ist, daß die von dem Neutronenstern ausgehende elektromagnetische Strahlung nicht mehr nach außen gelangen kann. Für einen solchen Stern hat man den Begriff „schwarzes Loch“ geprägt. Es macht sich nur durch seine Schwerkraftwirkung bemerkbar und ist in der Lage, Strahlung und Materie in sich hineinzureißen. Nach den gegenwärtigen Vorstellungen sind die schwarzen Löcher der Endzustand, in den die massereichen Sterne gelangen.

Die theoretischen Untersuchungen über die Entwicklung der Sterne führten zu einigen außerordentlich wichtigen Resultaten. Hierzu gehört nicht nur die Erkenntnis, daß die Zeitskala der Sternentwicklung für menschliche Begriffe sehr groß ist, sondern auch die Tatsache, daß es im Weltall unterschiedlich alte Sterne geben muß.

Die langen Zeiträume, in denen die Entwicklungsvorgänge ablaufen, machen es unmöglich, die theoretischen Vorstellungen durch fortlaufende Beobachtungen eines Sternes zu überprüfen. Dafür gibt es aber in unserem Sternsystem verschieden alte Sterne, von denen jeder für sich ein bestimmtes Stadium in der Sternentwicklung repräsentiert. Wenn es gelingt, unter diesen Sternen alle diejenigen herauszufinden, deren ursprüngliche chemische Zusammensetzung und Masse gleich sind, und wenn für sie außerdem der gleiche Bildungsmechanismus angenommen werden darf, dann ließe sich mit ihnen ein „empirischer“ Entwicklungsweg im Hertzsprung-Russell-Diagramm ableiten. Auf diese Weise würde es möglich, aus dem beobachtbaren räumlichen Nebeneinander unterschiedlich alter Sterne auf das zeitliche Nacheinander ihrer einzelnen Entwicklungsphasen zu schließen.

Geeignete Objekte, die die genannten Forderungen annähernd erfüllen, sind die Mitglieder offener Sternhaufen.

Offene Sternhaufen sind lokale Ansammlungen einer mehr oder weniger großen Anzahl von Sternen, die ihrer Entstehung nach eine Einheit bilden. Es ist sehr wahrscheinlich, daß die Materie, aus der sich diese Sterne bildeten, chemisch gleich zusammengesetzt war. Ferner ist anzunehmen, daß sich die Bildung der Haufensterne über einen relativ kurzen Zeitraum erstreckte. Der Entwicklungszustand der Sterne wäre dann jeweils nur von ihren individuellen Massen abhängig. Von Sternhaufen zu Sternhaufen ist sicher das Alter verschieden; möglicherweise ist auch die chemische Zusammensetzung der Sternmaterie eine andere.

Die Entfernung der Sternhaufen muß sehr genau bekannt sein, damit aus den beobachteten scheinbaren Helligkeiten der

Sterne ihre absoluten Helligkeiten bestimmt werden können. Mit Hilfe spezieller Methoden der Mehrfarbenphotometrie gelingt es jedoch in den meisten Fällen, die Entfernung und die eventuell vorhandene interstellare Absorption mit ausreichender Genauigkeit zu ermitteln.

Die bearbeiteten Beobachtungsergebnisse werden gewöhnlich in einem Farben-Helligkeits-Diagramm, das dem Hertzsprung-

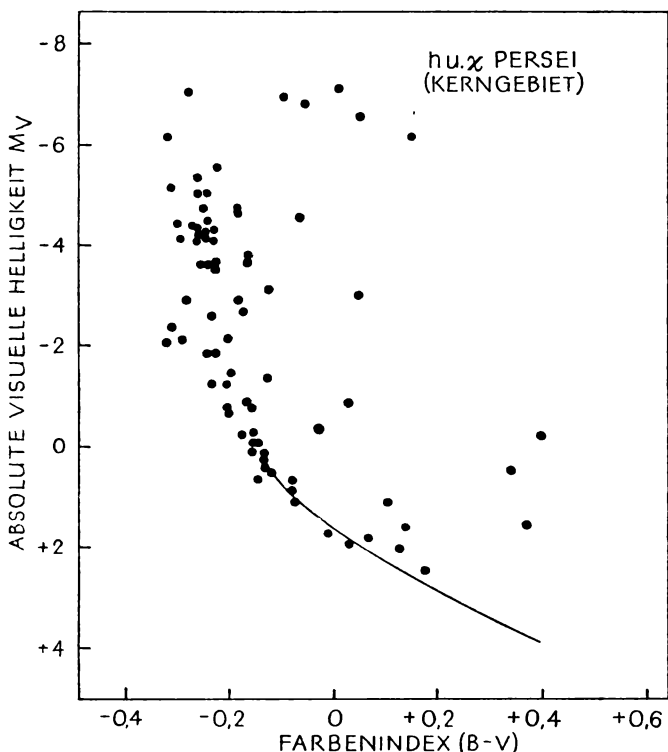


Abb. 16. Farben-Helligkeits-Diagramm der Zentralgebiete der beiden offenen Sternhaufen h und χ Persei. Die eingezeichnete Linie repräsentiert die Alter-Null-Hauptreihe. Die Haufen-Hauptreihe erstreckt sich bis zur absoluten Helligkeit $M_V \approx -7^m$. Einige der hellsten Sterne haben sich bereits von der Hauptreihe weg entwickelt. Die beiden Sternhaufen sind junge Objekte und haben ein Entwicklungsalter von etwa $1,5 \cdot 10^6$ Jahren.

Russell-Diagramm äquivalent ist, dargestellt. Die Abbildungen 16, 17 und 18 geben die Farben-Helligkeits-Diagramme von drei offenen Sternhaufen wieder. Ihr Aussehen scheint zunächst keine gemeinsamen Merkmale zu verraten, da die einzelnen Gebiete in den verschiedenen Diagrammen eine unterschiedliche Besetzung aufweisen. Bei einem genaueren Vergleich lassen sich jedoch die dichtbesetzten Gebiete der Farben-Helligkeits-Diagramme als Teile der Hauptreihe identifizieren, die offensichtlich für jeden Haufen unterschiedlich lang sind. Die Begrenzung der Haufenhauptreihen nach geringeren Helligkeiten wird nur durch die Beobachtungsmöglichkeiten verursacht, die von Haufen zu Haufen variieren können. Dagegen ist die unterschiedliche Erstreckung der Haufenhauptreihen in Richtung höherer Leuchtkräfte durch

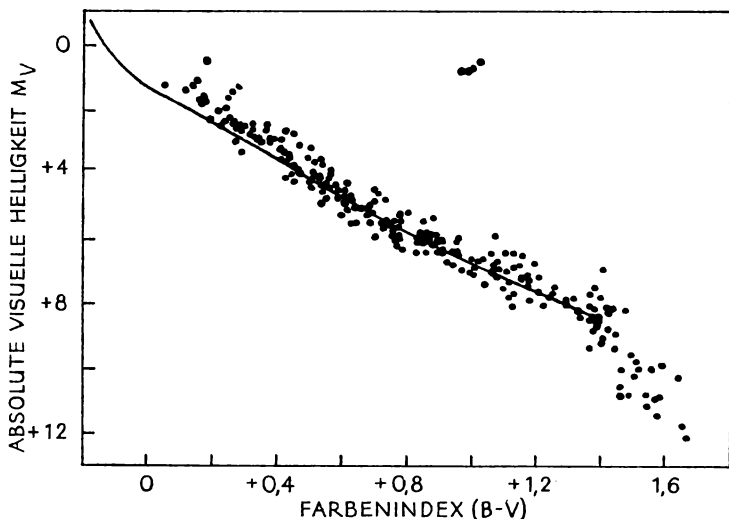


Abb. 17. Farben-Helligkeits-Diagramm der Hyaden, eines Sternhaufens im Sternbild Stier. Die deutlich ausgeprägte Hauptreihe bricht bei der Helligkeit $M_V \approx +1^m$ ab. Die hellsten Sterne haben sich bereits von der als Linie eingetragenen Alter-Null-Hauptreihe in Richtung auf den Riesenast weg entwickelt. Im Riesengebiet halten sich vier Sterne auf. Das Alter der Hyaden beträgt ungefähr $4 \cdot 10^8$ Jahre.

die Sternentwicklung bedingt. Wie aus Abbildung 16 hervorgeht, ist die Hauptreihe des Sternhaufens η und χ Persei bis zur absoluten Helligkeit $M_v \approx -7^m$ besetzt, während die gut ausgeprägte Hauptreihe der Hyadensterne (siehe Abb. 17) ziemlich abrupt bei $M_v \approx +1^m$ abbricht. Das ist ein Hinweis auf das unterschiedliche Entwicklungsalter beider Haufen. Nach den theoretischen Vorstellungen sind die Hyadensterne viel älter als die Mitglieder des Sternhaufens η und χ Persei. Die Farben-Helligkeits-Diagramme der einzelnen Sternhaufen

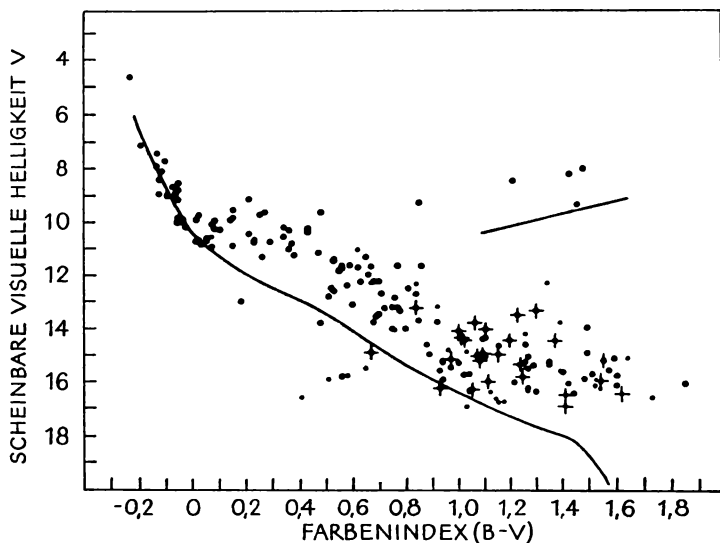


Abb. 18. Farben-Helligkeits-Diagramm des offenen Sternhaufens NGC 2264 im Sternbild Einhorn. Die Sterne mit Farbenindizes größer als $+0^m,1$ liegen neben der als Linie eingezeichneten Alter-Null-Hauptreihe. Die kurze Linie über ihr gibt die Lage des Riesenastes an.

Die Kreuze markieren Sterne, die einen Lichtwechsel vom Typ T Tauri zeigen und in deren Spektrum die Wasserstofflinie H_α in Emission auftritt. Einige Sterne halten sich im Riesengebiet auf. Die rechts von der Alter-Null-Hauptreihe liegenden Sterne befinden sich in den letzten Phasen des Kontraktionsstadiums. Die Sterne mit Farbenindizes kleiner als $0^m,1$ haben die Hauptreihe bereits erreicht. Das Alter des Sternhaufens beträgt ungefähr $1,5 \cdot 10^6$ Jahre.

lassen sich in ein gemeinsames schematisches Diagramm (siehe Abb. 19) umzeichnen. Dort ist eine Hauptreihe klar zu erkennen, die sich von den absolut hellsten Sternen von $M_v \approx -7^m$ bis zur absoluten Helligkeit $M_v \approx +8^m$ erstreckt. Die oberen Enden der individuellen Hauptreihen der verschiedenen Sternhaufen brechen bei unterschiedlichen absoluten Helligkeiten ab. Außerdem weichen die jeweils hellsten Sterne eines Haufens von einer bestimmten Helligkeit an von der zusammengesetzten Hauptreihe ab. Diese Objekte besitzen einen

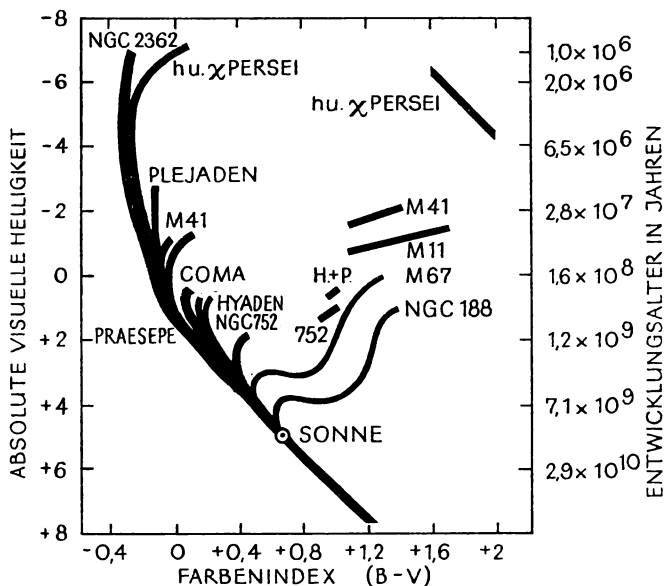


Abb. 19. Schematisches Farben-Helligkeits-Diagramm einiger offener Sternhaufen. Die Lage der Sonne auf der Hauptreihe ist durch einen Kreis markiert. Die individuellen Haufen-Hauptreihen enden wegen der unterschiedlichen Entwicklungsalter (rechte Skala) bei verschiedenen absoluten Helligkeiten (linke Skala). Die hellsten Sterne auf der Hauptreihe sind bereits in Richtung zum Riesenast von ihr abgewandert. Die Abweichungen sind am oberen Ende der Hauptreihe am größten. Einige Sternhaufen besitzen Sterne im Riesengebiet. Der jüngste abgebildete Sternhaufen ist NGC 2362 mit einem Entwicklungsalter von $1,0 \cdot 10^6$ Jahren, der älteste ist NGC 188 mit einem Alter von ungefähr $1 \cdot 10^{10}$ Jahren (nach A. Sandage).

anderen Spektraltyp bzw. Farbenindex, als man nach ihrer absoluten Helligkeit erwarten könnte.

Die aus den Sternen einer Reihe von Sternhaufen zusammengesetzte Hauptreihe kann als Gesamtheit der Örter im Farben-Helligkeits-Diagramm angesehen werden, auf der alle chemisch gleich aufgebauten Sterne liegen, die noch zu jung sind, um erkennbare Entwicklungseffekte zu zeigen. Diese Hauptreihe wird als „Alter-Null-Hauptreihe“ bezeichnet.

Beachtenswert ist die Tatsache, daß die individuellen Hauptreihen der einzelnen Sternhaufen an ihrem oberen Ende von der Hauptreihe mit dem Alter Null abweichen (siehe Abb. 19). Dort, wo die individuelle Haufenhauptreihe abbricht, ist die Abweichung jeweils am größten. Sie verkleinert sich aber beim Übergang zu geringen Helligkeiten, bis schließlich die individuelle Hauptreihe in die mit dem Alter Null einmündet. Gerade dieser Effekt ist aber nach den theoretischen Vorstellungen über die Sternentwicklung zu erwarten: Die massereichsten Sterne entwickeln sich am schnellsten und zeigen – wegen der Gleichaltrigkeit aller zu einem Sternhaufen gehörenden Sterne – die größten Entwicklungseffekte im Farben-Helligkeits-Diagramm. In der Regel gehören den Sternhaufen auch einige Riesensterne an, die sehr massereich sein dürften und deshalb die Hauptreihe schon verlassen haben.

Unterhalb des Einmündungspunktes der individuellen Haufenhauptreihen in die Alter-Null-Hauptreihe sind die Entwicklungseffekte noch nicht durch Beobachtungen nachweisbar, da die Entwicklungsgeschwindigkeit dieser Sterne relativ gering ist. Aus der Lage des Einmündungspunktes der Haufenhauptreihe in die Alter-Null-Hauptreihe läßt sich in Verbindung mit den theoretischen Ergebnissen der Sternentwicklung ein Maximalalter für die Sternhaufen ableiten.

Die jüngsten der in Abbildung 19 eingezeichneten Objekte sind die Sternhaufen NGC 2362 und η und χ Persei mit einem Entwicklungsalter von ungefähr $1,5 \cdot 10^6$ Jahren. Der älteste eingetragene Sternhaufen ist NGC 188 mit einem Entwicklungsalter von etwa $1 \cdot 10^{10}$ Jahren. Die Hertzsprung-Lücke ist in Abbildung 19 gut zu erkennen. Ihr Auftreten war zu erwarten, da die massereichen Sterne dieses Gebiet relativ rasch durch-

laufen. Die dafür benötigten Zeiten sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Lediglich bei masseärmeren Sternen geht die Entwicklung so langsam vor sich, daß eine „direkte Verbindung“ von der Hauptreihe zum Riesenast besteht.

Bei den theoretischen Untersuchungen über das Kontraktionsstadium der Sterne ergab sich, daß die Entwicklung zum Hauptreihenstern um so langsamer erfolgt, je geringer seine Masse ist. Es wäre daher nicht ausgeschlossen, bei den jüngsten Sternhaufen noch massearme Sterne im Kontraktionsstadium anzutreffen. Tatsächlich wurden bei einer geringen Anzahl sehr junger Sternhaufen (siehe Abb. 18) am unteren Ende ihrer Hauptreihen Objekte gefunden, die sich nicht dort aufhalten, wo die Hauptreihe mit dem Alter Null verläuft. Die Temperatur dieser Objekte ist geringer, als es ihrer absoluten Helligkeit entsprechen würde. Ferner ist in Abbildung 18 die Tendenz zu erkennen, daß sich die Sterne mit den geringsten Helligkeiten von der Alter-Null-Hauptreihe noch am weitesten entfernt befinden. Mit zunehmender Helligkeit nehmen die Abweichungen immer mehr ab, bis schließlich bei $V \approx 10$ das Einmünden in die Alter-Null-Hauptreihe erfolgt. Nach der sorgfältigen Prüfung des Beobachtungsmaterials dürfte feststehen, daß es sich bei diesen Sternen um Objekte handelt, die sich in der letzten Phase des Kontraktionsstadiums befinden. Die Tatsache, daß die massereicheren unter diesen Sternen näher an der Hauptreihe mit dem Alter Null liegen als die masseärmeren, kann als Bestätigung der grundsätzlichen Richtigkeit der Vorstellungen über das Kontraktionsstadium gewertet werden.

Aus dem Einmündungspunkt der kontrahierenden Sterne in die Alter-Null-Hauptreihe läßt sich mit Hilfe der theoretisch bestimmten Kontraktionszeiten ebenfalls ein Haufenalter ableiten. Es stimmt im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit mit dem aus dem oberen Abknickpunkt der Hauptreihe berechneten Maximalalter überein.

Unter den offensichtlich noch im Kontraktionsstadium befindlichen Sternen sind auffällig viele Veränderliche vom Typ T Tauri enthalten. Dieser Umstand weist auf eine Instabilität des Sternaufbaus in diesem Entwicklungsstadium hin. Auf

Grund der vorliegenden Erfahrungen hält man die T-Tauri- und RW- Aurigae-Sterne für sehr junge Objekte und den an ihnen beobachteten Lichtwechsel und andere Effekte für Begleiterscheinungen der letzten Phasen des Kontraktionsstadiums. Bei den gleichfalls zur Gruppe der jungen Veränderlichen gehörenden UV-Ceti-Sternen sind die Erhellungen von Strahlungsausbrüchen im Radiofrequenzgebiet begleitet.

Zu den extrem jungen Sterngruppen sind auch die sogenannten Assoziationen zu rechnen, auf deren kosmogonische Bedeutung zuerst W. A. Ambarzumjan in einigen grundlegenden Arbeiten aufmerksam machte. Als Assoziation bezeichnet man eine Gruppe von O- oder B-Sternen, die räumlich relativ weit voneinander entfernt sind, deren Raumgeschwindigkeiten im Rahmen der Beobachtungsgenauigkeit aber darauf hinweisen, daß sie früher einmal eng benachbart waren. Die Ausdehnung der Assoziationen kann bis 200 pc betragen. Das ist wesentlich mehr als der mittlere Durchmesser von offenen Sternhaufen, der bei ungefähr 10 pc liegt. Daraus wird verständlich, daß die Assoziationen am Himmel keine so auffälligen Objekte sind wie die offenen Sternhaufen.

Auch die T-Tauri-Sterne neigen zu der Tendenz, in Gruppen aufzutreten, die sich ebenso wie die O- und B-Assoziationen, meist in der Nachbarschaft von dichteren interstellaren Wolken aufhalten.

Aus dem vorhandenen Beobachtungsmaterial zog Ambarzumjan den Schluß, daß die O- und B-Sterne in Gruppen entstehen, die sich aber im Laufe der Zeit auflösen. Aus den gegenwärtigen Expansionsgeschwindigkeiten der Assoziationsmitglieder läßt sich unter der Voraussetzung, daß die Geschwindigkeit immer gleichgeblieben ist, der Zeitpunkt ihrer Entstehung bestimmen. Dabei ergibt sich für die Assoziationen ein Alter von etwa $1 \cdot 10^6$ Jahren, das mit dem aus der Theorie der Sternentwicklung berechneten Alter für diese absolut sehr hellen Sterne gut übereinstimmt.

Unter den bekannten O-Assoziationen scheint die im Sternbild Orion liegende nicht nur die jüngste, sondern auch die interessanteste zu sein. Der Hauptteil des aus einigen Untergruppen bestehenden Aggregats liegt in dem bekannten Orionnebel.

Ein Teil des dort konzentrierten Gases wird durch vier absolut sehr helle Sterne, die sogenannten Trapezsterne, zum Leuchten angeregt. Ein geringer Prozentsatz des vom Orionnebel ausgehenden Lichtes ist das an Staubpartikeln gestreute Sternlicht. Wie spektroskopische Untersuchungen ergaben, befinden sich die Gasmassen in rotierender Bewegung, der eine Expansion des gesamten Nebels überlagert zu sein scheint.

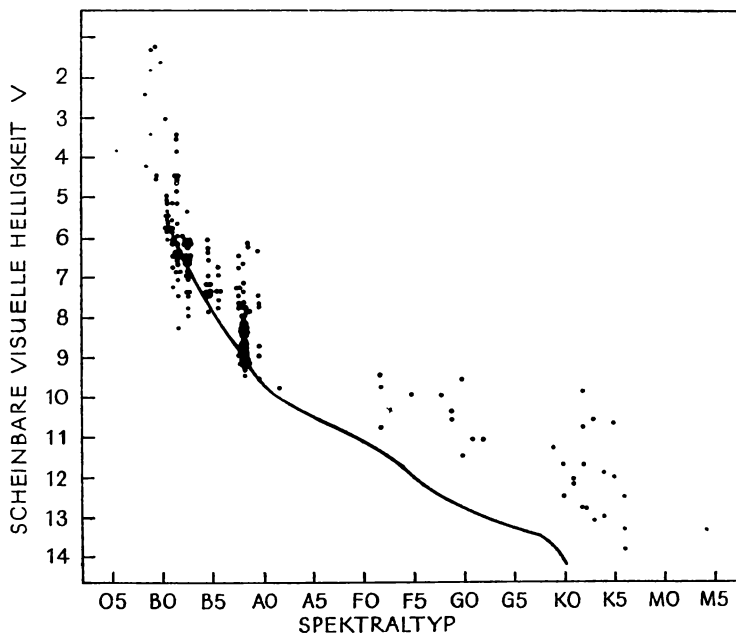


Abb. 20. Hertzsprung-Russell-Diagramm der Sterne der Orion-Assoziation. Die durchgezogene Linie gibt den Verlauf der Alter-Null-Hauptreihe an. Die Sterne mit Spektraltypen später als A5 liegen rechts von ihr und befinden sich noch im Kontraktionsstadium. Das Einmünden der jungen Sterne in diese Hauptreihe dürfte etwa beim Spektraltyp A2 erfolgen.

Das Hertzsprung-Russell-Diagramm der zur Orion-Assoziation gehörenden Sterne zeigt die Abbildung 20. Die Hauptreihe erstreckt sich vom Spektraltyp O9 bis zu etwa M5. Während die meisten Sterne mit Spektraltypen früher als A0 auf der

Alter-Null-Hauptreihe liegen, weichen die Sterne vom Spektraltyp F3 und später erheblich von ihr ab. Da keine Sterne mit Spektraltypen zwischen A0 und F0 gefunden wurden, läßt sich nur vermuten, daß das Einmünden der Sterne der „Orion-Hauptreihe“ in die mit dem Alter Null ungefähr bei A2 erfolgt. Alle Sterne späteren Spektraltyps befänden sich demnach noch im Kontraktionsstadium.

Die sehr sorgfältige und in einigen Fällen durch eine kinematische Methode ergänzte Altersbestimmung der Orion-Assoziation führte zu einem überraschenden Ergebnis. Aus den kinematischen Untersuchungen wurde für die vier Trapezsterne ein Alter von etwa $1,5 \cdot 10^4$ Jahren abgeleitet, während sich für die um den Orionnebel verteilten Sterne übereinstimmend ein Alter von $3 \cdot 10^5$ bis $5 \cdot 10^5$ Jahren ergibt. Das Alter der im Gebiet der „Gürtel“sterne liegenden Objekte beträgt dagegen ungefähr $5 \cdot 10^6$ Jahre.

Diesen Ergebnissen zufolge müssen wir in der Orion-Assoziation drei zeitlich auseinanderliegende Epochen von Sternneubildungen unterscheiden. Der im wesentlichen von den absolut hellen Trapezsternen zum Leuchten angeregte Orionnebel kann somit auch nicht viel älter sein als etwa $1 \cdot 10^4$ Jahre. Das außerordentlich interessante Resultat bringt auch zum Ausdruck, daß vor den Augen von vielen Generationen unserer Vorfahren – wenn auch sicher von ihnen unbeachtet – tatsächlich eine Gruppe von Sternen entstanden ist.

Seit wenigen Jahren stehen für astronomische Beobachtungen neuartige lichtelektrische Empfänger zur Verfügung, mit denen im fernen Infrarot, im Wellenlängenbereich von 2,0 bis $20 \mu\text{m}$, beobachtet werden kann. Dort hat die Erdatmosphäre noch schmale Durchlaßfenster für die extraterrestrische Strahlung. Bei diesen Untersuchungen gelang die Entdeckung von Objekten, deren spektrale Energieverteilung der eines schwarzen Körpers mit einer Temperatur von ungefähr 700 bis 1000°K entspricht. Die Zahl der Infrarot„sterne“ beträgt zur Zeit etwa 5000, dürfte aber noch anwachsen, da noch nicht der gesamte Himmel systematisch nach ihnen abgesehen wurde. Inzwischen wurden einige der Infrarotobjekte als langperiodische Mira-Veränderliche identifiziert.

Kürzlich gelang der Nachweis eines derartigen Infrarotobjektes im Gebiet des Orionnebels. In einer breiten Diskussion des Beobachtungsmaterials konnte mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, daß das Objekt ein normaler, aber räumlich hinter dem Nebel stehender Stern ist. Dagegen spricht nur sehr wenig gegen die Annahme, daß sich das Infrarotobjekt im Orionnebel befindet. Da der Orionnebel einer extrem jungen Assoziation angehört, ist die Wahrscheinlichkeit, dort einen Stern im Kontraktionsstadium anzutreffen, relativ hoch. Deshalb wäre es möglich, daß dieses Infrarotobjekt ein kontrahierender Protostern ist. Sein Alter würde in diesem Falle etwa 10^5 bis 10^3 Jahre betragen und sich somit in guter Übereinstimmung mit dem Alter des Orionnebels befinden.

Zur Zeit gibt es noch keine sicheren statistischen Aussagen darüber, wieviel Prozent der Infrarotsterne junge Objekte sind und wieviel Sterne sich in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium befinden. Auf jeden Fall sind alle Infrarotsterne Objekte, die großes Interesse beanspruchen.

Die massereichen Sterne kreuzen im Riesenstadium nach den theoretischen Berechnungen zum Teil mehrmals das Gebiet im Hertzsprung-Russell-Diagramm, in dem sich die Delta-Cephei-Sterne aufhalten (siehe Abb. 21). Dabei wird ihr innerer Aufbau anfällig gegen kleine Störungen, und die Sterne beginnen zu pulsieren. Es bietet sich deshalb die Möglichkeit, die beobachtete Perioden-Helligkeits-Beziehung und auch die festgestellte Häufigkeitsverteilung der Perioden der Delta-Cephei-Sterne mit den sich aus der Theorie ergebenden Werten zu vergleichen. Aus den Berechnungen sind die Masse und die Leuchtkraft der Sternmodelle zur Zeit ihres Durchganges durch den Instabilitätsstreifen bekannt, und die Pulsationsperiode läßt sich aus den Stabilitätsberechnungen ableiten. Damit kann eine theoretische Perioden-Helligkeits-Beziehung aufgestellt werden. Aus den ebenfalls bekannten Durchgangszeiten der Sternmodelle durch das Gebiet der Delta-Cephei-Sterne lassen sich die zu erwartenden Häufigkeiten der Perioden bestimmen, wenn über die Massenverteilung auf der Hauptreihe Annahmen gemacht werden.

Die Entwicklungsberechnungen ergaben, daß bei einer Änderung der chemischen Zusammensetzung der Sternmaterie unterschiedlich lange Schleifen im Riesenast des Hertzsprung-Russell-Diagramms durchlaufen werden. Daraus folgen wiederum ganz unterschiedliche Aussagen über die Eigenschaften der Cepheiden.

Legt man eine chemische Zusammensetzung der Sternmaterie zugrunde, die der extremen Population I entspricht (60% Wasserstoff, 35,6% Helium und 4,4% schwere Elemente), so können die wichtigsten Beobachtungsdaten, der Nullpunkt und die Steigung der Perioden-Helligkeits-Beziehung (siehe

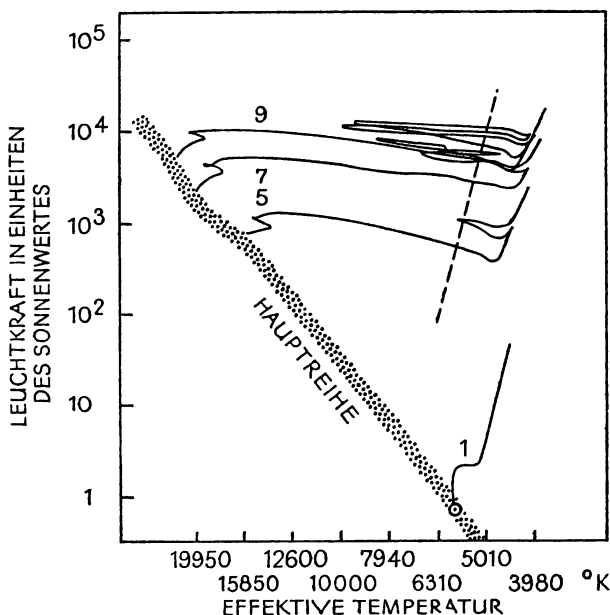


Abb. 21. Entwicklungswege massereicher Sterne mit einer chemischen Zusammensetzung, die typisch für die extreme Population I ist. Die Zahlen geben die Massen der Sterne in Einheiten des Sonnenwertes an. Die gestrichelte Gerade verbindet die Punkte, in denen die Sternmodelle besonders anfällig gegen Pulsationsinstabilitäten sind (nach R. Kippenhahn).

Abb. 22), die Periodenhäufigkeit und die Abhängigkeit der Periodenänderungen von der Periode des Lichtwechsels, mit Hilfe der Theorie erklärt werden.

Eine ziemlich eindrucksvolle Bestätigung der prinzipiellen Richtigkeit der berechneten Entwicklungswege der massereichen Sterne im Gebiet des Riesenastes stellt der in Abbildung 23 gezeigte Teil des Farben-Helligkeits-Diagramms von

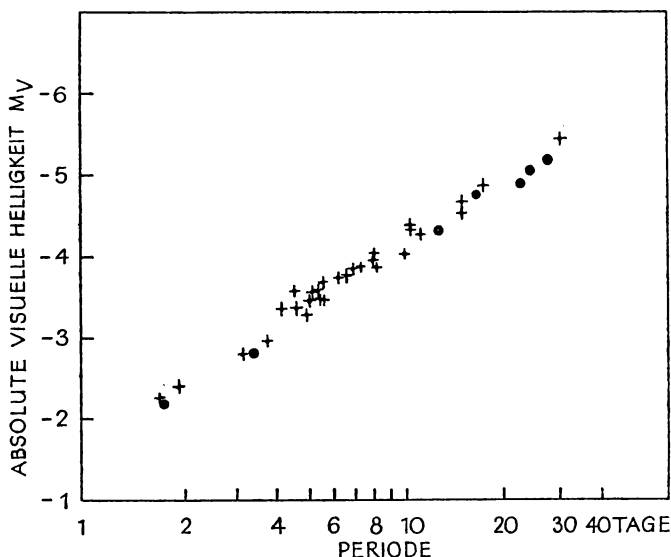


Abb. 22. Perioden-Helligkeits-Beziehung der Delta-Cephei-Sterne. Die Kreuze symbolisieren die beobachteten Werte, die Kreise die theoretisch berechneten für Sternmodelle, deren chemische Zusammensetzung typisch für die Population-I-Sterne ist. Die Übereinstimmung der Modellrechnung mit den Beobachtungen ist gut (nach E. Hofmeister).

dem sternreichen offenen Sternhaufen NGC 1866 dar, der sich in der Großen Magellanschen Wolke befindet und ein Entwicklungsalter von weniger als 10^8 Jahren hat. Im Riesenast sind die roten Riesensterne und die Delta-Cephei-Sterne gerade so verteilt, wie es dem Entwicklungsweg eines Sterns von 5 Sonnenmassen entsprechen würde. Allerdings verbleibt noch

eine gewisse Willkür bei der Verbindung der einzelnen Punkte im Farben-Helligkeits-Diagramm durch einen Entwicklungsweg (vgl. Abb. 24). Davon bleibt aber die Aussage unberührt, daß die massereichen Sterne während ihrer Entwicklung als Riesensterne Schleifen im Hertzsprung-Russell-Diagramm durchlaufen. Die Lage der Delta-Cephei-Sterne im Farben-Helligkeits-Diagramm deckt sich fast genau mit dem theoretisch berechneten Instabilitätsstreifen.

Bei der zum Vergleich erforderlichen Umrechnung der Beobachtungswerte in absolute Helligkeiten traten Differenzen mit

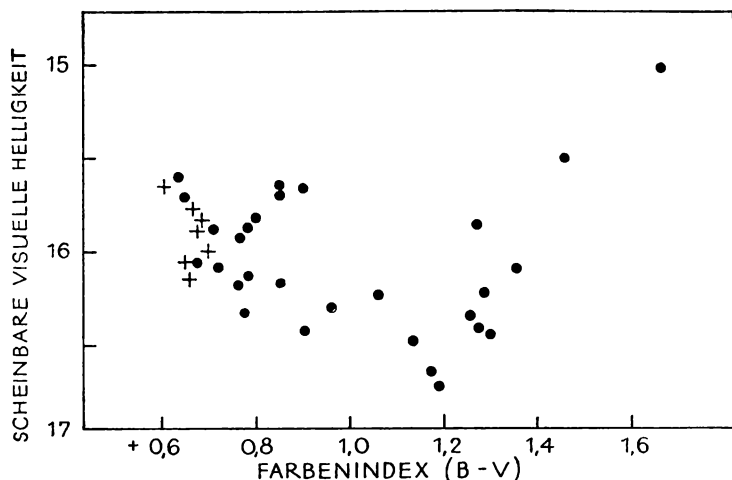


Abb. 23. Ausschnitt aus dem Farben-Helligkeits-Diagramm des massereichen offenen Sternhaufens NGC 1866, der die Verteilung der Sterne im Riesenast zeigt. Die Punkte repräsentieren normale Sterne, die Kreuze kennzeichnen die in dem Haufen gefundenen Delta-Cephei-Sterne.

den theoretischen Ergebnissen auf. Sie dürften aus der Unsicherheit der dabei benötigten bolometrischen Korrekturen zu erklären sein und nicht allein an den Mängeln in der Theorie der Sternentwicklung liegen.

Die berechneten Häufigkeiten der Perioden bei den Delta-Cephei-Sternen stimmen in einigen Fällen gut mit den Beob-

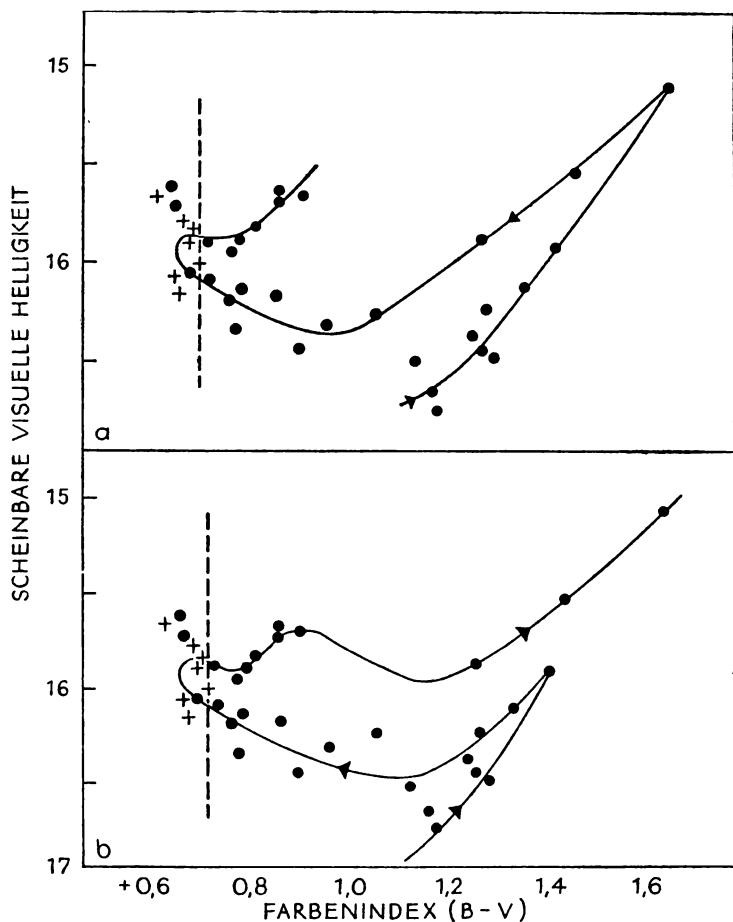


Abb. 24. Farben-Helligkeits-Diagramm des Riesenastes des Sternhaufens NGC 1866 mit eingezeichneten möglichen Entwicklungswegen. Die theoretisch zu erwartende Lage der Pulsationsveränderlichen kennzeichnet die gestrichelte Linie. Die Übereinstimmung mit der beobachteten Position der Veränderlichen ist sehr gut. Die Form der eingetragenen Entwicklungswege stimmt ebenfalls gut mit den theoretisch berechneten Schleifen überein, die ein Stern mit 5 Sonnenmassen im Farben-Helligkeits-Diagramm durchläuft.

achtungen überein. Jedoch liegen die beobachteten Maxima der Häufigkeitsverteilung von verschiedenen Objektgruppen, z. B. von Sternen der Sonnenumgebung, des nördlichen Teils der Milchstraße, der Kleinen Magellanschen Wolke, nicht bei der gleichen Periode. Das Maximum der Periodenhäufigkeit wird jeweils dann erreicht, wenn der Endpunkt der Schleife des Entwicklungsweges im Hertzsprung-Russell-Diagramm gerade im Instabilitätsstreifen liegt. Die Länge der Streifen hängt aber von der chemischen Zusammensetzung der Sternmaterie ab. Man könnte daher vermuten, daß ein unterschiedlich hoher Gehalt an Metallen oder an Helium in den Sternen der untersuchten Milchstraßengegend und der Kleinen Magellanschen Wolke zu der Verlagerung des beobachteten Maximums der Periodenhäufigkeit geführt hat.

Die theoretisch abgeleiteten Periodenänderungen der Delta-Cephei-Sterne stimmen mit den Beobachtungen sehr gut überein, wenn man die „langsamen“ Durchgänge durch den Instabilitätsstreifen betrachtet. Dagegen weichen die theoretischen Ergebnisse für die „schnellen“ Passagen der Sternmodelle durch den Instabilitätsstreifen recht erheblich von den Beobachtungen ab. Aus den nachgewiesenen Verkürzungen und Verlängerungen der Perioden darf gefolgert werden, daß die Entwicklungswege der massereichen Sterne im Riesengebiet des Hertzsprung-Russell-Diagramms Schleifen aufweisen müssen. Hierauf deutete auch schon die Verteilung der Riesensterne im Farben-Helligkeits-Diagramm des Sternhaufens NGC 1866 hin.

Im Jahre 1967 gelang A. Hewish und seinen Mitarbeitern bei radioastronomischen Beobachtungen die Entdeckung einer neuartigen Radioquelle. Auf den Registrierungen der Empfangsanlage, die eigentlich der Untersuchung der Szintillation des interplanetaren Plasmas dienten — einer der optischen Szintillation der Erdatmosphäre verwandten Erscheinung — fanden sich zusätzliche Radioimpulse, die aus einer bestimmten Richtung am Himmel kamen. Charakteristisch für die Radiosignale war ihre Kurzzeitigkeit und ihre Periodizität. Entsprechend dem Impulscharakter der Radiostrahlung bezeichnete man den dafür verantwortlichen Radiostrahler als

pulsierende Radioquelle oder kurz als Pulsar. Durch die in der Folgezeit einsetzende Suche nach weiteren Pulsaren ist ihre Anzahl inzwischen auf über 70 angestiegen. Die für die Pulsare verwendeten Bezeichnungen bestehen aus einer Buchstabengruppe, die sich aus dem Anfangsbuchstaben des Entdeckungsobservatoriums und dem P von Pulsar zusammensetzt, und einer Zifferngruppe, die die Lage der Pulsare am Himmel angibt.

Die bisher festgestellten Perioden liegen zwischen 0,03 und 3,7 Sekunden. Über ein Dutzend der Pulsare zeigen geringfügige Periodenänderungen. Die Intensität der Radiopulse fällt in Richtung hoher Frequenzen stark ab; außerdem ist die Radiostrahlung teils zirkular, teils linear polarisiert.

Unter den zur Erklärung des Pulsarphänomens vorgeschlagenen Modellen mißt man zur Zeit der Neutronenstern-Hypothese die größte Wahrscheinlichkeit bei. Auf die Möglichkeit der Bildung von Neutronensternen im Verlauf von Supernova-Explosionen machten W. Baade und F. Zwicky bereits in den 30er Jahren aufmerksam.

Nach den bestehenden Vorstellungen ist in der überdichten Materie der Neutronensterne ein Magnetfeld „eingefroren“, dessen Pole nicht mit der Rotationsachse des Sternes zusammenfallen. Längs der Feldlinien bewegen sich freie Elektronen in engen Schraubenlinien, und die Energieabstrahlung erfolgt entsprechend den Eigentümlichkeiten des Synchrotronmechanismus in einen engen Kegel in Bewegungsrichtung der Elektronen in den Weltraum. Daneben gibt es noch einen Anteil der Strahlung, der thermischen Ursprungs ist. Falls der Neutronenstern mit einer passenden Orientierung seiner Achse rotiert, fegt mit seiner Umlauffrequenz der Strahlenkegel der Synchrotronstrahlung über die Erde hinweg; ein Vorgang, der der Wirkungsweise eines Leuchtturmes ähnelt. Da die Rotationsachsen der Pulsare sicher keine bevorzugte räumliche Orientierung haben, ist von der Gesamtheit der existierenden Pulsare nur ein Bruchteil – man schätzt ihn auf etwa 10% – von der Erde aus wahrzunehmen.

Die erste optische Identifizierung eines Pulsars gelang 1969 im Fall des Krebsnebelpulsars NP 0532 (U. S. Naval Obs. 05^h 32^m).

Mit einer elektronisch gesteuerten lichtelektrischen Meßapparatur wurde im Rhythmus der Radiopulse in bestimmten, vorher ausgewählten Phasen durch Summation über viele Perioden hinweg die optische Helligkeit des Objektes bestimmt, das in Richtung auf die Position des Pulsars vermutet wurde. Dabei ergab sich, daß einer der zentral im Nebel gelegenen Sterne, von dem man schon lange annimmt, daß er der Supernova-Überrest ist, Lichtpulse der gleichen Periode emittiert. Auf normalen photographischen Aufnahmen wäre ihr Nachweis wegen der Kürze der Periode (0,03 s) nicht möglich. Das optische Spektrum des Pulsars ist ungewöhnlich; es läßt nur ein Kontinuum erkennen. Vom Krebsnebelpulsar gehen außerdem Pulse im Bereich der Gamma- und Röntgenstrahlung aus. Außerdem wurden bei entsprechenden Messungen im Weltraum noch andere pulsierende Röntgenquellen entdeckt.

Die Pulsare weisen eine räumliche Konzentration zur galaktischen Ebene auf. Diese Eigenschaft spricht dafür, daß sie ehemals massereiche Sterne der Population I waren, die einen Gravitationskollaps erlitten haben und nun noch als Neutronensterne existieren.

Für die weitere Ausarbeitung der Pulsarhypothese und der damit zusammenhängenden Probleme ist die genaue Kenntnis des Supernova-Ausbruchs im Sternbild Stier von großer Bedeutung. Es spricht vieles dafür, daß die Pulsare eine von der Theorie der Sternentwicklung vermutete Endphase in der Entwicklung massereicher Sterne repräsentieren.

Die Gegenüberstellung der beobachteten mit den theoretischen Daten ergab eine zum Teil überraschende Übereinstimmung, die als eine Bestätigung der prinzipiellen Richtigkeit der kosmogonischen Vorstellungen zu werten ist. Es darf allerdings nicht übersehen werden, daß einige Probleme der Sternentwicklung noch sehr unklar sind.

Ein allgemeineres Problem, das mit der Sternentstehung in enger Verbindung steht, soll nun noch berührt werden. Es geht dabei um die Frage, ob in der Galaxis die Rate der Sternentstehung, d. h. die Zahl der in einem Zeitintervall gebildeten Sterne, zeitlichen Änderungen unterworfen war oder nicht.

Die Beantwortung der Frage wird unter der Voraussetzung erfolgen, daß die Sterne aus einem verdünnten Gas „kondensierten“.

Aus Untersuchungen an jungen offenen Sternhaufen ist zu entnehmen, daß in ihnen nur jeweils ganz wenige Sterne mit hohen Leuchtkräften enthalten sind. Beim Übergang zu schwächeren Leuchtkräften wächst dagegen die Zahl der Haufensterne stark an. Unter Berücksichtigung der Masse-Leuchtkraft-Beziehung läßt sich daher feststellen, daß bedeutend mehr Sterne mit kleineren Massen entstehen als massereiche Objekte. Andere Betrachtungen ergaben, daß die Verweilzeiten der Sterne auf der Hauptreihe mit abnehmender Masse immer größer werden (siehe Tab. 3). Dadurch befinden sich die masseärmeren Sterne immer noch auf der Hauptreihe, während die gleichzeitig mit ihnen entstandenen, aber massereichen Objekte schon ein fortgeschrittenes Entwicklungsstadium erreicht haben. Falls sich aus dem interstellaren Medium eine neue Sterngeneration bildet, wird sich der Prozeß in gleicher Weise wiederholen.

Die notwendige Folge davon ist eine im Laufe der Zeit zunehmende Konzentration von Materie in massearmen Sternen. Das in ihnen gebundene Material steht aber für sehr lange Zeiträume zur Neubildung von Sternen nicht mehr zur Verfügung. Auch die in den weißen Zwergen und schwarzen Löchern enthaltene Materie ist dort für eine praktisch unbegrenzte Zeitdauer „gefangen“. Nach vorsichtigen Schätzungen könnte in der Sonnenumgebung der Prozentsatz der in den weißen Zwergen vereinigten Masse bis zu 50% der Gesamtmasse betragen.

Nimmt man an, daß im Milchstraßensystem keine „Neubildung“ von Materie erfolgt, so ergeben einschlägige Überlegungen, daß die Rate der Sternentstehung vor etwa $5 \cdot 10^9$ Jahren merklich größer war als jetzt. Wie entsprechende Beobachtungsdaten nahelegen, gibt es aber auch gegenwärtig in der Galaxis noch Örter, an denen Sterne entstehen.

Das Interesse an der Klärung der Frage nach der Entstehung der chemischen Elemente ist in den letzten Jahren stark angewachsen. Den Anstoß zu derartigen Untersuchungen gab nicht allein die Erkenntnis, daß die älteren Sterne offensichtlich aus einem Material aufgebaut sind, das eine geringere Metallhäufigkeit besitzt als der „Baustoff“ der jüngeren Sterne, sondern auch die Tatsache, daß nach den als gesichert geltenden Vorstellungen über die Energiefreisetzungsmechanismen im Sterninnern fortwährend Elementumwandlungen stattfinden müssen.

Unser Wissen über die chemische Zusammensetzung der Sternmaterie beruht auf spektroskopischen Untersuchungen der Sternatmosphären, die von der Erde aus gemacht wurden. Bei diesen Beobachtungsverfahren ist jedoch nur ein beschränkter Teil des Gesamtspektrums zugänglich, während eine große Anzahl von Spektrallinien verschiedener Elemente nicht erfaßt werden kann. Zu diesen Elementen gehört auch das Helium, dessen Linien nur zum Teil der Beobachtung zugänglich sind. Daher ist die Bestimmung der Heliumhäufigkeit mit besonderen Schwierigkeiten verbunden und die Genauigkeit der Ergebnisse nicht sehr hoch. Diese Tatsache ist insofern von Bedeutung, als das Helium das zweithäufigste Element nach dem Wasserstoff ist und außerdem eine bedeutende Rolle in der Frühphase der Entwicklung des Weltalls gespielt haben könnte.

Die Interpretation der aus der Spektralanalyse abgeleiteten Häufigkeitsverteilung der Elemente erfolgt unter der Voraussetzung, daß die in den Sternatmosphären beobachtete chemische Zusammensetzung der Sternmaterie noch charakteristisch ist für den ursprünglichen Zustand der Materie im Zeitabschnitt der Sternbildung. An sich ist diese Annahme nicht selbstverständlich, da erst einmal gezeigt werden müßte, daß im Sterninnern keine durch den gesamten Stern reichende Konvektionszone existiert, die für eine Durchmischung der Sternmaterie sorgen würde. Aus den vorliegenden Berechnungen über die Sternentwicklung ist zu entnehmen, daß eine

derartige Konvektionszone sicherlich nicht besteht. Deshalb erscheint die Anreicherung der Sternatmosphären mit schwereren Elementen aus den mittelpunktsnahen Bereichen der Sterne unwahrscheinlich. Allerdings könnten diese Veränderungen auch durch einen äußeren Prozeß bewirkt werden. Bei dem im allgemeinen als „Accretion“ (engl.: Zuwachs) bezeichneten Vorgang „sammelt“ der Stern beim Durchlaufen interstellarer Wolken Materie auf. Die Effektivität dieses Prozesses ist jedoch außerordentlich eingeschränkt. Abschätzungen ergaben, daß gerade für die alten Sterne der Population II sehr ungünstige Verhältnisse bestehen. Diese Sterne zeigen in der Regel eine große Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur galaktischen Ebene, in der die interstellaren Wolken konzentriert sind. Infolge ihrer sehr hohen Geschwindigkeit durchdringen die Population-II-Sterne die galaktische Ebene sehr rasch, und die Materieaufnahme ist verhältnismäßig unergiebig, weil nur bei geringen Relativgeschwindigkeiten zwischen den Wolken und den Sternen Materie in nennenswerter Menge aufgesammelt wird.

Man kann daher als Ergebnis der vorstehenden Diskussion feststellen, daß die beobachtete chemische Zusammensetzung der Sternatmosphären noch weitgehend die gleiche sein dürfte wie zu der Zeit, als die Sterne entstanden. Daraus folgt aber weiter, daß die chemische Zusammensetzung der prästellaren Materie sich im Laufe der Zeit verändert haben muß, wie die quantitative Spektralanalyse verschieden alter Sterne erkennen läßt. Der ermittelte Gehalt der Sternmaterie an Helium und noch schwereren Elementen ist jedoch recht hoch, so daß es fraglich ist, ob er allein aus Kernprozessen im Sterninnern hervorgegangen ist, wenn man an den Anfang der Entwicklung einen reinen Wasserstoffnebel setzt. Viel wahrscheinlicher ist nach neueren Untersuchungen, daß ein Teil des Heliums und der schwereren Elemente bereits bei der Bildung der ersten Sterngeneration in unserer Galaxis vorhanden war. Wir berühren mit diesem Problem kosmologische Fragen zum Frühstadium des Weltalls in unserer Entwicklungsepoche.

Nach den modernen kosmologischen Hypothesen besaß der Kosmos vor etwa $15 \cdot 10^9$ Jahren viel kleinere Abmessungen,

und in ihm herrschten sehr hohe Temperaturen von mehr als $10 \cdot 10^9$ Grad. Die zunächst explosiv erfolgende Expansion führte zu einer Abkühlung des Kosmos. Beim Übergang des vorwiegend mit Strahlung erfüllten Raumes in das gegenwärtig existierende und hauptsächlich aus Elementarteilchen mit Ruhemasse bestehende Weltall wurde gleichfalls vor etwa $15 \cdot 10^9$ Jahren die erste kosmische Häufigkeitsverteilung der chemischen Elemente hervorgebracht. Insbesondere stellte sich dabei das Häufigkeitsverhältnis von Wasserstoff zu Helium ein.

Die gerade angedeutete kosmologische Hypothese wurde unter diesem astrophysikalischen Aspekt bereits vor mehr als 20 Jahren diskutiert und unter der etwas irreführenden Bezeichnung „Urknall“-Hypothese bekannt. Eine wesentliche Stütze für sie bestand in der als Hubble-Effekt bekannten Beobachtungstatsache, nach der sich die wahrnehmbaren Sternsysteme fast ausnahmslos vom Milchstraßensystem entfernen, und zwar mit Geschwindigkeiten, die um so größer sind, je weiter die Galaxien entfernt sind. Eine formale Extrapolation dieses Beobachtungsbefundes in die Vergangenheit führte zu dem Ergebnis, daß vor mehr als 10^{10} Jahren alle Sternsysteme noch in einem engen Raum vereinigt gewesen sein mußten. Es ist einzusehen, daß bei der Annahme der Richtigkeit dieser Hypothese im „Anfangspunkt“ einer derartigen Entwicklung mit ungewöhnlichen physikalischen Bedingungen zu rechnen ist.

Vor wenigen Jahren gelang auf radioastronomischem Gebiet eine wichtige Entdeckung, die übrigens theoretisch vorausgesagt wurde und die ebenfalls für die „Urknall“-Hypothese spricht. Bei der Trennung der von verschiedenen Radioquellen (diskreten Radiostrahlern im Milchstraßensystem, interstellarer Materie, extragalaktischen Systemen usw.) emittierten Strahlung in die einzelnen Anteile fand man eine Restkomponente, für die sich die obengenannten Objekte nicht verantwortlich machen ließen. Eine genauere Untersuchung der Reststrahlung ergab, daß sie wahrscheinlich aus allen Richtungen mit gleicher Intensität kommt und zeitlich konstant ist. Ihre spektrale Energieverteilung entspricht einem schwarzen Strahler mit einer Temperatur von 3°K . Die Existenz dieser Strahlung kann als Hinweis auf einen früheren heißen Zustand

des Weltalls aufgefaßt werden, in dem Temperaturen um $1 \cdot 10^{13}$ °K herrschten. Im Verlauf der daran anschließenden Expansion des Kosmos und seiner Abkühlung ist die Temperatur der Hohlraumstrahlung gegenwärtig bei 3 °K angelangt.

Auf die speziellen kosmologischen Probleme soll hier nicht weiter eingegangen werden. Es erscheint aber der Hinweis angebracht, daß die erforderlichen Berechnungen auf der Grundlage der bisher bekannten Naturgesetze um so unsicherer werden, je extremer die physikalischen Bedingungen sind. Und wenn in diesem Zusammenhang vom „Anfang“ des Universums die Rede war, dann ist das nicht im Sinne eines Schöpfungsaktes zu verstehen; vielmehr handelt es sich hierbei um den Anfang eines neuen Abschnitts in der Entwicklung des Weltalls.

Die vorwiegend aus Untersuchungen an frühen Hauptreihensternen, leuchtenden Gasnebeln und B-Sternen der Population II abgeleitete kosmische Elementenhäufigkeit zeigte, daß der Wasserstoff mit etwa 63 Massenprozent das verbreitetste Element ist. Das zweithäufigste Element ist das Helium, dessen Massenanteil an der Sternmaterie ungefähr 36% beträgt. Entsprechend den vorgegebenen, in die Berechnung der Häufigkeit eingehenden physikalischen Bedingungen stellt der Betrag eine obere Grenze der Heliumhäufigkeit dar. Die zu einer gemeinsamen Gruppe zusammengefaßten restlichen Elemente tragen ungefähr 1% zur Gesamtmasse der Materie bei. Wegen der bereits erwähnten Schwierigkeiten bei der spektroskopischen Untersuchung des Heliums sind die bei diesem Element gefundenen Häufigkeiten noch sehr unsicher. Daher wurde auf einem völlig anderen Wege der Massenanteil des Heliums bei Berechnungen über die Sternentwicklung abgeschätzt. Es zeigt sich, daß die berechneten Entwicklungswege nur dann mit den beobachteten übereinstimmen, wenn die Sternmaterie, aus der die Modelle aufgebaut sein sollen, zu etwa 30 Massenprozent aus Helium besteht.

Die Diskussion über den Heliumgehalt der Materie ist noch in vollem Gange, zumal in letzter Zeit einige alte B-Sterne gefunden wurden, deren Heliumgehalt auffällig gering ist. Die auf den ersten Blick paradox erscheinende Behauptung, daß es „alte B-Sterne“ gibt, kommt daher, daß diese Sterne zur Po-

pulation II gehören — sie befinden sich am linken Ende des horizontalen Riesenastes im Hertzsprung-Russell-Diagramm (siehe Abb. 9). Ihnen muß deshalb ein hohes Alter zugeordnet werden. Vielleicht war das prästellare Material, aus dem sich die Sterne bildeten, nicht chemisch homogen. Die Lösung dieser und anderer Fragen steht noch aus.

Nach all dem, was man über die Möglichkeiten der Bildung von Helium und der noch schwereren Elemente weiß, dürften zumindest bei Helium die beobachteten Anteile wahrscheinlich nicht allein aus Kernprozessen im Sterninnern hervorgegangen sein, sondern zum Teil einen Ursprung besitzen, der mit der frühen Geschichte in unserer Entwicklungsepoche des Weltalls verknüpft ist.

Eine verhältnismäßig weit ausgearbeitete Theorie über die Bildung der chemischen Elemente im Sterninnern legten vor einigen Jahren die Astrophysiker G. Burbidge, M. Burbidge, W. A. Fowler und F. Hoyle vor. Diese Autoren bringen die Entstehung der Elemente in direkten Zusammenhang mit den Vorgängen bei der Sternentwicklung.

Wie in den vorangegangenen Abschnitten schon mehrmals dargelegt wurde, decken die Sterne ihren Energiebedarf während der zeitlich am längsten dauerenden Entwicklungsstadien aus Kernfusionen. Bei den Hauptreihensternen laufen Wasserstoffprozesse entsprechend der beiden möglichen Reaktionsfolgen und der Nebenreaktionen ab, bis sie wegen vollständigen Verbrauches des Wasserstoffes aufhören. In dieser Entwicklungsphase kommt es zu einer radikalen Veränderung des Zustandes des Sterns. Während sich der Stern als Ganzes vergrößert, zu einem roten Riesen entwickelt, erhöht sich gleichzeitig infolge Kontraktion des Heliumkerns in seinem Innern die Temperatur. Wenn sie dabei bis auf ungefähr $8 \cdot 10^7$ °K angestiegen ist, setzt der sogenannte Salpeter-Prozeß ein, bei dem aus Helium unter Energiefreisetzung Kohlenstoff gebildet wird.

In der von den vier genannten Autoren ausgearbeiteten Theorie wird die Möglichkeit weiterer Kernreaktionen diskutiert, die zum Aufbau noch schwererer Elemente als Kohlenstoff führen. Mit dieser Theorie verlegen G. Burbidge, M. Burbidge, Fowler und Hoyle wesentliche Prozesse der Elementen-Ent-

stehung in das Innere der Sterne, wo die mit der Sternentwicklung zusammenhängenden Zustandsänderungen den stufenweisen Aufbau von schwereren Elementen aus leichteren verursachen.

Von einer allgemeinen Theorie der Bildung der Elemente for-

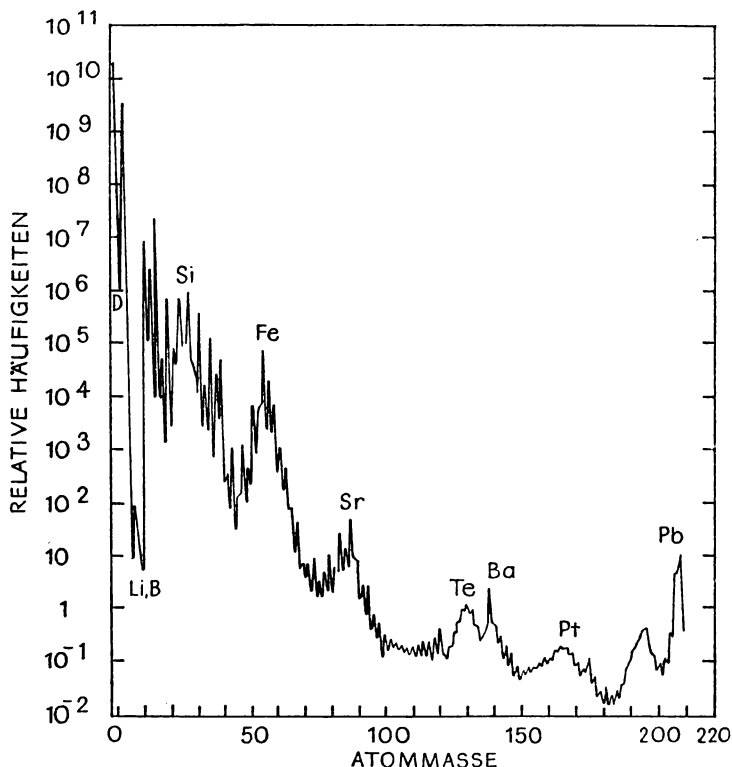


Abb. 25. Häufigkeitsverteilung der chemischen Elemente, geordnet nach der Massenzahl. Die angegebenen Zahlen beziehen sich auf 10^6 Siliziumatome. Beim Übergang von den leichteren zu den schwereren Elementen sinkt die Häufigkeit außerordentlich rasch ab. Auffällig sind in der Kurve die geringen Häufigkeiten von Deuterium (D), Lithium (Li), Beryllium (Be) und Bor (B) und die relativ großen Häufigkeiten der Elemente um Eisen (Fe), Strontium (Sr), Tellur (Te), Barium (Ba), Platin (Pt) und Blei (Pb) (nach A. W. G. Cameron).

dert man jedoch nicht nur die Angabe der Kernreaktionen, die für die Aufbauprozesse entscheidend sind, sondern auch die Erklärung möglichst aller beobachteten Besonderheiten in der Häufigkeitsverteilung der Elemente. Als Grundlage für ihre Untersuchungen diente deshalb den Autoren die von H. Suess und H. C. Urey aus der quantitativen Spektralanalyse der Sonne, der Erdrinde und von Meteoriten bestimmte Häufigkeitsverteilung der Elemente, die in Abbildung 25 dargestellt ist. In ihr fällt besonders das geringe Vorkommen von Deuterium, Lithium, Beryllium und Bor auf, während die Elemente um Eisen verhältnismäßig häufig sind. Hervorzuheben ist ferner das relativ starke Auftreten der Elemente mit Atommassen um 80, 90, 130, 138, 196 und 203.

Nimmt man an, daß die erste Generation der Sterne aus einer Wasserstoffwolke entstanden ist, so folgt daraus, daß am Anfang der Entwicklung dieser Sterne nur die Proton-Proton-Reaktion ablaufen konnte. Dabei entsteht Helium, das in den späteren Entwicklungsstadien der Sterne, wenn der Wasserstoffvorrat erschöpft ist, der neue Brennstoff wird und dessen „Schlacke“ der Kohlenstoff ist. Der Aufbau noch schwererer Elemente als Kohlenstoff soll Gegenstand der nun folgenden Betrachtungen sein.

Die vier obengenannten Astrophysiker sehen in der fortlaufenden Anlagerung von Heliumkernen an Kohlenstoffatome eine Möglichkeit zur Bildung schwererer Elemente. Hierbei ist allerdings zu beachten, daß die Zahl der aufbauenden Prozesse mit wachsender Atommasse beträchtlich sinkt, weil sich die abstoßenden Kräfte des Atomkerns auf geladene Teilchen ebenfalls vergrößern. Deshalb können nur die energiereicheren Alpha-Teilchen, deren Anzahl relativ gering ist, die starken elektrostatischen Felder (Coulomb-Felder) der Atomkerne durchdringen und eine Kernumwandlung bewirken. Es ist möglich, daß bei solchen Reaktionen die Elemente Sauerstoff, Neon und Magnesium entstanden sind.

Für die Bildung der Elemente von Silizium, Schwefel, Silber bis zu dem Titan-Isotop mit der Atommasse 48 kommt der sogenannte α -Prozeß in Betracht. In diesem Zusammenhang muß daran erinnert werden, daß durch den Salpeter-Prozeß, aber

auch durch die Kernreaktionen, die zur Bildung von Sauerstoff, Neon und Magnesium geführt haben, der Heliumgehalt im Sterninnern außerordentlich stark abgesunken ist. Das bedeutet, daß nach einem neuen „Heliumlieferanten“ zu suchen ist. Eine diesbezügliche Betrachtung des physikalischen Zustandes des Sterninnern zeigt, daß die dort herrschenden Temperaturen nun höher als $1 \cdot 10^9$ °K sind. Unter diesen Bedingungen sind genügend viele Gammaquanten energiereich genug, um bei Stößen wieder Alphateilchen abtrennen zu können. Die auf diese Weise freigesetzten Heliumkerne besitzen infolge der jetzt vorhandenen Temperaturen im Mittel eine sehr große Geschwindigkeit, die sie in die Lage versetzen, mit den verbleibenden Neonkernen zu reagieren und so Silizium, Schwefel, Silber und andere Atome aufzubauen. Die Häufigkeit der auf diese Weise entstandenen Atome ist auch wieder erheblich kleiner als die der Ausgangselemente. Zur Abtrennung der Alphateilchen von den Atomkernen ist zunächst einmal Energie erforderlich, die aber bei den anschließenden Aufbaureaktionen wieder zurückgewonnen wird.

Kommt es im Verlauf der weiteren Entwicklung der Sterne zu einer Temperaturerhöhung über $3 \cdot 10^9$ °K, dann wächst die Zahl der möglichen Kernreaktionen außerordentlich rasch an. In diesem Falle ist man gezwungen, von der Einzeluntersuchung der ablaufenden Prozesse zu einer statistischen Betrachtung überzugehen. Hierbei wird das Ziel verfolgt, die sich einstellende Häufigkeitsverteilung der Elemente als Funktion der bestehenden Temperatur und Materiedichte zu berechnen. Entsprechend ihrer Werte stellt sich jeweils ein Gleichgewicht der aufbauenden und abbauenden Reaktionen ein.

Allgemein ergaben die Untersuchungen, daß bei niedrigen Temperaturwerten die aufbauenden, bei höheren Temperaturen die abbauenden Prozesse überwiegen. Aus den Berechnungen geht weiter hervor, daß sich die beobachtete Häufigkeitsverteilung der Elemente am besten annähern läßt, wenn die Sternmaterie in diesen Entwicklungsstadien und in den Gebieten, in denen Kernreaktionen ablaufen, eine Dichte von etwa $1 \cdot 10^5$ g/cm³ und eine Temperatur von etwa $3,8 \cdot 10^9$ °K besessen hat. Falls die Temperatur im Sterninnern nicht über den

kritischen Wert von $6 \cdot 10^9$ °K steigt, endet unter den dann vorliegenden physikalischen Bedingungen der Aufbau von Atomkernen durch elektrisch geladene Teilchen bei den Elementen um Eisen.

Die Bildung der Elemente mit höheren Atommassen als die der Eisengruppe kann nur durch die Anlagerung von Neutronen erfolgen. Als ungeladene Teilchen werden sie von den elektrischen Feldern der Atomkerne nicht beeinflusst. Infolge des Einbaus eines Neutrons in den Atomkern vergrößert sich seine Masse. Allerdings ist das Neutron nicht stabil, sondern zerfällt schon nach kurzer Zeit in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino. Diesen Vorgang bezeichnet man als β -Zerfall. Das dabei gebildete Elektron und das Antineutrino verlassen den Atomkern, das Proton bleibt zurück. Es erhöht sich die Kernladungszahl, während sich die Atommasse kaum verändert.

Bei der Erklärung des Aufbaus der schweren Elemente durch Neutroneneinfang muß man zwischen zwei extremen physikalischen Verhältnissen unterscheiden. Einmal kann die Zahl der zur Verfügung stehenden Neutronen so gering sein, daß in der Zeitspanne zwischen zwei Einfangsprozessen das Atom durch den β -Zerfall in den stabilen Zustand übergeht; dann spricht man von einem s-Prozeß („slow“ engl.: langsam). Zum anderen ist unter Umständen die Zahl der vorhandenen Neutronen so groß, daß bereits ein weiteres Neutron vom Atom eingefangen ist, ehe durch einen β -Zerfall das vorher aufgenommene Neutron umgewandelt wurde. In diesem Falle liegt der sogenannte r-Prozeß (rapid,“ engl.: rasch) vor. Die genauere Untersuchung beider Prozesse ergibt, daß für die Bildung der schwereren Elemente beide Prozesse wirksam sein müssen.

Der s-Prozeß spielt in den Entwicklungsphasen der Sterne eine Rolle, in denen bereits der Salpeter-Prozeß abläuft. Während aber beim Salpeter-Prozeß aus Helium Kohlenstoff entsteht, verdanken die meisten Elemente im Bereich der Massenzahlen von 23 bis 46 und 63 bis 203 ihre Entstehung dem s-Prozeß. Beim Aufbau der Elemente mit Atommassen zwischen 23 und 46 ist ebenfalls der α -Prozeß wirksam, während für die Entstehung der Elemente mit Atommassen von 63 bis 203 auch der r-Prozeß eine gewisse Bedeutung hat. Infolge des fortgesetzten

Neutroneneinfangs und des anschließenden β -Zerfalls entstehen die Elemente mit steigender Massenzahl, wobei in der Regel jedes auf das vorhergehende leichtere aufbaut. Natürlich ist hierbei immer zu beachten, daß eine Vielzahl von Kernprozessen gleichzeitig abläuft. Außerdem sind die Einfangswahrscheinlichkeiten von Neutronen für die verschiedenen Atomarten sehr unterschiedlich. Aus diesen Gründen ist es nicht ausgeschlossen, daß einzelne Atomkerne bestimmter Elemente bereits auftreten, ehe die im Periodensystem vorangehenden Atome ihre Sättigungshäufigkeit erreicht haben.

Der Aufbau der Elemente durch den s-Prozeß endet beim Wismut 209. Die schwereren Isotope sind sogenannte Alphastrahler, deren Halbwertszeiten kleiner sind als die durchschnittliche Zeitspanne zwischen zwei Neutroneneinfängen. Die Kerne dieser Isotope sind dadurch infolge der Ausstrahlung von Heliumkernen wieder zu Blei zerfallen, ehe ein neuer Aufbau prozeß stattfindet.

Der r-Prozeß setzt die Existenz einer sehr ergiebigen Neutronenquelle voraus. Sie muß imstande sein, einen so starken Neutronenstrom zu liefern, daß jeder Atomkern genügend viele Neutronen einfangen kann. In diesem Falle hängt die Anzahl der auftretenden Kernreaktionen nicht mehr von den spezifischen Einfangswahrscheinlichkeiten für die Neutronen ab, sondern in entscheidendem Maße von der Zahl der in der Zeiteinheit stattfindenden Abbauprozesse. Als solche kommen der schon erwähnte β -Zerfall und die Abspaltung von Neutronen durch energiereiche Gammaquanten in Betracht. Bei diesen Überlegungen ist zu beachten, daß ein Kernaufbau nur dann möglich ist, wenn die bereits im Kern vorhandenen Neutronen so fest gebunden sind, daß sie auch durch Stöße von hochenergetischen Gammaquanten nicht aus dem Atomkern herausgelöst werden können. Beim raschen Einbau von Neutronen in die Atomkerne sinkt jedoch bei einer festen Kernladungszahl die Bindungsenergie mit jedem weiteren eingefangenen Neutron rasch ab, so daß erst ein β -Zerfall, der die Kernladungszahl erhöht, die Bindungsenergie wieder so vergrößert, daß erneut Aufbauprozesse möglich sind. Entscheidend für die Bildung von immer schwereren Elementen ist nach diesen

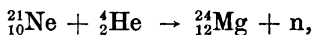
Überlegungen das Auftreten von β -Zerfällen, damit die Atomkerne weitere Neutronen anlagern können.

Die beim r-Prozeß ablaufende Reaktionskette endet bei der Atommasse 260. Danach tritt bei Neutronenbeschuß eine Spaltung dieser Kerne ein, wobei im wesentlichen große Bruchstücke mit Atommassen von etwa 110 und 150 entstehen.

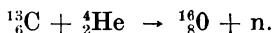
Der Zeitraum, in dem die zuletzt geschilderten Prozesse ablaufen, ist extrem kurz. Er beträgt nach einschlägigen Berechnungen nur etwa 10 bis 100 s. Nach dem „Versiegen“ der Neutronenquelle geht jeder Atomkern infolge des β -Zerfalls wieder in einen stabilen Zustand über.

Der für den r-Prozeß erforderliche starke Neutronenstrom kann bei einer Supernovaexplosion kurzzeitig entstehen. Dieses Ereignis tritt nach den gegenwärtigen theoretischen Vorstellungen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit bei Sternen größer als 1,5 Sonnenmassen ein, wenn sie sich in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium befinden. Im Innern dieser Sterne ist die Temperatur bereits auf einige Milliarden °K angestiegen, und schon ein geringfügiger Temperaturanstieg verursacht ein Überwiegen der Abbauprozesse von Elementen mit Atommassen zwischen 50 und 60 zu Helium. Die dazu erforderliche Energie wird der thermischen Energie des Sternes entzogen. Als Folge davon setzt eine Abkühlung der Sternmaterie ein, wobei der Druck niedriger wird. Der Stern gerät aus dem mechanischen Gleichgewicht, und seine inneren Bereiche beginnen zu kontrahieren. Die freigesetzte Gravitationsenergie wird wieder bei den Abbauprozessen verbraucht, so daß sich die Kontraktion weiter fortsetzt, bis schließlich auch die äußeren Schichten des Sterns nachstürzen. Die von außen in das Sterninnere gelangende Materie wird dabei auf ungefähr $2 \cdot 10^8$ °K aufgeheizt und so stark komprimiert, daß ihre Dichte nun etwa $1 \cdot 10^5$ g/cm³ beträgt. Unter diesen Bedingungen zünden in der noch stark wasserstoffhaltigen Materie Kernprozesse, bei denen wiederum Energie freigesetzt wird. Es entsteht eine Temperaturerhöhung, die die Zahl der ablaufenden energieliefernden Kernreaktionen weiter erhöht. Durch das Ansteigen der Temperatur kommt es schließlich zu einer beobachtbaren Explosion des Sterns. Der enorm angestiegene Druck in

seinem Innern bewirkt eine Expansion der äußeren Schichten, sorgt damit für eine rasche Abnahme der Temperatur und zwangsläufig zu einem Nachlassen der Energiefreisetzung. Infolge der bei einer Supernovaexplosion auftretenden hohen Temperaturen werden neutronenliefernde Reaktionen möglich. Als besonders ergiebig gelten Stöße zwischen Neon-21-Kernen und Alphateilchen, bei denen sich Magnesium 24 und Neutronen bilden –



sowie Stoßprozesse zwischen Kohlenstoff-13-Kernen und Alphateilchen, wobei Sauerstoff 16 und ebenfalls Neutronen entstehen:



Kurzzeitig steht dadurch ein Neutronenstrom von etwa $4 \cdot 10^{32}$ Neutronen/cm²s für die beim r-Prozeß wirksamen Kernreaktionen zur Verfügung.

Während der explosiven Phase des Sterns ändert sich in seinem Innern die Häufigkeitsverteilung der Elemente. Wenn aber die Temperatur wieder abklingt und dabei unter den kritischen Wert von etwa $3,8 \cdot 10^9$ °K sinkt, stellt sich wieder die Häufigkeitsverteilung ein, die bei den Elementen mit Atommassen zwischen 50 und 60 allgemein beobachtet wird.

Bemerkenswert gering ist das Vorkommen der leichten Elemente Deuterium, Lithium und Bor. Ihre Bildung erfolgt nach den Vorstellungen der vier genannten Astrophysiker im sogenannten x-Prozeß. Dieser ist im Gegensatz zu den bereits erwähnten Aufbauprozessen nur in den Sternatmosphären wirksam. Dort sollen bei Stößen zwischen hinreichend schnell bewegten Protonen die betreffenden Elemente aufgebaut werden. In den heißen Zentralgebieten der Sterne können diese leichten Elemente praktisch nicht existieren, weil sie schon nach kurzer Zeit infolge des intensiven Protonenstroms in Helium umgewandelt würden.

Mit der hier dargelegten Theorie über die Elementenentstehung im Sterninnern lassen sich wesentliche Eigenheiten der kosmischen Häufigkeitsverteilung der Elemente erklären. Eine di-

rekte Beobachtung der Veränderungen der chemischen Zusammensetzung ist unmöglich, da die hierfür verantwortlichen Kernreaktionen größtenteils im Sterninnern vor sich gehen. Einen indirekten Beweis ihrer Existenz muß man aber darin sehen, daß die Sterne den von ihnen über lange Zeiträume ausgestrahlten Energiestrom nur durch Kernumwandlungen aufrechterhalten können. Damit es in einem Sternsystem zu einer chemischen Weiterentwicklung, d. h. zur Anreicherung der vorhandenen Materie mit schwereren Elementen kommt, müssen die im Sterninnern entstandenen schwereren Atome wieder in den interstellaren Raum gelangen. Dort stehen sie als „Bau- material“ für die Bildung einer neuen, jüngeren Stern- generation erneut zur Verfügung. Den Massentransport von den Sternen in den zirkumstellaren Raum besorgt eventueu- ell der „Stern- wind“, der bei einigen Riesen- und Überriesen- stern- en schon nachgewiesen wurde. Jedoch ist gegenwärtig über die Effekti- vität dieses Vorgangs noch nichts Genaueres bekannt. Wie da- gegen Beobachtungen zeigen, wird bei Supernovaausbrüchen ein beträchtlicher Teil der Gesamtmasse des Sterns in den um- gebenden Raum geschleudert, so daß auf diese Weise im Stern- innern gebildete Atome der instellaren Materie zugesetzt wer- den.

Am Anfang der Betrachtungen über die Entstehung der che- mischen Elemente wurden kurz kosmologische Fragen berührt. Wenn auch die gegenwärtig diskutierten Vorstellungen über den physikalischen Urzustand des Universums noch ziemlich hypothetisch sind, so läßt sich jedoch die Möglichkeit nicht ausschließen, daß sich in diesem Zeitraum unter den oben skizzierten Bedingungen aus Elementarteilchen ein nicht un- erheblicher Anteil der Elemente bildete, die schwerer als Wasserstoff sind. Die ausführlich dargelegte Theorie des Ele- mentenaufbaus im Sterninnern bezieht sich auf den nachfol- genden Zeitraum und wird durch die „kosmologische“ Ele- mentenentstehung nicht überflüssig, sondern könnte die in den Beobachtungen angedeutete chemische Weiterentwicklung der Sternmaterie verständlich machen.

Kosmogonie des Planetensystems

Untersuchungsprobleme

Bei den ersten oberflächlichen Betrachtungen mag es sonderbar anmuten, daß die gegenwärtigen Auffassungen zur Kosmogonie unseres Sonnensystems viel weiter auseinandergehen als die Auffassungen über die Entstehung und Entwicklung der Sterne. Scheint es doch so zu sein, daß über die Entstehung und Entwicklung der weitaus näheren Himmelskörper, der Mitglieder unseres Sonnensystems, mehr Klarheit herrschen müßte. Dieser scheinbare Widerspruch findet seine Erklärung darin, daß der Aufhellung kosmogonischer Probleme vornehmlich die Ergebnisse vergleichender Untersuchungen zugrunde liegen.

Es ist eine Tatsache, daß gegenwärtig aus der vergleichenden Untersuchung der vielen und weit von uns entfernten Sterne genügend Rückschlüsse auf ihre Entstehung und Entwicklung möglich sind. Leider ist es aber andererseits noch immer so, daß zur Klärung der Fragen um die Entstehung und Entwicklung unseres Sonnensystems ein ähnliches und vergleichbares System der Beobachtung nicht direkt zugänglich ist.

Es gibt jedoch begründete Ansichten, nach denen unser Sonnensystem keinen Einzelfall im Milchstraßensystem darstellt, sondern nur eine der unendlich vielfältigen Erscheinungsformen der sich räumlich und zeitlich bewegenden Materie ist. Für die Richtigkeit dieser Vermutung sprechen einige Beobachtungstatsachen. Bei der Untersuchung benachbarter Doppelsternsysteme fand man in den Bahnbewegungen der Komponenten periodische Störungen, die auf jeweils einen weiteren Begleiter schließen lassen. Die für diese dunklen Begleiter abgeleiteten Massen liegen in der Größenordnung von 0,002 bis

0,020 Sonnenmassen; das entspricht etwa 2 bis 20 Jupitermassen.

Solche Beträge erscheinen für einen Planeten etwas hoch, so daß es nicht ausgeschlossen ist, daß es sich bei diesen Objekten auch um schwarze Zwerge handelt. Selbst dann, wenn das der Fall sein sollte, spricht nichts gegen die Möglichkeit, daß sich in diesen Doppelsternsystemen noch kleinere dunkle Körper befinden. Es wäre falsch, diese Beobachtungen überzubewerten, denn die nachgewiesenen Effekte liegen teilweise schon innerhalb der Fehlergrenzen der Meßwerte. Trotz allem stellen sie einen wertvollen Hinweis auf die Existenz anderer Planetensysteme dar. Sicher werden auch Einzelsterne von dunklen Begleitern umkreist; ihr Nachweis gelang aber bis jetzt nur bei ganz wenigen Sternen, da man hierfür sehr genaue Positionsbestimmungen anstellen muß. Bei der Vielzahl der in Frage kommenden Sterne fällt es nicht leicht, die „Verdächtigsten“ unter ihnen für eine vordringliche Untersuchung auszuwählen.

Eine praktische Möglichkeit, mit den größten zur Verfügung stehenden Teleskopen die dunklen Begleiter direkt zu beobachten, existiert nicht einmal für die nächsten Sterne. Die Winkelabstände zwischen den dunkleren Objekten und den Zentralsternen sind so gering, daß sich beide Beugungsscheibchen vollständig überlappen. Außerdem ist der vorhandene Helligkeitsunterschied so groß, daß die „Planeten“ von ihren Zentralsternen völlig überstrahlt werden.

Dem Vorteil, einzelne Mitglieder des Sonnensystems aus astronomisch „großer Nähe“ beobachten zu können, steht der schwerwiegende Nachteil gegenüber, daß kein weiteres derartiges System der Beobachtung unmittelbar zugänglich ist. Für die anzuwendende Arbeitsmethode ergibt sich daraus, daß auf das bei der Untersuchung der Sternentwicklung mögliche Vorgehen der „Verwandlung des räumlichen Nebeneinanders in ein zeitliches Nacheinander“ nicht zurückgegriffen werden kann. Es besteht vielmehr nur die Möglichkeit, den theoretischen Weg zu durchlaufen, also die Durchrechnung der Entwicklung der Materie von einem zu fixierenden „Ausgangszustand“ bis zur Bildung des Sonnensystems. Als Prüfstein

für eine derartige Theorie stehen aber nur die im Sonnensystem festgestellten Eigenschaften zur Verfügung, deren Besprechung jetzt erfolgt.

Mitglieder des Sonnensystems und ihre Eigenschaften

Unserem Sonnensystem gehört eine große Anzahl verschiedenartiger Körper an, die sich um die Sonne bewegen. Die massenreichsten Mitglieder sind nach der Sonne als Zentralkörper die neun großen Planeten Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun und Pluto, für die als Gruppe von Körpern auch die Bezeichnung Planetensystem verwendet wird. Einige der Planeten werden von Körpern umkreist, die als Monde oder Satelliten bezeichnet werden. Vorwiegend zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter bewegen sich einige zehntausend Kleinkörper, die man als Planetoiden oder Asteroiden bezeichnet. Eine weitere Gruppe bilden die Kometen, die sich im allgemeinen in sehr langgestreckten Bahnen um die Sonne bewegen. Auf Grund ihrer Bahnformen können sich die Kometen zum Teil sehr weit von der Sonne entfernen. Möglicherweise erreichen manche Kometen sogar die Grenze des Sonnensystems, d. h. jenes Gebiet, in dem sich die Gravitationswirkungen der Sonne und der benachbarten Sterne die Waage halten. Bei ihrer Annäherung an die Sonne kommt es in der Regel zur Ausbildung eines Kometenschweifes oder sogar mehrerer. Dadurch werden die Kometen unter günstigen Umständen zu einer eindrucksvollen Erscheinung am Himmel.

Der Raum zwischen den Planeten und den Planetoiden ist mit der sogenannten interplanetaren Materie erfüllt, der die Meteoriten, der interplanetare Staub und das Gas angehören.

Der grundlegende Unterschied zwischen den Körpern des Planetensystems und den Sternen besteht darin, daß ihre Massen nur Bruchteile der Sternmassen sind. Daraus ergibt sich, daß selbst im Innern der massenreichsten Planeten die Temperaturen noch zu niedrig sind, um Kernprozesse zu zünden. Die von den Planeten, aber auch von den anderen Mitgliedern des Sonnensystems ausgehende Strahlung ist daher

zum großen Teil von der Sonne empfangene und teilweise umgewandelte Energie.

Die physikalischen Eigenschaften der verschiedenen Mitglieder des Sonnensystems lassen sich – ähnlich wie bei den Sternen – mit einer Reihe von Meßgrößen charakterisieren, die man auch als Zustandsgrößen auffassen kann. Es sind eine Reihe von Daten, die aus den Beobachtungen direkt oder indirekt hervorgehen:

An erster Stelle ist die *Masse* der Körper zu nennen, die auch hier aus dem 3. Keplerschen Gesetz abgeleitet wird. Der *Radius* wird mikrometrisch bestimmt und kann anschließend unter Berücksichtigung der Entfernung des Objekts in ein lineares Maß umgerechnet werden. Die bei den Durchmesserbestimmungen auftretenden Schwierigkeiten rühren vor allem daher, daß manche Planeten von dichten Atmosphären umgeben sind, die den festen Planetenkörper gar nicht erkennen lassen. Außerdem ist in solchen Fällen der „äußere Rand“ der Atmosphären nicht scharf begrenzt und deshalb schlecht meßbar. Mit mikrometrischen Messungen an der Planetenscheibe wird auch die *Abplattung* $\mathfrak{A}$ des Körpers bestimmt. Sie läßt sich durch die Beziehung

$$\mathfrak{A} = \frac{R_{0^\circ} - R_{90^\circ}}{R_{90^\circ}}$$

definieren, in der R_{0° den Radius des Planeten in der Äquatorebene und R_{90° den Radius in einer Ebene durch beide Pole kennzeichnet.

Die *Rotationsperiode*, die Zeitdauer eines Tages, läßt sich mit Hilfe von Doppler-Effekt-Messungen bestimmen. Bei einigen Planeten kann ihre Umdrehungsdauer auch aus den Beobachtungen von Oberflächeneinzelheiten festgestellt werden.

Falls Masse und Radius eines Planeten bekannt sind, läßt sich seine *mittlere Dichte* aus seiner Masse und seinem Volumen berechnen. Die Kenntnis der beiden Größen Masse und Radius erlaubt ferner die Berechnung der *Entweichgeschwindigkeit* v_∞ . Ihre Größe an der Planetenoberfläche wächst proportional mit der Masse der Planeten, verkleinert sich aber mit zunehmenden

Radien der Planeten. Der exakte formelmäßige Ausdruck für ihre Berechnung lautet:

$$v_{\infty} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Aus strahlungsenergetischen Messungen ist es möglich, die *Oberflächentemperatur* der Planeten zu bestimmen. Für einige Körper im Sonnensystem, zum Beispiel bei der Erde, dem Mond, der Venus und dem Mars, liegen Temperaturwerte ihrer Oberflächen vor. Bei solchen Objekten, die von dichten Atmosphären umgeben sind, wie Jupiter, Saturn, Uranus, aber auch bei einigen Monden, beziehen sich die Meßwerte auf die Temperaturen in den Atmosphären. Die Temperatur an den Planetenoberflächen kann demgegenüber durchaus andere Werte aufweisen, die auch von der „inneren“ Wärme des Planeten abhängen. Man vermutet, daß der Wärmehaushalt der Planeten auch von radioaktiven Prozessen in ihrem Innern beeinflußt wird.

Das *Spektrum* der verschiedenen Körper des Sonnensystems vermittelt wichtige Aufschlüsse über den chemischen und physikalischen Zustand ihrer Atmosphären und oberflächennahen Schichten. Im Unterschied zu den Sternspektren setzt sich das Spektrum eines Planeten aus zwei Komponenten zusammen. Das vorwiegend im sichtbaren Spektralbereich ausgestrahlte Licht ist fast ausschließlich reflektiertes Sonnenlicht, dem lediglich beim Durchgang durch die Planetenatmosphäre einige zusätzliche Absorptionslinien und -banden aufgeprägt werden. Auch infolge der Absorption des Sonnenlichts an einer festen Oberfläche können einige Molekülbanden entstehen. Außer dem Reflektionsspektrum wird noch die Strahlung des Planeten beobachtet, die von seiner Eigentemperatur herrührt. Wegen ihres geringen Betrages liegt das Maximum dieser Wärmestrahlung jedoch im infraroten Spektralbereich.

Zur groben Charakterisierung der Materialeigenschaften der festen Planetenoberflächen bzw. ihrer Atmosphären, aber auch der entsprechenden Größen bei anderen Mitgliedern des Sonnensystems, dienen die *Phasenfunktion*, die *Albedo* und die

Polarisation des Lichtes. Während die *Phasenfunktion* die Helligkeit einer Körperoberfläche in Abhängigkeit vom Blickwinkel des Beobachters auf die Flächennormale angibt, ist die Albedo das Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Ein ideal reflektierender Körper, der das gesamte einfallende Licht zurückwirft, hätte die Albedo 1,000. Wird dagegen die einfallende Strahlung vollständig verschluckt, dann hat der Körper eine Albedo, die Null ist. Die Polarisation des Lichtes gibt Aufschlüsse darüber, ob irgendwelche Schwingungsebenen des Lichtes bevorzugt auftreten. Der Polarisationsgrad des Lichtes gibt den Anteil des in einer Schwingungsebene abgestrahlten Lichtes im Verhältnis zu seiner Gesamtintensität an. Normalerweise treten alle Schwingungsebenen gleichhäufig auf, so daß das Licht unpolarisiert ist.

Die zuletzt angegebenen Größen wurden hier nur der Vollständigkeit halber erklärt; für die eigentliche Planetenkosmogonie haben sie nur eine untergeordnete Bedeutung.

Die aufgeführten Zustandsgrößen sind für die einzelnen Mitglieder des Sonnensystems mit unterschiedlicher Genauigkeit bekannt. Nahezu vollständig liegen sie nur für die großen Planeten vor, während es für die kleineren Körper nur sehr lückenhafte Kenntnisse gibt. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Zustandsgrößen der großen Planeten enthält Tabelle 6.

Bei der Untersuchung des inneren Aufbaus der Planeten geht es vor allem um die Bestimmung der Massenverteilung in ihnen, um den chemischen Aufbau und den physikalischen Zustand der Materie.

Der Sachverhalt läßt sich mit entsprechenden mathematisch-physikalischen Gleichungen beschreiben. Diese Gleichungen sind jedoch wesentlich komplizierter als die entsprechenden Gleichungen für den inneren Aufbau der Sterne. Die Ursache dafür besteht vor allem in den komplizierten Zustandsgleichungen der Materie. In den Planeten herrschen solche physikalischen Verhältnisse, die die Anwendung der Gasgleichung des idealen Gases ausschließen. Der Druck im Planeteninnern ist wahrscheinlich gerade so hoch, daß es zu Änderungen in der Elektronenkonfiguration in den Kristallen der festen Verbin-

Tabelle 6: Zustandsgrößen der Planeten

Planet	Äquator- radius [km]	Ab- plattung α	Masse in Erde- massen	mittlere Dichte [g/cm ³]	Entweich- geschwindig- keit am Äquator [km/s]	Rotations- periode am Äquator	große Bahnhalb- achse in AE	Zahl der Satelli- ten
Merkur	2420	0,0	0,054	5,4	4,2	$58^d 663 \pm 0^d 02$	0,387	0
Venus	6500	0,0	0,815	5,1	10,2	$243^d 09 \pm 0^d 18$	0,723	0
Erde	6378	0,0034	1,000	5,52	11,2	$23^h 56^m 4s 1$	1,000	1
Mars	3380	0,0052	0,108	3,97	5,0	$24^h 37^m 22^s 6$	1,524	2
Jupiter	71350	0,062	317,8	1,334	61,0	$9^h 50^m 5$	5,203	12
Saturn	60400	0,096	95,2	0,684	37,0	$10^h 14^m$	9,540	10
Uranus	23800	0,06	14,5	1,60	22,0	$10^h 49^m$	19,18	5
Neptun	24600	0,02	17,2	2,25	25,0	$15^h 48^m$	30,07	2
Pluto	kleiner 5800	—	0,8?	—	—	$6^d 9^h 16^m 54^s$	39,44	0

Erdmasse: $5,977 \cdot 10^{24}$ kg

1 AE = $1,496 \cdot 10^8$ km

dungen kommt. Ob sich dabei auch die Gitterstrukturen verändern, wird jedoch bezweifelt. Es muß damit gerechnet werden, daß nicht nur chemische Inhomogenitäten im Innern der Planeten vorliegen, sondern auch verschiedene physikalische Zustände ein und desselben Materials in den äußeren und inneren Gebieten. So kann infolge einer Änderung in der Elektronenanordnung eine Verbindung metallische bzw. nicht-metallische Eigenschaften annehmen.

Bei der Untersuchung des inneren Aufbaus der Planeten werden die genannten Effekte berücksichtigt. Hierbei zeigen die aus den berechneten Planetenmodellen abgeleiteten Zustandsgrößen überraschend kleine Abweichungen von den beobachteten Werten. Die gute Übereinstimmung darf jedoch nicht überbewertet werden. Gerade bezüglich der chemischen Zusammensetzung der Materie im Innern der Planeten gehen die Ansichten gegenwärtig noch beträchtlich auseinander. Wenn jedoch die chemische Zusammensetzung der Materie im Planeteninnern nicht genau bekannt ist, lassen sich auch keine verfeinerten Modellrechnungen ausführen.

Für die jupiterähnlichen Planeten wurden ebenfalls Modelle des inneren Aufbaus berechnet, die gut mit den empirisch gefundenen Zustandsgrößen übereinstimmen. Es ist bemerkenswert, daß in diesen Modellen der Massenanteil des Wasserstoffs beachtlich hoch ist. Nach den Berechnungen soll die Masse des Jupiters zu 78%, die des Saturn zu 63% aus Wasserstoff bestehen. Der Aufbau des Planeten Uranus und Neptun ist weniger bekannt. Man nimmt aber an, daß diese beiden Planeten einen etwas geringeren Wasserstoffgehalt aufweisen, als es bei Jupiter und Saturn der Fall sein soll.

Bisher standen die physikalischen Kennwerte einiger Körper des Sonnensystems im Vordergrund der Betrachtungen. Im nachfolgenden sollen ihre räumliche Verteilung und ihre Bahnformen diskutiert werden.

Die Bahnformen reichen von den kreisähnlichen Ellipsen der großen Planeten bis zu den parabelnahen Bahnen der langperiodischen Kometen. Für eine kleine Anzahl von Kometen und Meteoriten wurden auch Hyperbelbahnen berechnet. Diese Hyperbeln sind aber noch so parabelähnlich, daß wegen der

Fehler in den Positionsbeobachtungen nicht mit Sicherheit auf Hyperbelbahnen geschlossen werden kann. Die Lösung dieses noch offenstehenden Problems wäre aber wichtig, weil hierdurch Schlüsse darauf möglich würden, ob auch aus dem interstellaren Raum, von „außen“ also, Kometen und Meteoriten in das Sonnensystem eindringen.

Die Mehrzahl der Mitglieder des Sonnensystems bewegt sich in einem sehr flachen, scheibenförmigen Raum um die Sonne. Da sich auch die Erde in ihm bewegt, ergibt sich bei der Projektion dieser Scheibe an den Himmel ein Streifen, der die scheinbare Sonnenbahn, die Ekliptik, enthält. Gegen sie sind die Bahnebenen der Planeten nur um einige Grade geneigt. Die masseärmeren Mitglieder des Sonnensystems zeigen eine weniger starke Konzentration ihrer Bahnebenen zur Ekliptik. Eine genauere Aufstellung der tatsächlichen Bahnformen und die massenmäßige Verteilung der Mitglieder des Sonnensystems auf seine Gesamtmasse enthält Tabelle 7.

Auf einige besondere Beobachtungstatsachen soll noch aufmerksam gemacht werden, weil sie ebenfalls mit einer Planetenkosmogonie erklärt werden müssen. Hierzu gehört die Tatsache, daß der Drehimpuls der Sonne nur etwa 2% des Drehimpulses aller Planeten beträgt. Auf dieses paradoxe Verhältnis wird später noch näher eingegangen.

Die mittleren Abstände der großen Planeten scheinen gesetzmäßig anzuwachsen. Darauf wies bereits J. K. Titius im Jahre 1766 hin. Später wurde dieser Umstand von J. E. Bode allgemein bekanntgemacht. Beim Vergleich der mittleren Abstände der Planeten mit den aus der Titius-Bodeschen-Reihe berechneten Abständen fällt auf, daß in der Entfernung von 2,8 Astronomischen Einheiten ein Planet zu fehlen scheint. Dafür befindet sich in dem fraglichen Entfernungsbereich von 2,3 bis 3,3 Astronomischen Einheiten der Großteil der helleren Planetoiden. Es erhebt sich in diesem Zusammenhang die interessante Frage, ob die dort aufgefundenen Asteroiden eventuell die Bruchstücke eines zerborstenen Planeten sind oder ob sie lediglich das Baumaterial für einen Planeten darstellen, dessen Bildung nicht vollendet wurde.

Eine bemerkenswerte Tatsache ist ferner, daß sämtliche Pla-

Tabelle 7: Massenverteilung und Bahnformen im Sonnensystem

Körper	Zahl	Gesamtmasse in Einheiten der Erdmasse	Durchmesser [km] (größten- ordnungsmäßig)	Bahnformen	Bahnanlage
Sonne	1	330000	10^6	—	—
Planeten	9	447,9	10^3 bis 10^5	kreisnahe Ellipsen	stark zur Ekliptik konzentriert
Satelliten der Pla- neten	32	0,12	10 bis 10^3	überwiegend kreisähnliche Ellipsen	ziemlich stark zur Äquatorebene der Planeten konzentriert
Planetoiden	4 bis $5 \cdot 10^4$	10^{-2} bis 10^{-1}	1 bis 10^3	Ellipsen parabelnahe Ellipsen	ziemlich stark zur Ekliptik konzentriert
kurzperiod. Kometen	10^7 — 10^{10}	10^{-1}	1 bis 10 (Kern) 10^4 bis 10^5 (Koma)		regellos im Raum verteilt
langperiod. Kometen					
Meterioten	—	—	10^{-9} bis 10^{-5}	alle Kegel- schnitte	teilweise wie bei den Planetoiden, teilweise wie bei den Kometen
Partikel des Zodia- kallichtes	—	—	meistens 10^{-8} (Staub) freie Elektronen	kreisähnliche Bahnen	stark zur Ekliptik konzentriert

neten die gleiche Umlaufrichtung um die Sonne haben. Die Rotation der Planeten erfolgt bis auf zwei Ausnahmen (Uranus, Venus) im gleichen Sinne wie ihre Umlaufbewegungen. Die rückläufige Rotation der Venus wurde erst kürzlich erkannt. Weiterhin stimmt bei vielen Satelliten der Planeten die Umlaufbewegung mit der Rotationsrichtung der jeweiligen Planeten überein.

Die in Tabelle 6 enthaltenen Daten über die großen Planeten lassen zwei verschiedene Gruppen erkennen: die erdähnlichen Planeten, zu denen Merkur, Venus, Erde und Mars gehören, und die jupiterähnlichen Planeten, zu denen Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun zählen. Die erdähnlichen Planeten zeichnen sich durch geringe Massen und kleine Radien, aber durch eine relativ hohe mittlere Dichte aus und bewegen sich alle in geringeren Entfernungen als 2 Astronomische Einheiten um die Sonne. Im Gegensatz dazu zeigen die jupiterähnlichen Planeten sehr große Massen und Radien, aber eine geringere mittlere Dichte. Außerdem sind ihre großen Bahnhalbachsen sämtlich größer als 5 Astronomische Einheiten. Der Planet Pluto muß bei diesen vergleichenden Betrachtungen ausgeschlossen werden, da seine Zustandsgrößen noch zu wenig bekannt sind und außerdem der Verdacht besteht, daß er ein entwichener Mond des Neptuns ist.

Die chemische Zusammensetzung der Mitglieder des Sonnensystems muß bei der Ausarbeitung einer kosmogonischen Theorie ebenfalls berücksichtigt werden. Nach den an der Erdrinde, bei einigen Meteoriten und der Sonne ausgeführten Analysen besteht in den relativen Häufigkeiten der schwereren Elemente eine größenordnungsmäßige Übereinstimmung. Allerdings treten größere Abweichungen bei den leichtesten Elementen Wasserstoff und Helium auf. Bemerkenswert ist der hohe Anteil leichter Elemente in den Atmosphären von Jupiter und Saturn. Nach den Vorstellungen über den inneren Aufbau dieser beiden Körper muß ein Großteil des sie aufbauenden Materials aus Wasserstoff bestehen.

Die Theorie über die Entstehung der chemischen Elemente verlegt – wie wir bereits wissen – im wesentlichen ihre Bildung in das Innere der Sterne, wenn auch ein gewisser Anteil kos-

mologischen Ursprungs sein dürfte. Diese Konzeption und die bei einzelnen Mitgliedern des Sonnensystems gefundene Häufigkeitsverteilung der schweren Elemente führen zu dem Schluß, daß sich die interstellare Materie, aus dem unser Sonnensystem entstand, schon einmal in einem Stern befunden haben müßte. Dort konnte sich die beobachtete Häufigkeitsverteilung bilden. Die Zustandsgrößen der Mitglieder des Sonnensystems, ihre Bewegungsverhältnisse und ihre räumliche Verteilung charakterisieren strenggenommen den jetzt in ihm erreichten Entwicklungsstand. Es ist aber anzunehmen, daß diese Größen früher andere Werte hatten, die wir nicht kennen. Auf diese Problematik kommen wir später noch einmal zurück. Die noch anzustellenden Überlegungen werden zeigen, daß sich einige der himmelsmechanisch wichtigen Größen in ihrem ursprünglichen Zustand befinden müssen.

Der einzige einigermaßen sichere Zahlenwert über die Vergangenheit des Sonnensystems ist das Alter. Es wurde mit Hilfe verschiedener Methoden abgeleitet. Vor allem die in der Erdkruste und in den Meteoriten vorkommenden radioaktiven Elemente erwiesen sich hierbei als eine entscheidende Hilfe. Aus dem gemessenen Verhältnis eines geeigneten radioaktiven Ausgangselements und seines Zerfallprodukts läßt sich bei bekannter Halbwertszeit die Zeit bestimmen, seit der das radioaktive Element in dem betreffenden Körper eingeschlossen ist. Für die Erdkruste wurde ein Alter von $4,2$ bis $4,3 \cdot 10^9$ Jahren ermittelt. Das von den Apollo-11-Astronauten zur Erde gebrachte Mondgestein hat ein Kristallisationsalter von etwa $3,7$ bis $4,6 \cdot 10^9$ Jahren. Dagegen ist das beim Apollo-12-Unternehmen gesammelte Gestein im Mittel rund 2 Milliarden Jahre jünger. Der von Luna 16 zurückgebrachte Mondstaub hat ein Alter von etwa $4,5 \cdot 10^9$ Jahren. Der älteste, bisher untersuchte Meteorit ist mit $5,1 \cdot 10^9$ Jahren noch etwas älter. Von einer kosmogonischen Theorie des Planetensystems wäre zu fordern, daß die Herausbildung aller jetzt beobachteten Eigenheiten vom Ausgangszustand an innerhalb von rund $5 \cdot 10^9$ Jahren erfolgen muß. Erfordern dagegen bestimmte Vorgänge einen längeren Zeitraum, dann können sie nicht als Erklärungsmöglichkeiten herangezogen werden.

Kosmogonische Hypothesen über die Entstehung des Sonnensystems

Die Anzahl der für das Planetensystem aufgestellten kosmogonischen Hypothesen ist beachtlich groß. Hinsichtlich ihrer Grundvoraussetzungen lassen sie sich in vier Gruppen einteilen, wenn man von folgenden grundsätzlichen Gesichtspunkten ausgeht: Entwickelten sich die Sonne und die anderen Körper des Sonnensystems ursprünglich aus einer einzigen Wolke oder nicht, und wirkten auf das Sonnensystem nur innere oder auch äußere Kräfte ein?

Falls nur innere Kräfte bei der Entwicklung des Sonnensystems wirksam waren, spricht man von einem geschlossenen System. Sollten dagegen auch äußere Kräfte bei der Ausbildung der bekannten Eigenschaften beigetragen haben, dann liegt ein offenes System vor. Sind jedoch die Sonne und die übrigen Mitglieder des Sonnensystems von Anfang an selbständige Körper, so spricht man von einer erzwungenen Entwicklung. Die Bezeichnung spontane Entwicklung wird dann verwendet, falls alle Mitglieder des Sonnensystems zu Beginn der Entwicklung eine einzige Masse bildeten.

Eine weitere Differenzierung der verschiedenen Kosmogonien ergibt sich, wenn man nach dem physikalischen Ausgangszustand der Materie fragt, aus der sich das Sonnensystem bildete. Je nachdem, ob die Materie eine meteoritenartige Struktur oder eine gasförmige Beschaffenheit besaß, spricht man von einer Kalt- bzw. Heißentstehung.

Die Gruppe der sogenannten offenen Systeme umfaßt die Katastrophentheorien, denen heute allerdings keine Bedeutung mehr zugemessen wird. Diese Hypothesen basieren auf der Annahme, daß bei einem nahen Vorübergang zweier Sterne infolge der Gezeitenkräfte Materie aus ihnen herausgerissen wurde, aus der sich das Sonnensystem bildete. Gegen einen solchen Entstehungsmechanismus sprechen jedoch zwei entscheidende Gründe: Einerseits ist die Sterndichte in der Sonnenumgebung so gering, daß ein so naher Vorübergang zweier Sterne nur mit außerordentlich geringer Wahrscheinlichkeit eintritt. Andererseits wäre die Temperatur der aus der

Sonne herausgerissenen Materie so hoch gewesen, daß sie sich bei dem entsprechend hohen Gasdruck im Raum verstreut hätte, ehe es zur Kondensation der Planetenkörper gekommen wäre.

Bevor auf die modernen kosmogonischen Vorstellungen eingegangen wird, sollen wenigstens die klassischen Hypothesen von I. Kant (1755) und P. S. Laplace (1796) erwähnt werden. Nach Kants Ansicht gab es zu Beginn der Entwicklung eine gleichmäßige Verteilung der Materie im Raum, in dem sich die einzelnen Teilchen in einer ungeordneten Bewegung befanden. Dabei kam es zu Zusammenstößen von Partikeln, deren Bewegung entgegengesetzt gerichtet waren. Sie verloren dabei zum größten Teil ihre Geschwindigkeit und sanken zum Anziehungszentrum ab. Dort bildete sich im Laufe der Zeit aus den von allen Richtungen einfallenden Teilchen eine Verdichtung, aus der später die Sonne entstand. Bei gelegentlichen Zusammenstößen konnten die auf das Zentrum zufallenden Teilchen aus der direkten Richtung abgelenkt werden; sie beschrieben dann die verschiedensten Bahnen um den Zentralkörper. Falls solche Teilchen gelegentlich auf ihn stürzten, konnten sie einen geringen Impuls in tangentialer Richtung übertragen und so den „Anstoß“ für eine Rotation geben. Zwischen den um die „Ursonne“ kreisenden Teilchen fanden so lange Zusammenstöße statt, bis nur noch eine Umlaufrichtung existierte. Während dieses Prozesses flachte sich der ursprünglich sphärische Nebel zu einer Scheibe ab. Aus der Vereinigung der Partikeln entstanden schließlich einige größere Körper, die zu Planeten anwuchsen und in nahezu gleicher Ebene die Sonne im gleichen Sinne umkreisten.

Für die Entstehung der Rotation der Planeten wurde von Kant der gleiche Mechanismus verantwortlich gemacht, der auch bei der Sonne wirksam war: die Impulsübertragung von Teilchen, die gleichsinnig den Planeten umkreisten. Die Bildung der Monde soll im Prinzip ebenso wie die Planetenentstehung vor sich gegangen sein.

Gegen die Kantsche Hypothese wurde eine Reihe schwerwiegender Argumente vorgebracht, so daß sie in ihrer ursprünglichen Fassung nicht mehr aufrechtzuerhalten war. Vor allem

ist kaum zu verstehen, wie sich bei dem angenommenen Kondensationsprozeß die gleichsinnige Umlaufs- und Rotationsrichtung der Planeten ausbilden konnte, denn die Kantische Urwolke besaß ja keine systematische Rotationsbewegung. Da sich die Teilchen in ihr voraussetzungsgemäß völlig regellos bewegten, war zu erwarten, daß im statistischen Mittel etwa gleichviele „vorwärts“- wie „rückwärts“-laufende Teilchen auf die Sonne treffen. Das bedeutet aber, daß es auf diese Weise keineswegs zur Ausbildung der Sonnenrotation kommen konnte und daß es auch keinen bevorzugten Umlaufsinn der Planeten geben dürfte. Mit den hier vorgebrachten kritischen Bemerkungen ist die Zahl der Einwände bei weitem noch nicht erschöpft.

Die Laplacesche Hypothese geht von der Annahme eines heißen, in langsamer Rotation befindlichen Gasnebels aus, der sich bis über die äußerste – heutige – Planetenbahn erstreckte. Infolge der Wärmeausstrahlung in den Weltraum kühlte der Nebel langsam ab und schrumpfte allmählich während dieses Prozesses. Nach dem Drehimpulserhaltungsgesetz mußte dabei die Rotationsgeschwindigkeit des Nebels immer größer werden. An einem bestimmten Punkt der Entwicklung kam es an der äußeren Grenze der Gasmassen zu einem Ausgleich zwischen der Zentrifugalkraft und der Zentripedalkraft. Unter diesen Bedingungen konnten sich die äußeren Partien des Nebels ablösen. Sie umkreisten aber den Nebel weiterhin und bildeten sich in der Folgezeit zu einem Kreisring um. Inzwischen war die Verdichtung des Zentralkörpers so weit gegangen, daß es wieder zur Instabilität an seinem Äquator kam. Erneut floß Materie ab. Aus diesem Material bildete sich ebenfalls ein Kreisring. Dieser Prozeß wiederholte sich noch einige Male, und am Ende dieser Entwicklungsphase war die Sonne von einer Anzahl konzentrischer, rotierender, heißer Gasringe umgeben, während der gesamte Raum des heutigen Planetensystems noch von einem ausgedehnten dünnen Gasnebel ausgefüllt war.

Die Materie in den Ringen kühlte sich allmählich ab, kondensierte und ging schließlich in den festen Zustand über. Da jedoch die Verteilung der Materie längs der Ringe nicht völlig

gleichmäßig gewesen sein dürfte, wuchsen die Materie, „knoten“ auf Kosten ihrer Umgebung an. Bei einem späteren Zerfall der Ringe in größere Teile konnten sich infolge gegenseitiger Anziehung der Bruchstücke schließlich die Planeten bilden. Nach dieser Erklärung läßt sich die gleiche Umlaufrichtung der Planeten verstehen. Auch der gleiche Rotationssinn ist verständlich, da die Materieringe wie starre Körper rotierten, deren äußere Teile sich schneller bewegten als die inneren.

In den rotierenden Protoplaneten sollte sich der Vorgang der Materieabtrennung und Ringbildung im kleinen wiederholen, wodurch die Satelliten der Planeten entstanden.

Die noch im Planetensystem verbliebene feinverteilte Materie konnte nach Ansicht von Laplace nicht in den großen Planeten gebunden werden. Daher umkreise sie auch heute noch die Sonne und rufe das Zodiakallicht hervor.

Die Kometen hielt Laplace für „Wanderer“ zwischen verschiedenen Sonnensystemen, die sich aus der Kondensation des – wie wir heute sagen würden – interstellaren Gases bildeten. Je nach ihrer Einfallsrichtung in das Sonnensystem und ihrer Geschwindigkeit besitzen die Kometen die unterschiedlichsten Bahnformen und Bahnanlagen.

Wie wir jetzt wissen, gehört der überwiegende Teil der Kometen zum Sonnensystem. Sie sind im allgemeinen nicht aus dem interstellaren Raum zu uns gelangt. Lediglich in ganz vereinzelten Fällen läßt sich die Möglichkeit einer interstellaren Herkunft nicht völlig ausschließen.

Vergleicht man die beiden Hypothesen von Kant und Laplace, so fällt sofort auf, daß sich beide Vorstellungen schon in ihrer Grundvoraussetzung unterscheiden. Während Kant die gleichzeitige Bildung der Sonne und der Planeten betrachtet, nimmt Laplace eine zeitlich aufeinanderfolgende Entstehung der Sonne und der Planeten an.

Auf der Grundlage der Laplaceschen Hypothese ließen sich zwanglos die Bewegungen aller Planeten in nahezu einer Ebene, ihre fast kreisförmigen Bewegungen um die Sonne und ihr gleicher Umlauf- und Rotationssinn verstehen. Wenn auch diese Hypothese eine Erklärung für bestimmte, tatsächlich vorhandene Eigenheiten des Sonnensystems gibt, enthält sie

doch schwerwiegende Widersprüche gegenüber den Grundgesetzen der Mechanik.

Die Kritik an den Laplaceschen Vorstellungen richtet sich unter anderem gegen die Verteilung des Drehimpulses auf die einzelnen Mitglieder des Sonnensystems.

Unter dem Drehimpuls p eines Körpers, der sich auf einer kreisförmigen Bahn bewegt, versteht man das Produkt aus der Masse $\mathfrak{M}$ des Körpers, seiner Bahngeschwindigkeit v und seinem Bahnradius r :

$$p = \mathfrak{M} \cdot v \cdot r.$$

Diese Gleichung gilt in großer Näherung auch für die Planeten, die sich in sehr kreisnahen Ellipsen um die Sonne bewegen. Falls man nun den Drehimpuls eines rotierenden Körpers berechnen will, muß diese Gleichung auf jedes Masseteilchen des Körpers angewendet werden; die Einzelprodukte sind danach aufzusummieren.

Der im Sonnensystem vorhandene Gesamtdrehimpuls ist außerordentlich merkwürdig verteilt. Auf die Planeten, deren Gesamtmasse lediglich 0,2% der Masse des Sonnensystems ausmacht, entfallen etwa 98% des Gesamtdrehimpulses.

In einem abgeschlossenen mechanischen System, und um ein solches handelt es sich – entsprechend den gemachten Voraussetzungen – beim Planetensystem, gilt aber der Drehimpulserhaltungssatz. Er besagt, daß der Drehimpuls unter den Mitgliedern des Systems zwar neu verteilt werden kann, sein Gesamtbetrag aber erhalten bleibt. Daraus ergibt sich sofort die Frage, wie es überhaupt möglich war, daß sich Materie aus der Ursonne lösen konnte, wenn die Sonnenrotation rund 200mal kleiner war als der dafür notwendige kritische Wert. Als einzige Erklärungsmöglichkeit für dieses Paradoxon kommt die Annahme eines Abbremsmechanismus für die Sonnenrotation in Frage, der erst nach der Abtrennung der Planeten wirksam wurde.

Ein weiterer und entscheidender Einwand gegen die Laplace'sche Hypothese richtet sich gegen die vorhandenen Neigungen der Planetenbahnen zueinander. Falls die Vorstellungen von Laplace zutreffen sollten, hätten ursprünglich alle Planeten-

bahnen in einer Ebene gelegen. Die gegenseitigen Störungen der Planeten hätten wohl im Laufe der Zeit zu geringfügigen Neigungen gegen diese Ebene geführt, aber niemals die gegenwärtig beobachtbaren Bahnlagen verursachen können. Man muß daraus schließen, daß die Planetenbahnen schon von Anfang an nicht in einer gemeinsamen Ebene lagen. Damit wird aber gleichzeitig der Erklärung der Entstehung des Planetensystems aus der Rotationsinstabilität einer schnell rotierenden Gaswolke die Grundlage genommen.

Mit diesen kritischen Bemerkungen soll die Besprechung der beiden klassischen Hypothesen abgeschlossen sein. In ihnen sind die Erkenntnisse der schon zur damaligen Zeit bekannten Newtonschen Mechanik verarbeitet. Seit mehreren Jahren ist bekannt, daß die auf rein himmelsmechanischer Grundlage aufbauende Erklärung der Eigenschaften des Sonnensystems nicht zum Ziele führt. Bei der Entstehung der Körper des Sonnensystems müssen auch hydrodynamische und magnetische Vorgänge beteiligt gewesen sein. Diese neuen Ideen fanden zuerst in der von C. F. von Weizsäcker ausgearbeiteten Hypothese und ihrer Weiterentwicklung von G. P. Kuiper ihren Niederschlag. Beide Hypothesen bringen außerdem die Bildung der Körper des Planetensystems in engen Zusammenhang mit den Vorgängen bei der Entwicklung der Sonne.

Bei seinen Untersuchungen ging von Weizsäcker von einem im wesentlichen aus Wasserstoff bestehenden Gasnebel aus, in dessen Mitte die heutige Sonne lag. Die räumliche Ausdehnung des Nebels entsprach seiner Auffassung nach etwa den äußeren Grenzen des heutigen Planetensystems, und seine Masse betrug rund ein Zehntel der Sonnenmasse. Es wurde ferner angenommen, daß der Gasnebel aus einem Wirbel der großen, galaktischen Gasmasse hervorging und einen Drehimpuls besaß. Die in einem solchen Nebel vorhandene Dichte, die Temperatur und der Reibungszustand des Gases, die Geschwindigkeit der Atome und die Wolkengröße riefen zwangsläufig turbulente Bewegungen der Gasmassen hervor. Sie bewirkten eine Änderung der Gestalt und der Richtung der Teilchenbahnen, so daß sie schließlich in der Nähe der Äquatorebene der Sonne fast kreisförmig wurden. Auch innerhalb

der sich bildenden flachen Scheibe traten turbulente Reibungskräfte auf, die in den sonnennahen Gebieten eine Abbremsung der schnellen Teilchen und in den sonnenfernen Gegenden eine Beschleunigung der langsameren Teilchen verursachten. Infolgedessen änderten sich die Teilchenbahnen, und ein gewisser Prozentsatz der Nebelmasse konnte nach den äußeren Teilen des scheibenförmigen Nebels transportiert werden. Gleichzeitig ergab sich damit auch eine allmähliche Drehimpulsverlagerung. Nach Ablauf einer bestimmten Zeitspanne war schließlich eine langsam rotierende Zentralmasse von einem sich schneller drehenden abgeflachten Gasnebel umgeben. Darin traten neben den Keplerbewegungen der Teilchen auch weiterhin Turbulenzerscheinungen auf, und kleinere Wirbel entstanden. Nach den Vorstellungen von Weizsäckers konnten in den Gebieten, die die Hauptwirbel voneinander trennten, wieder kleinere Wirbel entstehen, in denen sich die Materie verdichtete. Später wurde das Wachstum der entstandenen Materieknoten infolge Massenanziehung weiter gefördert, wobei sich auch benachbarte Verdichtungen vereinigt haben sollen. Eine ähnliche Folge von Vorgängen soll in den dichten Gashüllen der Protoplaneten zur Entstehung ihrer Satellitensysteme geführt haben. Die von Weizsäckersche Wirbeltheorie beruht auf der Annahme eines geometrischen Musters von Wirbeln, deren Größe mit wachsendem Abstand vom Zentralkörper zunimmt. Die Kritik an dieser Hypothese richtet sich vor allem gegen das angenommene Wirbelmuster, dessen Auftreten in der Natur in dieser Form kaum möglich ist. Außerdem bestehen berechtigte Zweifel darüber, ob die Stabilität der Wirbel über den zur Massenaufsammlung unbedingt notwendigen Zeitraum gewährleistet ist. Setzt man nämlich eine Anfangsdichte im Nebel von etwa 10^{-9} g/cm^3 voraus, dann müßte ein solches Wirbelsystem mindestens 10^4 Jahre erhalten bleiben, wenn sich ein Körper von 1 km Durchmesser bilden soll. Wie Schätzungen ergaben, ist jedoch die Stabilität eines solchen Wirbelsystems nicht einmal über diesen relativ kurzen Zeitraum gesichert, was übrigens auch von Weizsäcker erkannte. Andere Autoren brachten noch Argumente gegen die Ansammlung von Materie in den Zwischengebieten der

Wirbel in die Diskussion. Sie zeigten ebenfalls, daß die Vorstellungen von Weizsäckers in dieser Form nicht aufrechtzuerhalten sind.

Auf den Grundideen dieser Theorie aufbauend, entwickelte Kuiper eine modifizierte Hypothese. Dabei hielt er an den Grundvoraussetzungen von Weizsäckers ebenso fest wie an der hydrodynamischen Betrachtungsweise. Allerdings wird bei Kuiper das geometrische Wirbelmuster durch eine statistische Wirbelverteilung ersetzt, bei der es — wie er meint — durchaus vorkommt, daß kleinere Wirbel nicht nur außerhalb größerer Wirbel, sondern auch innerhalb von Wirbeln auftreten. Die Lebensdauer der einzelnen Wirbel wird auch in dieser Theorie als relativ kurz angenommen. Dafür bilden sich aber immer wieder neue Wirbel, die sich anschließend wieder auflösen. Im Laufe der Zeit kann es trotz der ständigen Ortsverlagerung der Wirbel nach Meinung Kuipers doch zur Bildung lokaler Verdichtungen der Materie kommen, die unter Umständen weiter anwachsen. Allerdings muß die ursprüngliche Dichte des Nebels eine bestimmte Mindestgröße besitzen, damit die Gezeitenkräfte der Sonne die kleineren Anfangskonensationen nicht sofort wieder zerstreuen.

Die aus Gravitationsinstabilitäten entstandenen Protoplaneten besaßen zunächst noch die ursprüngliche chemische Zusammensetzung. Außerdem wird angenommen, daß ihre damaligen Massen wesentlich größer waren als ihre heutigen Massen. Ihre Abstände von der Sonne sollen sich dagegen nicht wesentlich verändert haben. Unter diesem Gesichtspunkt könnte man die Titius-Bodesche-Reihe als einen Ausdruck der ehemaligen Dichteverteilung in dem Gasnebel ansehen.

Die weitere Entwicklung der Urplaneten bis zu ihrer heutigen Form ist eng mit der Entwicklung der Sonne verbunden. Nach Kuipers Vorstellungen bildeten sich die Protoplaneten in dem Zeitraum, in dem sich die Sonne noch im Kontraktionsstadium befand, in dem unter anderem ihre Leuchtkraft ständig zunahm. Kurz vor der Erreichung der Hauptreihe stieg die Sonnenleuchtkraft auf einen Maximalwert an. Es ist anzunehmen, daß sich in dieser Phase heftige Eruptionen ereigneten, wie sie auch bei den T-Tauri-Sternen beobachtet werden.

Bei diesen Vorgängen wird vor allem infolge der intensiven Ultraviolettstrahlung der größtenteils aus neutralem Wasserstoff bestehende Nebel ionisiert. Seine Temperatur stieg von etwa $1 \cdot 10^2$ °K auf $1,5 \cdot 10^4$ °K an und folglich auch der Gasdruck um mehr als das Hundertfache. Auch die dichten Uratmosphären der Planeten wurden ionisiert. Wegen des hohen Gasdrucks begann der Nebel zu expandieren.

Falls die Sonne damals ein hinreichend starkes Magnetfeld besaß, setzte in dieser Phase die Abbremsung ihrer möglicherweise raschen Rotation ein. Man muß sich bei all diesem vergegenwärtigen, daß die Sonne ihr in den interplanetaren Raum reichendes Magnetfeld synchron mit ihrer Rotationsbewegung mitführte. Die elektrisch geladenen Teilchen konnten nicht mehr wie die neutralen Partikeln die magnetischen Feldlinien einfach überqueren und blieben deshalb an ihnen „kleben“. Die Feldlinien „froren“ gewissermaßen in das ionisierte Gas „ein“. Als Folge davon blieb das solare Magnetfeld nicht mehr unabhängig von der Bewegung des interstellaren Plasmas. Die gegenüber Sonnenrotation langsamen Keplerbewegungen der Ionen führten bald zur Verformung der magnetischen Kraftlinien. Daraus resultierte letztlich eine Widerstandskraft, die die Abbremsung der Sonnenrotation verursachte. Diese magnetische Kopplung ist allerdings nur bei einer geringen Gasdichte wirksam.

Der Massenverlust, den die Protoplaneten infolge der Ionisation der Materie und ihrer Expansion erlitten, dürfte bei den sonnennäheren größer gewesen sein als bei den sonnenferneren. Insbesondere müssen sich bei diesem Vorgang die leichteren Elemente verflüchtigt haben. Es würden dadurch nicht nur die relativ kleinen Massen der erdähnlichen Planeten verständlich, sondern auch die gegenüber den jupiterähnlichen Planeten bestehenden Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der Planetenmaterie.

Die Rotationsdauer der Urplaneten war zunächst genau so groß wie ihre Umlaufsperiode um die Sonne. Infolge Kontraktion der Planetenkörper ging jedoch die Synchronisierung im Laufe der Zeit verloren, und die Rotationsperioden nahmen die heutigen Werte an.

Die Satellitenentstehung soll sich in den dichten Gashüllen der Planeten vollzogen haben und ähnlich wie die Planetenbildung abgelaufen sein. Der spätere Massenverlust der Urplaneten rief eine Expansion ihrer Satellitensysteme hervor, die unter Umständen ein Entweichen der äußeren Satelliten zur Folge gehabt haben könnte. Möglicherweise wurden später einige der so freigesetzten Satelliten von einem anderen Planeten wieder eingefangen und bildeten dort die „unregelmäßigen“ Monde, die wegen großer Bahnneigungen gegen die Äquatorebene des Planeten auffallen und durch rückläufige Bewegungen gekennzeichnet sind. Auf diesen Überlegungen beruht auch die von R. A. Lyttleton geäußerte Hypothese, nach der Pluto ein ehemaliger Satellit von Neptun ist. Die Bahnlage von Pluto ist so ungewöhnlich, daß seine Entstehung als normaler Urplanet fast ausgeschlossen erscheint.

Die Bildung der Kometen verlegt Kuiper in die äußersten Gebiete des Sonnennebels, in denen die Materiedichte unterhalb des für die Entstehung eines Planeten erforderlichen Grenzwertes lag. Die Kometen entstanden vor allem aus den in gefrorenem Zustand vorliegenden Kondensationsprodukten Wasser, Ammoniak, Methan usw. und wuchsen allmählich zu größeren Aggregaten an. Die Bahnen der Kometen verstreuten sich später infolge der Störungen durch die großen Planeten in den interplanetaren Raum.

Die Hypothese Kuipers ist ein Beispiel für eine typische „Heiß“-entstehungstheorie. Gegenwärtig ist jedoch mehr die Idee der „Kalt“-entstehung im Gespräch, nach der sich die Körper des Sonnensystems vorwiegend aus meteoritischem Material bildeten. Diese Konzeption ist an sich nicht neu, sie wurde bereits am Anfang dieses Jahrhunderts von mehreren Fachleuten diskutiert.

Bei den Kaltentstehungstheorien spielt die Frage nach dem Ursprung des kosmischen Staubes eine wichtige Rolle. Nach einer vor allem von O. J. Schmidt, L. E. Gurewitsch und A. I. Lebedinski ausgearbeiteten Hypothese kam der Staub aus dem interstellaren Raum und wurde von der Sonne eingefangen. Wie einschlägige, himmelsmechanische Berechnungen zeigen, ist ein derartiges Einfangen durchaus möglich. Aller-

dings erfolgt es nur unter sehr einschneidenden Bedingungen, wenn der Vorgang wirklich effektiv sein soll. Andererseits besteht aber auch die Möglichkeit der Staubbildung in der unmittelbaren Nachbarschaft der Sonne während ihres Kontraktionsstadiums. Es muß nur ein wirksamer Kondensationsprozeß ablaufen, der eine ionisierte Gaswolke mit Staubbemengungen in eine Staubwolke mit einem Gasanteil verwandelt. Der Begriff „Staub“ ist in diesem Zusammenhang etwas zu erweitern, da hierunter auch Flüssigkeitströpfchen zu rechnen sind.

Als einer der modernen Vertreter der Kaltentstehungstheorie ist H. Alfvén anzusehen, der einen bedeutenden Anteil an der Neudiskussion dieser Hypothese hat. Vor allem machte er auf zwei himmelsmechanische Probleme aufmerksam, denen man früher die eigentlich notwendige Beachtung nicht geschenkt hatte. Hierzu gehört die an sich bekannte Tatsache, daß beobachtungsmäßig einem Planetensystem drei gut ausgebildete Satellitensysteme, die Systeme der Planeten Jupiter, Saturn und Uranus, gegenüberstehen. Diese Systeme haben für sich so ähnliche Eigenschaften wie das Planetensystem, daß jede annehmbare Theorie über seine Entstehung in der Lage sein sollte, auch die Eigenschaften der Satellitensysteme zu erklären. Trotzdem wurde in der Vergangenheit die Bildung der Satelliten meistens als zweitrangiges Problem angesehen, dessen Diskussion immer im Anschluß an die Betrachtungen der Planetenkosmogonie erfolgte, wobei stets der gleiche Entstehungsmechanismus zugrunde gelegt wurde.

Eine weitere interessante Beobachtungstatsache stellt das von Alfvén gefundene Gesetz der isochronen Rotation dar. Der bei photometrischen Untersuchungen entdeckte Lichtwechsel einiger Planetoiden weist auf eine Rotation der Körper hin. Bemerkenswert ist dabei die Tatsache, daß die Werte der Rotationsperioden unabhängig von der Masse der Körper im Durchschnitt bei 8 bis 9 Stunden liegen. Zieht man die Planeten in den Kreis der Betrachtungen ein, so ergibt sich überraschenderweise auch bei den großen Planeten eine Rotationsdauer von rund 10 Stunden. Die erdähnlichen Planeten weichen zwar von diesem Wert ab, doch ist,

abgesehen vom Mars, bei ihnen sicher, daß ihre heutigen Rotationsperioden von Gezeitenkräften beeinflußt wurden. Schließt man deshalb die letztgenannten Planeten von den weiteren Betrachtungen aus, so ergibt sich, daß die Rotationsperioden der Planetoiden und Planeten größenordnungsmäßig gleich sind, obwohl die Massen dieser Körper über den weiten Bereich von 10^{16} bis 10^{27} kg streuen. Dieser Befund führt zu einer Reihe wichtiger Schlußfolgerungen.

Die beobachteten Perioden können von keinem gegenwärtig noch wirksamen Prozeß beeinflußt werden. Weiterhin kann die Gleichheit der Perioden nicht mit der Rotationsstabilität der Körper zusammenhängen, da beispielsweise selbst die Riesenplaneten zur Zeit noch weit davon entfernt sind, rotationsmäßig stabil zu werden. Außerdem dürfte es sehr unwahrscheinlich sein, einen Mechanismus zu finden, der den entdeckten Zusammenhang gleicher Perioden mit der Frühgeschichte von Körpern sehr unterschiedlicher Masse in Verbindung bringen könnte. Hieraus folgt, daß die gefundenen Beziehungen auf kosmogonischen Ursachen beruhen müssen. Es scheint ein Prozeß wirksam gewesen zu sein, der die Rotationsperiode der Körper während ihrer Bildung unabhängig von ihrer Masse etwa gleichgroß hielt. Ein Abbremsvorgang kommt für die Erklärung der gleichen Rotationsdauer allerdings nicht in Frage. Sollte nämlich die Abbremsung der Körper in einem gleichförmig verteilten Medium erfolgt sein, dann hätten sich die Rotationsperioden der masseärmeren Planetoiden rascher vergrößert als die der massereichen Planeten. Die Beobachtungen lassen diesen Effekt nicht erkennen. Aus diesem Widerspruch darf man deshalb den in seinen Konsequenzen weitreichenden Schluß ziehen, daß sich das Sonnensystem in himmelsmechanischer Hinsicht im wesentlichen noch in dem Zustand befinden dürfte, der zur Zeit seiner Bildung vorherrschte.

Aus der Gleichheit der Rotationsperioden der Planetoiden folgt auch, daß ihre Entstehung kaum auf einer Explosion eines Planeten beruhen kann, weil dann eine Gleichverteilung der Rotationsenergie zu erwarten wäre. Das würde aber bedeuten, daß die kleineren Körper schneller rotieren als die masserei-

cheren. Wie aus den Beobachtungen hervorgeht, ist aber das gerade nicht der Fall.

Die hier dargestellten Überlegungen berühren im wesentlichen himmelsmechanische Probleme, die sich mathematisch durchrechnen lassen. Dafür können jetzt moderne Großrechenanlagen eingesetzt werden, die früher nicht zur Verfügung standen. Abgesehen davon darf nicht übersehen werden, daß die Weltraumforschung in den vergangenen Jahren zu einer starken Wiederbelebung des Interesses an der Himmelsmechanik geführt und auf diesem Gebiet zu einer Weiterentwicklung beigetragen hat.

Während noch bei den kosmogonischen Vorstellungen von Weizsäckers und Kuipers hydrodynamische und magnetische Erwägungen neu in den Kreis der Betrachtungen aufgenommen wurden, spielen in den modernen Kaltentstehungshypothesen himmelsmechanische Überlegungen unter neuen Aspekten wieder eine zumindest gleichbedeutende Rolle.

Nach der Hypothese von Alfvén sollen sich Materiezusammenballungen in der Gaswolke, von der die Sonne umgeben war, dort konzentriert haben, wo sich später die Urplaneten bildeten. Welche Prozesse hierbei wirksam waren, ist noch ungeklärt. In diesem Zeitraum mußte auch die Abführung des Drehimpulses der Sonne in das umgebende Plasma erfolgen. Dabei spielten offenbar magnetohydrodynamische Effekte eine Rolle, auf die hier nicht noch einmal genauer eingegangen werden muß, da sie bereits bei der Darstellung der Kuiperschen Hypothese Erwähnung fanden. Bei der Abkühlung der die Sonne umgebenden Gaswolke soll die Bildung der Staubteilchen bzw. Flüssigkeitstropfen eingesetzt haben. Diese Partikel stellen somit das Baumaterial der Körper des Sonnensystems dar.

Die Staubteilchen vereinigten sich nach dieser Auffassung zu etwas größeren Aggregaten, den Planetesimalen, die entsprechend der Dichteverteilung in der Staubwolke in den Gebieten gehäuft auftraten, wo sich später die Planeten bildeten. Die bis zu einigen Metern großen Planetesimale bestanden aus einem lockeren Gefüge von Staubteilchen, deren Zwischenräume mit gefrorenen leichten Gasen ausgefüllt wa-

ren. Mit einiger Berechtigung kann man von den Planetesimalen als großen „schmutzigen Schneebällen“ sprechen.

Die Bewegungen dieser Körper um die Sonne erfolgten nach den Gesetzen der Himmelsmechanik. In den dichteren Gebieten der Staubwolke vereinigten sich die Teilchen zu größeren Körpern. Von ihnen gingen Anziehungskräfte aus, die Bahnstörungen bei den umliegenden Staubteilchen verursachten. Dabei kam es nicht allein zu Zusammenstößen zwischen den noch kleinen Urplaneten, sondern auch zu Begegnungen mit kleinen Teilchen, nach denen diese anschließend den Planeten umkreisten. Nach einer gewissen Zeitspanne waren die Urplaneten von einer ziemlich dichten Staubwolke umgeben, aus der es unaufhörlich – über einen Zeitraum von einigen hundert Millionen Jahren – Staubteilchen auf die Planetenoberfläche „regnete“. In dieser Entwicklungsphase soll beispielsweise der Erddurchmesser etwa um 2 bis 5 cm im Jahr angewachsen sein. Diese Periode schloß mit einer katastrophenartigen Folge von Einschlägen relativ massereicher Meteoriten auf die Planetenoberfläche ab.

Das Problem der Massenaufsammlung wurde zum Teil durch himmelsmechanische Berechnungen untersucht, aber noch nicht völlig gelöst. So ist gegenwärtig noch nicht klar, wie die bei fast allen Planeten beobachtbare gleichsinnige Rotationsrichtung zustande kam. Weiterhin ist ungeklärt, warum sich ein so hoher Prozentsatz der Gesamtmasse der Planetenkörper im Gebiet der jupiterähnlichen Planeten angesammelt hat und so wenig Masse im Asteroidengürtel. Nicht zuletzt ist die Frage nach der Bildung des Saturnringes und die Frage, warum allein der Saturn von einem Ringsystem umgeben ist, von großem Interesse.

Dem Zusammenschmelzen der Planetesimalen zu festen Planetenkörpern stehen keine theoretischen Gründe entgegen. Die dazu notwendige Energie dürfte zum Teil aus der beim Zusammenstoß in Wärme umgewandelten Bewegungsenergie der Staubpartikeln und vor allem aus der radioaktiven Aufheizung stammen, die damals viel größer war als jetzt.

Die Kaltentstehungstheorie kann in ein einfaches Entwicklungsschema gebracht werden:

↗ Planeten
↘ Asteroiden.

Plasma → Staubteilchen → Planetesimale → Satelliten

Es ist etwas komplizierter als ein Schema für die Entwicklung des Sonnensystems nach den Hypothesen von Weizsäckers und Kuipers.

Die Einschätzung der verschiedenen, hier dargestellten kosmogonischen Vorstellungen ist nicht einfach. Fest steht jedoch, daß man gegenwärtig weit davon entfernt ist, von einer kosmischen Hypothese sprechen zu können, die allein für die Erklärung der kosmogonischen Vorgänge im Frühstadium unseres Sonnensystems in Frage käme. Gewiß ist aber auch, daß die ausgearbeiteten modernen Planetenkosmogonien aus dem Zustand wissenschaftlicher Spekulation heraus sind. Ein wesentlicher Faktor dieses Erkenntnisprozesses ist eine sichere erkenntnistheoretische und methodologische Grundlage, die von der objektiven Existenz der Materie außerhalb unseres Bewußtseins und von ihrer Unerschöpflichkeit ausgeht. Die Lösung der noch ungeklärten Fragen dürfte in den kommenden Jahren zur weiteren Verbesserung der einen oder anderen Hypothese beitragen oder zum Ausschluß anderer aus dem Kreis der diskussionswürdigen Theorien führen. Zur Zeit ist man geneigt, der Theorie von der Kaltentstehung den Vorrang einzuräumen.

Es wurde bereits erwähnt, daß bestimmte Beobachtungen naher Sterne auf die Existenz von dunklen Begleitern hinweisen. Nach den Massebestimmungen dürfte es sich dabei um Körper handeln, deren Massen in der Größenordnung von 2 bis 20 Jupitermassen liegen. Im Bereich der unteren Massengrenze kann man mit einiger Berechtigung noch von Großplaneten sprechen, an der oberen Grenze liegt aber schon der Übergang zu den schwarzen Zwergen. Es ist denkbar, daß die betreffenden Sterne nicht nur von den mehr oder weniger sicher nachgewiesenen Großplaneten, sondern auch von Körpern mit etwas kleineren Massen umkreist werden, wie es im Sonnensystem der Fall ist. Sollte diese Vermutung richtig sein, dann wäre man berechtigt, von anderen „Sonnen“- bzw. Planetensystemen zu sprechen. Soweit das hierfür vor-

liegende Beobachtungsmaterial schon eine Statistik zuläßt, ist in der unmittelbaren Sonnenumgebung mit rund 50% Wahrscheinlichkeit damit zu rechnen, daß ein Stern von einem Planetensystem umgeben ist. Nach anderen Schätzungen, die sich allerdings auf das ganze Milchstraßensystem beziehen, besitzt nur jeder 1000. Stern ein „Sonnen“-system. Bei einer Gesamtzahl von etwa 10^{11} Sternen im Milchstraßensystem hätte man demnach mindestens die Existenz von ungefähr 10^8 Sonnensystemen zu erwarten. Diese Überlegungen erfahren durch eine andere Beobachtungstatsache eine indirekte Stütze. Gemeint ist hierbei die Beziehung zwischen den mittleren Rotationsgeschwindigkeiten der Sterne und ihrem Spektraltyp. Ungefähr beim Spektraltyp F2 (siehe Abb. 7) tritt eine rapide Abnahme der Rotationsgeschwindigkeiten ein. Sie ist eventuell das Ergebnis einer magnetischen Abbremsung der Sterne in einer sie umgebenden Gaswolke, aus der sich zu einem späteren Zeitpunkt ein „Sonnen“-system formen konnte. Falls nämlich die Sterne der Spektraltypen F2 und später während ihres Kontraktionsstadiums nicht einen beträchtlichen Teil ihres ursprünglichen Drehimpulses abgegeben hätten, müßten sie noch Rotationsgeschwindigkeiten besitzen, die in der Größenordnung einiger 100 km/s liegen. Auf die interessante Frage, auf wievielen der hypothetischen Planeten sich Leben gebildet hat, läßt sich gegenwärtig noch keine wissenschaftlich fundierte Antwort geben. Hier sind den Spekulationen noch keine allzu engen Grenzen gesetzt.

Doppelplanet Erde-Mond

Bei der Besprechung der verschiedenen Vorstellungen über die Entstehung des Sonnensystems wurde das System Erde-Mond bisher noch nicht erörtert. Es stellt nämlich einen gewissen Sonderfall dar, der den Rahmen der allgemeinen Hypothesen sprengt. Wenn man die Massen von Mond und Erde ins Verhältnis setzt, ergibt sich der relativ hohe Wert von rund 1:81. Bildet man entsprechende Massenverhältnisse für andere Satellitensysteme, so liegen deren Werte zwischen 1:800 (im Fall

Triton : Neptun) und 1 : 100 000. Es ist daher nicht unbegründet, beim System Erde-Mond von einem Doppelplaneten zu sprechen. Über seine Entstehung gibt es drei grundsätzlich verschiedene Vorstellungen. Nach der einen trennte sich der Mond von der heutigen Erde ab, bzw. der Protoplanet spaltete sich in die Erde und den Mond. Es wäre aber auch denkbar, daß sich beide Körper gleichzeitig parallel bildeten. Der Mond könnte aber auch ursprünglich ein selbständiger Planet gewesen sein, den die Erde später einfing.

Für die erforderlichen himmelsmechanischen Berechnungen aller erwähnten Bildungsmöglichkeiten des Doppelplaneten Erde-Mond bestehen günstige Voraussetzungen. Besonders hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang die zwischen beiden Körpern bestehende Gezeitenwirkung, die hauptsächlich die Bewegungsverhältnisse seit etwa 10^9 Jahren entscheidend beeinflußt hat. Da man die Wirkung der vom Mond, aber auch der von der Sonne ausgehenden Gezeitenkräfte genau kennt, besteht die Möglichkeit, den Bewegungszustand des Systems Erde-Mond bis weit in die Vergangenheit zurück rechnerisch zu verfolgen.

Das Problem der Gezeitenwirkung wurde von G. Darwin gegen Ende des 19. Jahrhunderts aufgegriffen und in einigen grundlegenden Arbeiten behandelt. Er untersuchte eingehend die von Ebbe und Flut hervorgerufenen Reibungskräfte auf dem Meeresboden und kam zu dem Ergebnis, daß sie eine Verlangsamung der Erdrotation verursachen müßten. Das bedeutet nicht nur einen Verlust an kinetischer Energie, sondern auch eine Verringerung des Drehimpulses der Erde. Da in einem geschlossenen System der Drehimpulserhaltungssatz gültig ist, bekommt der Mond den Drehimpulsanteil, der der Erde durch die Abbremsung der Rotation verlorenggeht. Deshalb vergrößert sich die Mondbahn, und nach dem 3. Keplerschen Gesetz wird auch die Dauer des Monats länger. Rechnet man auf der Grundlage dieser Überlegungen in die Vergangenheit zurück, dann ergibt sich, daß der Mond der Erde früher viel näher war als heute. Dehnt man die Berechnungen bis zu dem Zeitpunkt in der Vergangenheit aus, in dem die Erde noch den gesamten Drehimpuls des Systems

besaß, so erhält man für ihre Umdrehungszeit eine Dauer von 4 Stunden. Da die Gezeitenwirkung der Sonne ebenfalls berücksichtigt werden muß, befand sich die Erde in diesem Stadium möglicherweise an der Grenze ihrer mechanischen Stabilität. Dabei soll es infolge der Überlagerung der verschiedenen Kräfte zunächst zu einer Deformation des Erdkörpers gekommen sein, die mit der Abtrennung der Mondmasse endete.

Gegen die Darwinsche Hypothese wurden einige himmelsmechanische Einwände erhoben. Zu ihnen kommen jetzt die mineralogischen Befunde, die man bei der Untersuchung von Mondgestein erhielt. Wenn es auch in chemischer Hinsicht dem irdischen Gestein recht ähnlich ist, so gibt es doch mineralogische Unterschiede, die ausschließen, daß sich die Minerale von Erde und Mond unter gleichen Bedingungen bildeten, wie es bei einer gemeinsamen Entstehung zu erwarten wäre.

Bei der Doppelplanethypothese sollen sich beide Körper etwa gleichzeitig und auf Grund des gleichen Entstehungsmechanismus gebildet haben. Nimmt man hierfür den gegenwärtig bevorzugten Prozeß der Kaltentstehung an, so wäre der Aufbau prozeß der Planeten aus den Planetesimalen zu betrachten. Es müßten in der Nachbarschaft unseres Planeten noch relativ große Körper gewesen sein, die sich nicht mit der Urerde vereinigten, sondern einen Satelliten bildeten. Seine Größe blieb dabei mehr dem Zufall überlassen. Die mathematische Formulierung der damit verbundenen Probleme ist nicht einfach. Schwer verständlich ist auch, weshalb die mittlere Dichte der Erde mit $5,52 \text{ g/cm}^3$ merklich größer ist als die des Mondes mit $3,34 \text{ g/cm}^3$. Zur Erklärung des Befundes müßte ein Mechanismus gefunden werden, nach dem sich beim Aufbau eines Doppelplaneten die schwereren chemischen Elemente gerade in der massereicheren Komponente konzentrieren, während der masseärmeren Komponente die leichteren Elemente zukommen. Diese Schwierigkeit wird jedoch beseitigt, wenn man annimmt, daß die Erde von einer dichten Staubwolke umgeben war, aus der sich später der Mond bildete. Genaugenommen ist das aber keine Entstehung eines Doppelplaneten mehr, da die Urerde schon etwa 30 bis 50% ihrer heutigen Masse be-

sitzen mußte, um in ihrem Schwerfeld genügend Staubmaterial konzentrieren zu können.

Als dritte Möglichkeit der Erklärung des Systems Erde-Mond bleibt noch die Einfanghypothese zu diskutieren. Dieses Problem läßt sich mathematisch unter bestimmten Voraussetzungen relativ einfach behandeln. Hierzu gehört die Annahme, daß nur zwei der drei Körper, nämlich die Sonne und die Erde, bemerkenswerte Massen besitzen, der Mond aber praktisch masselos ist und deshalb auch keine Anziehungskraft auf die beiden anderen ausübt. Ferner wird angenommen, daß sich die Sonne und die Erde auf Kreisbahnen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Aus den himmelsmechanischen Untersuchungen ergab sich, daß die Erde von einer geschlossenen Potentialfläche umgeben ist, die der Mond nicht überqueren kann. Da sich nun der Mond innerhalb dieser Fläche befindet, ist er nicht in der Lage, sich völlig von der Erde zu entfernen. Andererseits konnte er aber auch nicht von außen her in Erdnähe gekommen sein. Dieses theoretische Ergebnis beruht, wie bereits gesagt, auf der einschränkenden Voraussetzung, daß sich Sonne und Erde auf genau kreisförmigen Bahnen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Die Annahme ist jedoch nicht ganz richtig, denn die Erde bewegt sich tatsächlich in einer kreisähnlichen Ellipse um den Schwerpunkt. Wird diese Tatsache bei den Berechnungen berücksichtigt, dann bleibt in der erwähnten kritischen Potentialfläche ein kleines „Schlupfloch“ für einen von außen kommenden Körper. Die bisher vorhandene prinzipielle Schwierigkeit bei der Einfanghypothese ist damit beseitigt. Trotz allem bleibt das Einfangen des Mondes noch an sehr einschränkende Bedingungen gebunden.

Wie entsprechende theoretische Untersuchungen ergaben, bewegte sich der Mond nach seinem hypothetischen Einfangen höchstwahrscheinlich auf einer Bahn, die ihn über die Erdpole führte. In dieser Phase der Erdentwicklung verursachte die Anziehungskraft der Sonne eine Verkürzung der Erdrotation. Bei der Übertragung des Drehimpulses von der Erde zum Mond kam es zu Änderungen seiner Bahn. Sie schrumpfte ständig und drehte sich gleichzeitig in die Äquatorebene der

Erde. Als der Mond die Erde nur noch in einer Entfernung von 2,9 Erdradien umkreiste, kehrten sich in gewisser Weise die Verhältnisse um. Die Bahn des Mondes vergrößerte sich wieder, und es begannen jetzt die Gezeitenprobleme eine Rolle zu spielen, die bereits von Darwin, allerdings unter etwas anderen Voraussetzungen, untersucht worden waren. Die modernen Berechnungen zu diesem Problem gehen allmählich in die alten Ergebnisse von Darwin über, nach denen sich der Mond langsam von der Erde entfernt.

Nachdem das Einfangproblem zumindest grundsätzlich geklärt ist, bleibt aber immer noch die Frage unbeantwortet, woher der Mond stammt. Damit taucht wieder eine speziell kosmogonische Fragestellung auf, deren Beantwortung heute jedoch noch aussteht.

Der wesentliche Fortschritt in der Diskussion um die Entstehung des Systems Erde-Mond ist darin zu sehen, daß die schon von Darwin aufgestellte Abtrennungshypothese jetzt als widerlegt gilt. Zwischen der Einfanghypothese und der Doppelplanethypothese ist gegenwärtig noch keine Entscheidung darüber möglich, welche der beiden Vorstellungen die richtige ist.

Mond

Den großen technischen Anstrengungen der beiden in der Weltraumforschung führenden Nationen, der UdSSR und den USA, ist es zu verdanken, daß unser Trabant der unmittelbaren Erforschung zugänglich gemacht wurde. Im Rahmen des amerikanischen Apollo-Programms betraten 1969 die ersten Menschen den Mond. Nur kurze Zeit später gelang es sowjetischen Wissenschaftlern, eine automatische Station auf der Mondoberfläche zu landen und anschließend mit Gesteinsproben zur Erde zurückzuführen. Diesen großartigen Raumfahrtserfolgen schlossen sich in der Folgezeit weitere bemannte Expeditionen an. Von der Sowjetunion wurde ein mobiles Laboratorium auf unserem Trabanten abgesetzt, das einen weiteren Meilenstein in seiner Erforschung mit Hilfe von Automaten darstellt.

Die insgesamt von den verschiedensten Typen von Raumflugkörpern ausgeführten Messungen und Untersuchungen des Mondes und des mondnahen Raumes haben die Kenntnisse über unseren Begleiter entscheidend erweitert.

So konnte von verschiedenen Mondsatelliten und anderen Raumflugkörpern aus die gesamte Mondoberfläche mit einem bisher nicht erreichten Auflösungsvermögen photographiert werden. Anhand dieser Aufnahmen wird eine Untersuchung von Oberflächenstrukturen auf einer wesentlich besseren Grundlage möglich.

In mehr als 10 über die sichtbare Hemisphäre des Mondes verteilten Gebieten wurden Bodenproben entweder an Ort und Stelle mit physikalischen Methoden untersucht oder sogar zur Erde zurückgebracht. Aus den Ergebnissen der durchgeführten Gesteinsanalysen konnten eine Reihe wichtiger Schlüsse über die frühe Geschichte des Mondes gezogen werden. Die chemische Zusammensetzung einiger analysierter Gesteinsproben und ihr Kristallisationsalter sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Beim Vergleich der gewonnenen Daten mit irdischem Gestein zeigt sich, daß Basalt in chemischer Hinsicht dem Mondgestein noch am ähnlichsten ist. In Hinsicht auf die kristalline Beschaffenheit zeigen sich bedeutende Unterschiede. Sie sind so groß, daß die Bildung des Mondes durch ein Ablösen vom Erdkörper vor einigen Milliarden Jahren ausgeschlossen werden kann.

Die Bodendecke, der Regolith, hat eine basaltische Zusammensetzung. Er besteht aus Gesteinen, Mineralen sowie aus Glas und Meteoritenbruchstücken. Sie tragen jedoch weniger als 2% zur Gesamtmasse des Regoliths bei.

Im Regolith wurde auch Anorthosit, ein Feldspatgemenge, gefunden, der als typisches Gesteinsmaterial der entwicklungsgeologisch älteren Hochlandsgebiete angesehen wird.

Über den inneren Aufbau des Mondes lassen sich zur Zeit nur Vermutungen anstellen. Da die Dichte des Silikatgesteins an der Mondoberfläche mit $3,3 \text{ g/cm}^3$ etwa der mittleren Dichte des Mondes gleichkommt, sollte er einen Mantel aus nicht-basaltigem Material haben, der eventuell einen kleinen Eisen-

Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung der Gesteinsproben vom Mond und ihr Kristallisationsalter (Angaben in Massenprozent bzw. Jahren)

Verbindung	Apollo 11 durchschnittlicher Basalt	Apollo 12 typischer Basalt	Luna 16 Basalt	irdischer Basalt Durchschnittswert	Apollo 11 typische Anorthosit- Gabbro	Surveyor 7 Bodenanalyse bei Krater Tycho
SiO ₂	40.4	46.9	43.8	49.2	46.0	46.1
TiO ₂	10.9	3.3	4.9	1.9	0.3	0.0
Al ₂ O ₃	9.4	10.1	13.7	15.8	27.3	22.3
FeO	19.3	19.8	19.4	10.7	6.2	5.5
MgO	7.2	7.8	7.1	6.6	7.9	7.0
CaO	11.1	10.7	10.4	10.0	14.1	18.3
Na ₂ O	0.5	0.3	0.4	2.7	0.3	0.7
K ₂ O	0.2	0.1	0.2	1.0	Spuren	nicht nachgewiesen
Cr ₂ O ₃	0.3	0.5	0.3	0.0(3)	0.2	„
MnO	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	„
Kristallisationsalter	3.7 · 10 ⁹	2.8 bis 3.2 · 10 ⁹	4.5 · 10 ⁹			

kern umschließt. Als Mantelmaterial muß man Basalte ausschließen, da sie unter hohen Drucken in eine noch dichtere Phase übergehen. Dagegen könnten Anorthosite mit ihrer kleineren Dichte von $2,8 \text{ g/cm}^3$ für den angestrebten Ausgleich in der mittleren Dichte des gesamten Mondes sorgen.

Genauere Aufschlüsse über die innere Struktur unseres Trabanten sind zu erwarten, wenn die Anzahl der von den Seismometern registrierten Erschütterungen genügend angewachsen ist, um eine eingehende Analyse zuzulassen.

Als wesentlichen Vorgang bei der Bildung der uns geläufigen Strukturen der Mondoberfläche sieht man Meteoriteneinschläge an. Bei den Meteoritenaufstürzen wird die ursprüngliche, aus Anorthositen bestehende Kruste durchschlagen und von den Einschlagstellen aus mit Magma überflutet. Auf diese Weise sollen sich die Mondmeere gebildet haben. Im Mare Imbrium lassen sich insgesamt acht Überflutungen unterscheiden. Durch den intensiven Meteoritenbeschuß wurden vulkanische Vorgänge ausgelöst. Diese Ereignisse fallen in die ersten 1 bis $1,5 \cdot 10^9$ Jahre der Mondgeschichte. Danach blieb die Mondoberfläche im Großen nahezu unverändert. Der unterschiedliche Erhaltungsgrad der Mondkrater weist darauf hin, daß aufschlagende Meteoriten bis in die jüngste Zeit hinein für kleinere Veränderungen der Oberfläche sorgen.

Das große Interesse, das man der Erforschung des Mondes entgegenbringt, rührt nicht zuletzt davon her, daß seine Oberfläche wahrscheinlich der der Erde vor ungefähr $4 \cdot 10^9$ Jahren ähnelt. Damals setzten auf der Erde durch Verwitterung und die Tätigkeit von Organismen geochemische Kreisläufe ein, die die Erdkruste zu der umgestalteten, die wir vorfinden.

Sternsysteme

Beobachtungsdaten

Als Sternsysteme (Galaxien) werden größere Ansammlungen von Sternen und interstellarer Materie bezeichnet, die entwicklungsmäßig eine Einheit bilden. Die wahre Natur der Galaxien, die zuweilen auch Spiralnebel genannt werden, wurde erst Mitte der zwanziger Jahre unseres Jahrhunderts erkannt, als in einigen von ihnen Pulsationsveränderliche entdeckt werden konnten. Die daraufhin möglichen Entfernungsbestimmungen bewiesen, daß sich diese veränderlichen Sterne und damit auch die Spiralnebel in sehr großer Entfernung von unserer Galaxis, dem Milchstraßensystem, befinden müssen. Es bestätigte sich die lange vorher geäußerte Vermutung, daß die Spiralnebel weit entfernte Sternsysteme sind. Die beiden schon mit bloßem Auge am Südhimmel sichtbaren Magellanschen Wolken sind ebenfalls Galaxien, die gemeinsam mit unserem Milchstraßensystem eine Dreiergruppe bilden.

Die vom Einfluß der interstellaren Verfärbung befreiten Beobachtungsdaten zeigen eine nahezu gleichmäßige Verteilung der Galaxien an der Himmelskugel. In einigen Richtungen ist jedoch die Zahl der Galaxien überdurchschnittlich groß. Diese Ansammlungen sind Haufen bzw. lockere Gruppen von Sternsystemen. Dem größten bisher beobachteten Haufen gehören rund 2500 Galaxien an. Er liegt im Sternbild Jungfrau.

Die Anzahl der Sternsysteme steigt beim Übergang zu geringen Helligkeiten rasch an und übertrifft in manchen Gebieten des Himmels von einer bestimmten scheinbaren Helligkeit an sogar die Zahl der auf den Aufnahmen ebenfalls mit abgebildeten Sterne unseres Sternsystems.

Die Fortschritte, die in den letzten Jahren bei der Erforschung

der Sternentwicklung erreicht worden sind, stellen einen wesentlichen Beitrag zur Erkenntnis der dabei wirksamen Prozesse dar. Da wir seit geraumer Zeit ganz sicher wissen, daß alle Sternsysteme vorwiegend aus Sternen aufgebaut sind, ist es ganz natürlich, nach der Entwicklung der Galaxien zu fragen, weil durch die Entwicklung der Sterne zwangsläufig die Entwicklung des gesamten Sternsystems beeinflußt wird.

Eine ähnliche Problemstellung war bereits bei allgemeinen Betrachtungen der Sternentwicklung aufgetaucht. Es ging dabei um die Beantwortung der Frage, ob im Milchstraßensystem die Rate der Sternentstehung immer den gleichen Wert hatte oder nicht. Als Antwort darauf ergab sich, daß in einem früheren Stadium der Galaxis mehr Sterne gebildet wurden als gegenwärtig.

Bevor jedoch auf die speziellen Probleme der Entwicklung von Sternsystemen eingegangen wird, sollen einige Größen besprochen werden, die sich unmittelbar oder mittelbar aus den Beobachtungen ergeben und zur Charakterisierung der Galaxien herangezogen werden können.

Der auf den photographischen Aufnahmen von Galaxien erkennbare Formenreichtum ist außerordentlich mannigfaltig, läßt aber auch fließende Übergänge erkennen. Bereits vor einigen Jahrzehnten ordnete E. Hubble die Sternsysteme nach ihrer morphologischen Struktur in ein Schema (siehe Abb. 26) ein, das in seinen Grundzügen auch gegenwärtig noch in Gebrauch ist. Darin sind die Galaxien in zwei unterschiedlich große Gruppen, in regelmäßig und unregelmäßig geformte Sternsysteme eingeteilt. Die häufigsten Objekte sind die regelmäßig gebauten Galaxien. Sie werden ihrerseits in zwei Untergruppen, die elliptischen Systeme (siehe Foto) sowie die normalen und balkenförmigen Spiralsysteme, eingeordnet. Eine weitere Aufgliederung der spiralförmigen Sternsysteme erfolgt durch Anhängen der Kleinbuchstaben a, b, c, die den zunehmenden Grad der Öffnung der Spiralarme kennzeichnen. Vom Milchstraßensystem nimmt man an, daß es ein Spiralsystem vom Typ Sb oder Sc ist.

Bei den elliptischen Systemen geschieht die Einordnung in das Hubblesche Schema nach dem Grad ihrer Abplattung. Die

nachgestellten Zahlen sind ein Maß für das Achsenverhältnis in den elliptischen Systemen.

Die scheinbare prozentuale Häufigkeitsverteilung der Galaxien verschiedenen Typs enthält Tabelle 9. Dort kommt klar zum Ausdruck, wie gering die Häufigkeit der irregulären Systeme gegenüber den regelmäßig gebauten ist. Natürlich stellen die Zahlen in Tabelle 9 nur Richtwerte dar, da die Klassifizierung gerade der entfernteren Sternsysteme oft recht schwierig ist und Verwechslungen der Typen möglich sind. Die tatsächliche Häufigkeit der Nebeltypen weicht aus verschiedenen Gründen, vor allem aber wegen ihrer unterschiedlichen absoluten Helligkeiten, gewiß von den in Tabelle 9 angegebenen Zahlenwerten ab.

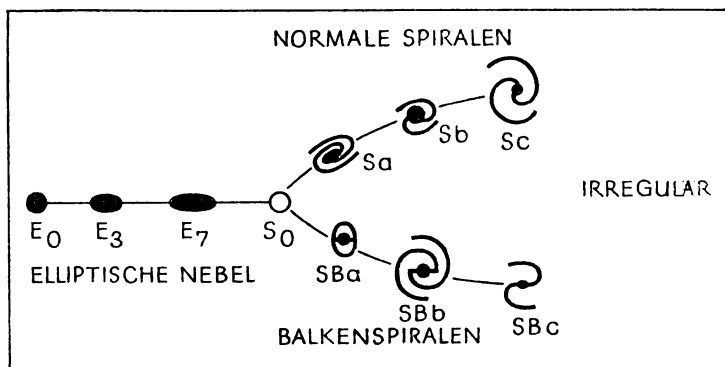


Abb. 26. Klassifikationsschema für Sternsysteme nach Hubble. Die Zahlen bei den elliptischen Systemen geben ein Maß für die Elliptizität.

Neben dem Hubbleschen Klassifikationsschema werden neuerdings auch einige andere Schemata verwendet. Sie lehnen sich in ihren Grundlagen an die ältere Hubblesche Klassifikation an, gehen aber noch mehr auf beobachtete Einzelheiten ein. So wird in einem Falle in Betracht gezogen, daß es außer den normalen und balkenförmigen Galaxien noch Zwischenformen gibt und daß zusätzlich zwischen echten Spiralen und Ringen zu unterscheiden ist. In einem anderen Klassifikationsschema wird berücksichtigt, daß die am weitesten geöffneten Spiral-

systeme offensichtlich die größten Leuchtkräfte besitzen. Auch die Konzentration der Helligkeit eines Sternsystems zu seinem Zentrum wird als Ordnungsparameter verwendet. Es zeigt sich nämlich, daß bei den Galaxien, die eine nahezu gleichförmige Lichtverteilung aufweisen, der Großteil des emittierten Lichtes von Sternen früher Spektraltypen stammt. Im Gegensatz dazu stammt die Strahlung der Galaxien, die sich durch einen hellen

Tabelle 9: Einige charakteristische Größen von Sternsystemen

Typ	E ₀ -E ₇	S0	Sa SBa	Sb SBb	Sc SBc	Ir
Häufigkeit in %	18		19	25	34	4
Masse-Leuchtkraft-Verhältnis	80	50	30	20	10	3
mittlerer Farbenindex (B-V)	+ 1,00		+ 0,92	+ 0,77	+ 0,67	+ 0,47
<u>Wasserstoffmasse</u> <u>Gesamtmasse</u>	kleiner 0,01		0,01	0,02	0,05	0,1
Spektraltyp des Kerngebietes	G 3	G 4	G 2	G 0	F 6	—

Kern und relativ dunkle Spiralarme auszeichnen, von Sternen späterer Spektralklassen. Man erkennt auch hieraus, daß zwischen den Sternsystemen zum Teil bemerkenswerte Unterschiede bestehen.

An Hand spektroskopischer Untersuchungen gelang der Nachweis, daß die Galaxien um ihr Zentrum rotieren. Die gefundenen systematischen Umlaufbewegungen der Sterne haben eine große Ähnlichkeit mit den Bewegungen der Planeten um die Sonne. Die inneren Teile der Sternsysteme rotieren rascher als die weiter außen liegenden.

Im Zusammenhang mit der Rotationsbewegung der Galaxien erhebt sich die Frage nach dem Windungssinn der Spiralarme. Prinzipiell gibt es die beiden Möglichkeiten, daß die Enden der

Spielarme bei der Rotation nachgezogen werden bzw. vorgehen. Eine Antwort auf das sehr wichtige Problem kann allein durch Beobachtungen von Linienverschiebungen in den Spektren der Sternsysteme und ihre Interpretation mit Hilfe des Doppler-Effektes nicht gegeben werden. Genau genommen verschieben sich die Spektren insgesamt; es ist aber einzusehen, daß sich der Verschiebungsbetrag exakt nur an den Spektrallinien feststellen läßt. Man kann sich überlegen, daß beide Rotationseinrichtungen die gleichen spektralen Dopplerverschiebungen verursachen.

Den durch die Rotationsbewegung hervorgerufenen Dopplerverschiebungen in den Spektren der Galaxien ist im allgemeinen noch ein systematischer Anteil überlagert. Er rührt von der Bewegung des gesamten Systems längs der Sichtlinie her. Die andere Komponente der Raumbewegung, die sich als Eigenbewegung der Galaxien durch Ortsveränderungen an der Himmelssphäre prinzipiell äußern müßte, liegt jedoch wegen der Kleinheit der Verschiebung infolge der enormen Entfernungen der Galaxien unter der Nachweisbarkeitsgrenze.

Bei der statistischen Auswertung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten der Sternsysteme entdeckte man, daß sie sich mit um so größerer Geschwindigkeit von uns entfernen, je weiter sie von uns entfernt sind. Dieser Zusammenhang zwischen der Entfernung und der Radialgeschwindigkeit wird als Hubble-Effekt bezeichnet. Die Zunahme der Radialgeschwindigkeit v der Galaxien mit wachsender Entfernung r beschreibt die einfache Beziehung

$$v = H \cdot r \text{ km/s,}$$

in der H die sogenannte Hubble-Konstante ist. Nach neueren Untersuchungen hat sie den Wert $H = 100 \text{ km/s Megaparsek}$ ($1 \text{ Megaparsek} = 10^6 \text{ pc}$). Der Fehler des Zahlenwertes beträgt noch $\pm 20 \text{ km/s Megaparsek}$.

Es ist naheliegend, in Analogie zu den Sternen die *Masse* eines Sternsystems als eine wichtige Zustandsgröße zu betrachten. Sie setzt sich aus der Summe der Sternmassen und dem Massenanteil der interstellaren Materie zusammen. Die Massenbestimmung von Galaxien ist dann möglich, wenn auf spek-

troskopischem Wege mit Hilfe des Doppler-Effektes Aussagen über die Rotationsbewegung des Systems gemacht werden können. Allerdings muß gewährleistet sein, daß in dem System nur kreisförmige Bewegungen vorkommen, die außerdem in einer Ebene erfolgen.

Das bis jetzt verfügbare geringe Beobachtungsmaterial zeigt keine eindeutige Beziehung zwischen den Galaxientypen und den Massen, wenn auch die Spiralsysteme hoher Leuchtkraft vom Typ Sb zu den massereichsten Objekten mit 2 bis $4 \cdot 10^{11}$ Sonnenmassen gehören dürften. Sie werden nur noch von den elliptischen Riesengalaxien übertroffen, deren Massen in der Größenordnung 10^{12} Sonnenmassen liegen. Dagegen scheinen die irregulären und kleinen elliptischen Systeme im Mittel geringere Massen zu besitzen. Die bei ihnen gefundenen Werte betragen 4 bis $10 \cdot 10^9$ Sonnenmassen. Soweit überhaupt schon Aussagen möglich sind, ist die Streuung der Massen innerhalb der einzelnen Typen von Sternsystemen relativ hoch.

Die *Leuchtkraft* einer Galaxis besteht aus der Gesamtheit der Leuchtkräfte aller Sterne. Sie wird in den unregelmäßigen und Spiralsystemen vor allem von den frühen Hauptreihensternen und Überriesen geprägt. Dagegen stammt bei den elliptischen Systemen der größte Teil ihrer Leuchtkraft von den roten Riesensternen und den Population-II-Sternen des horizontalen Riesenastes. Der unterschiedliche Anteil, den die verschiedenen Sterntypen zur Gesamtleuchtkraft beitragen, ist auch am Farbenindex der Sternsysteme zu erkennen (siehe Tab. 9). Während die irregulären Systeme und offenen Spiralen einen relativ kleinen Farbenindex haben, wächst er beim Übergang zu den elliptischen Systemen um mehr als das Zweifache an, was auf den steigenden Einfluß der roten Riesensterne hinweist.

Die Leuchtkräfte der Sternsysteme haben eine beträchtliche Streuung. Die größten Mittelwerte der absoluten Helligkeiten liegen bei den Sb- und Sc-Spiralen bei $M_{\text{phot}} \approx -21^m$. Die mittleren absoluten Helligkeiten der elliptischen und irregulären Systeme erreichen dagegen nur Werte im Bereich von $M_{\text{phot}} \approx -16^m$ bis -18^m .

Die von den Galaxien aufgenommenen *Spektren* sind eine Mi-

schung des von allen Sternen ausgehenden Lichtes, der eine Anzahl von Emissionslinien, die vom interstellaren Gas herühren, überlagert ist. Der Charakter des Spektrums eines Sternsystems wird davon beeinflusst, welche Sterne den größten Anteil an der Leuchtkraft der Galaxis beitragen. Dabei bestimmen die zwar zahlenmäßig seltenen, dafür aber absolut sehr hellen Sterne wesentlich das Aussehen des Spektrums. Ähnlich

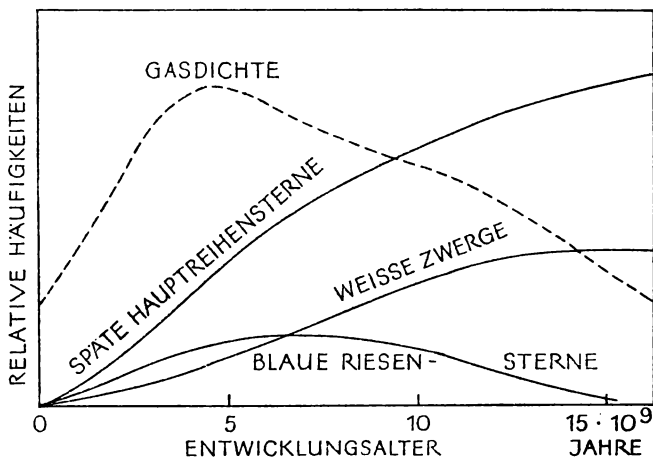


Abb. 27. Relative Häufigkeitsverteilung des interstellaren Gases, der späten Hauptreihensterne, weißen Zwerge und frühen Riesen im Laufe der Entwicklung von einer Gaswolke in ein Sternsystem (nach Th. L. Page).

wie der Farbenindex eines Sternsystems mit dem äußeren Aussehen variiert, ändert sich auch das Spektrum mit dem Typ der Galaxien. In Tabelle 9 sind die Spektraltypen für die Kerngebiete verschiedener Sternsysteme angegeben. Aus der Stärke der Absorptionslinien in den Spektren lassen sich in eingeschränktem Maße Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung vor allem der absolut sehr hellen Sterne in einer Galaxis ziehen.

Außer der im optischen Spektralbereich emittierten Strahlung senden die Sternsysteme auch im Radiofrequenzgebiet Energie aus. Bemerkenswerterweise ist das Verhältnis der im sicht-

baren Bereich abgegebenen Energie zu der im Radiogebiet ausgestrahlten bei den einzelnen Galaxien unterschiedlich groß. Es gibt Sternsysteme, deren Radiostrahlung intensiver ist als die optische Strahlung, aber auch solche, deren Radiostrahlung unter der Nachweisbarkeitsgrenze liegt.

Mit der laufenden Verbesserung des Auflösungsvermögens der

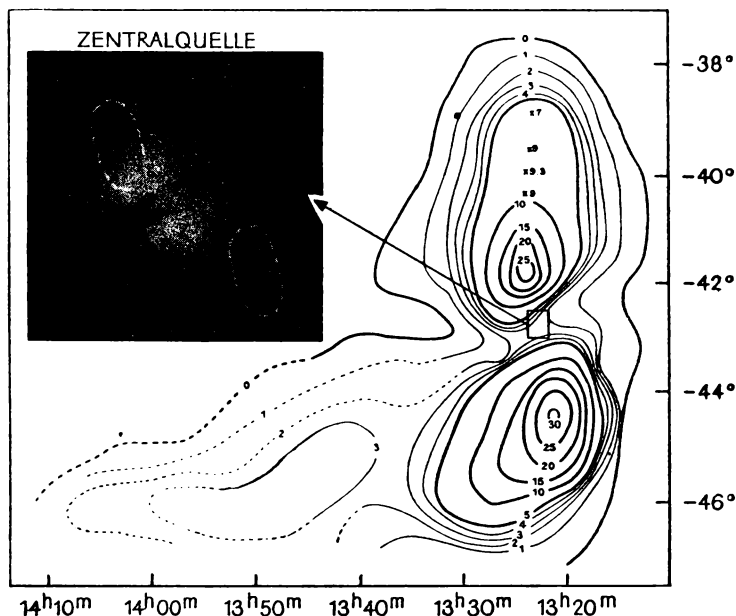


Abb. 28. Kombiniertes Bild der Radioquelle Centaurus A mit der Galaxis NGC 5128. Im rechten Teil sind die Radiointensitäten eingezeichnet, die Zahlenwerte sind ein Maß für die Intensität der Radiostrahlung. Die Linien verbinden die Punkte gleicher Strahlungsintensität. Die Radioquelle hat eine Winkelausdehnung von 8° in Deklination und 15 Zeitminuten ($= 3^\circ.75$) in Rektaszension. Das Rechteck im Innern der Zeichnung markiert die Lage des im linken Teil der Abbildung gezeigten optisch sichtbaren Objektes. Von ihm geht ebenfalls von einer Doppelquelle (in der Abbildung gestrichelt) Radiostrahlung aus. Die Radioquelle Centaurus A enthält somit zwei Doppelquellen, eine weniger getrennte und mit dem optisch sichtbaren Sternsystem zusammenfallende und eine weit außerhalb befindliche.

Radioteleskope wurden genauere Strukturuntersuchungen an den extragalaktischen Radioquellen möglich. Dabei ergab sich, daß die Radiostrahlung oft von zwei symmetrisch zum Kern der optisch sichtbaren Galaxis liegenden Gebieten emittiert wird (siehe Abb. 28). Nach den bisher vorliegenden Ergebnissen treten die starken extragalaktischen Radioquellen vorwiegend im Zusammenhang mit großen elliptischen Systemen auf, die zum Teil Doppel- oder Mehrfachsysteme sind.

Durch Radiobeobachtungen bei der Wellenlänge 21 cm gelang es, in einer Anzahl von Sternsystemen den neutralen Wasserstoff nachzuweisen und seinen Anteil an der Gesamtmasse abzuschätzen. Obwohl das Beobachtungsmaterial noch recht spärlich ist, deutet sich an, daß der Wasserstoffgehalt in den irregulären Systemen etwa zehnmal größer ist als in den elliptischen Systemen (siehe Tab. 9).

Eine ziemlich ausgeprägte Beziehung besteht zwischen der Masse und der Leuchtkraft der verschiedenen Typen von Sternsystemen. Bildet man das Verhältnis beider Größen, dann zeigt sich, daß es bei den elliptischen Systemen am größten ist. Beim Übergang zu den irregulären Systemen nimmt der Wert rasch ab. Diese Beziehung besagt, daß in den elliptischen Systemen der Anteil der Gesamtmasse, die in Objekten geringer Leuchtkraft vereinigt ist, bedeutend größer ist als in den irregulären Systemen. Dieser Zusammenhang ist für die Kosmogonie der Sternsysteme wichtig.

Bei der Besprechung von Beobachtungsgrößen an den Galaxien wurde bisher die Möglichkeit von Radiobeobachtungen nur am Rande erwähnt. Angesichts der sensationellen Entdeckung der optisch sternförmigen Radioquellen mag das ungerechtfertigt erscheinen. Es wird aber noch in einem besonderen Kapitel auf die vielfältige und größtenteils noch ungelöste Problematik näher eingegangen. Vorher wird noch versucht, die in Frage kommenden Entwicklungstendenzen der Sternsysteme darzustellen.

Von einer Theorie über die Bildung der Galaxien wird gefordert, eine Reihe von wichtigen Problemen widerspruchsfrei zu erklären. Hierzu gehören sowohl die Größe der Gesamtmassen und die Drehimpulse der Sternsysteme als auch ihre räumlichen Ausdehnungen und ihre Formen. Auch die Verteilung der Kugelsternhaufen um ein Sternsystem, die Beziehung zwischen den Raumgeschwindigkeiten von schnell bewegten Sternen und deren chemischer Zusammensetzung sollte die Theorie behandeln. Nicht zuletzt müßte eine solche Theorie in der Lage sein, die Ausbildung der Spiralarme zu erklären.

Unser gegenwärtiges Wissen über die Vorgänge bei der Entstehung und Entwicklung von Galaxien ist – verglichen mit den bisher auf dem Gebiet der Sternkosmogonie erreichten Ergebnissen – verhältnismäßig gering. Daher tragen die folgenden Überlegungen über die Entwicklung der Galaxien noch den Charakter von Arbeitshypothesen.

Über die Entstehungsmöglichkeiten der Sternsysteme existieren hinsichtlich des zeitlichen Ablaufs verschiedene Ansichten. So könnten sich sämtliche Galaxien in einem ganz frühen Entwicklungsstadium des Weltalls in der auf die heiße Phase folgenden Expansion geformt haben. Es ist aber auch denkbar, daß nicht alle Galaxien in diesem Zeitraum entstanden, sondern eine Minderheit von „Nachzüglern“ sich erst später bildete. Dieser Fall wäre auch verwirklicht, wenn zwar die Protogalaxien frühzeitig entstehen, sich danach aber keine massereichen Sterne bilden und so eine Verzögerung in der Entwicklungsgeschwindigkeit der gesamten Galaxis eintritt. In diesem Zusammenhang ist es erforderlich, zwischen dem Bildungsalter und dem Entwicklungsalter der Sternsysteme zu unterscheiden. Schließlich wäre es aber auch möglich, daß fortwährend Sternsysteme neu entstehen und sich entwickeln, so daß man räumlich benachbarte alte und junge Systeme vorfindet.

Wir kommen an dieser Stelle wieder auf Überlegungen zurück, die eng mit kosmologischen Fragen verknüpft sind. Im besonderen geht es hierbei um den Zustand des Weltalls im Frühstadium unserer Entwicklungsepoche, worüber die Ansichten

noch auseinandergehen. Wir wollen diese Problematik jedoch nicht weiter verfolgen. Unsere Bemerkungen sollen nur auf den engen Zusammenhang von astronomischer Forschung und kosmologischen Problemen hinweisen.

Abgesehen vom zeitlichen Ablauf der Bildung von Sternsystemen, liegen auch unterschiedliche Auffassungen über den physikalischen Zustand der „Ur“-materie vor, aus der die Galaxien entstanden. Ähnlich wie bei der Sternentstehung könnten sich die Galaxien sowohl aus der Verdichtung weitverteilter Materie geringerer Dichte als auch aus Körpern geringer Ausdehnung, aber hoher Dichte bilden. Für beide Vorstellungen lassen sich Argumente vorbringen. Beispielsweise spricht für die Entstehung aus feinverteilter Materie die Tatsache, daß es Sternsysteme gibt, die einen sehr großen Drehimpuls haben. Wenn sich Galaxien durch die Kondensation diffuser Materie bilden, dann ist damit zu rechnen, daß die Protogalaxien von Anfang an einen geringen Drehimpuls besaßen, der bei ihrer Kontraktion zu der beobachteten raschen Umdrehung führte. Auf der anderen Seite lassen sich das bei einer Reihe von Sternsystemen nachgewiesene Ausströmen von Materie aus ihren Kernen und die teilweise explosionsartigen Vorgänge in den Kerngebieten besser durch die Bildung von Galaxien aus kleinen, dichten Körpern erklären. Von den beiden gegensätzlichen Hypothesen werden wir zunächst die der Kondensation von diffuser Materie betrachten.

Die Kontraktion der sehr ausgedehnten heißen „Ur“-Gaswolke könnte mehr als $10 \cdot 10^9$ Jahren eingesetzt haben. Mit der damit verbundenen Dichtzunahme erhöhte sich im Laufe der Zeit die Wahrscheinlichkeit für Stöße zwischen Protonen und Elektronen, und es kam in zunehmendem Maße zur Abstrahlung der dabei ausgetauschten Energien. Auf diese Weise trat eine Abkühlung der Gaswolke ein; der Gasdruck verringerte sich. Dadurch stürzte die außen befindliche Materie in Richtung auf das Schwerezentrum, und die Kontraktion ging mit erhöhter Geschwindigkeit weiter. In einem bestimmten Stadium endete jedoch die Kontraktion der Gaswolke als Ganzes. Sie zerfiel in einige Untergebiete, in denen sich anschließend die Kontraktion getrennt fortsetzte. Die potentielle Energie

der Urwolke wurde bei dem Auseinanderbrechen zum Teil in kinetische Energie der Wolkenfragmente umgewandelt.

Die Kontraktion der Untergebiete endete mit einer weiteren Teilung. Dabei entstanden Gaswolken, die als Protogalaxien angesehen werden. Jede der gebildeten Protogalaxien kühlte sich in der Folgezeit durch frei-freie und gebunden-freie Übergänge des Wasserstoffs ab und kontrahierte weiter. Dabei formten sich wahrscheinlich auch die Massenansammlungen innerhalb der Wolke, aus denen später die Kugelsternhaufen hervorgingen. Da in dieser Entwicklungsphase die Gaswolke noch weitgehend kugelsymmetrisch sein dürfte, verteilen sich die im Zustand der Bildung befindlichen Kugelsternhaufen in einen etwa sphärischen, auch als Halo bezeichneten Raum. Um diese Zeit entstand wahrscheinlich aus den kontrahierenden Gaswolken auch die erste und damit älteste Sterngeneration. Diese Objekte füllen ebenfalls einen kugelförmigen Raum aus.

In dem geschilderten frühen Entwicklungsstadium der Galaxien spielt die chemische Zusammensetzung der Materie eine wichtige Rolle, da die Abkühlung der Materie wesentlich von ihrem Metallgehalt bestimmt wird. Falls er hoch ist, geht die Abkühlung verhältnismäßig schnell vor sich; das bedeutet aber, daß für die anschließende Verdichtung der Gaswolken günstige Voraussetzungen bestehen, was sich für den Prozeß der Sternentstehung vorteilhaft auswirkt.

Bei der weiteren Kontraktion flachten sich die jungen Galaxien zusehends ab, während die schon vorhandenen Kugelsternhaufen und die etwa gleichzeitig mit ihnen gebildeten Sterne der alten Population II den Halo ausfüllten.

Die Abplattung einer Protogalaxis dürfte von ihrer Gesamtenergie, ihrem Drehimpuls und ihrer Masse im Stadium vor der Sternbildung abhängen.

Die Entwicklungsphasen, in denen der Hauptteil der Sterne entstand, sollen nun ein wenig unter dem Aspekt der beobachteten Formen der Galaxien betrachtet werden. Der Gedanke, in den Hubbleschen Klassifikationstypen einen Ausdruck ihres Entwicklungszustandes zu sehen, stammt von H. Shapley. Ursprünglich verfolgte Hubble bei der Aufstellung dieses Schemas nur die Absicht, eine Klassifikationsvorschrift zu schaffen. Die

Hubbleschen Typen der Sternsysteme, in gleicher Weise auch die Typen in den Klassifikationsschemata anderer Astronomen, zeigen fließende Übergänge und suggerieren damit bestimmte Entwicklungstendenzen. Es ist aber auch nicht ausgeschlossen, daß die Sternsysteme im Laufe ihrer Entwicklung keine merkbaren Formveränderungen durchmachen und das von ihrer Bildung stammende äußere Aussehen in der Folgezeit unverändert beibehalten. Dieser Gesichtspunkt ist nicht unwichtig und darf nicht übersehen werden, wenn auch in den folgenden Überlegungen von dem Gedanken der Formveränderungen der Galaxien im Laufe ihrer Entwicklung Gebrauch gemacht wird.

Wie aus den Beobachtungen zu entnehmen ist, ändert sich die Sternbevölkerung mit dem Galaxientyp in bemerkenswerter Weise. So ist in den irregulären Systemen, aber auch in den normalen und balkenförmigen Spiralsystemen vom Typ Sc, SBc, der Gehalt an absolut hellen Sternen frühen Spektraltyps verhältnismäßig hoch. Diese Sternsysteme besitzen auch eine größere Menge interstellarer Materie. Man neigt daher zu der Ansicht, daß die irregulären Systeme ein frühes Entwicklungsstadium der Galaxien darstellen, in welchem die Sternentstehung gerade eingesetzt hat. In solchen Systemen beobachtet man auch ausgedehnte Gebiete, in denen der interstellare Wasserstoff durch die heißen O-Sterne ionisiert ist und selbst leuchtet, also Merkmale, die in unserem Milchstraßensystem von den extrem jungen Objekten der Population I hervorgebracht werden.

In den Spiralsystemen vom Typ Sb ist die Hauptphase der Sternentstehung bereits vorüber. Auch der Prozentsatz der interstellaren Materie ist etwas kleiner als bei den Sc- und SBc-Systemen. Die Galaxien vom Typ Sa enthalten nur noch ganz geringe Mengen interstellarer Materie, und die Zahl der absolut hellen Sterne ist ziemlich klein. In diesen Galaxien befinden sich vielleicht noch die masseärmeren Sterne im Kontraktionsstadium, während sich die massereichen Objekte schon zu weißen Zwergen entwickelt haben. Diese Aussage schließt natürlich nicht aus, daß in einigen Gebieten eines solchen Sternsystems die Sternbildung nach andauert. Ein Groß-

teil der Leuchtkraft dieser Galaxien stammt von den hellen Sternen im Riesengebiet; darauf deutet auch der Gesamtfarbenindex der Sternsysteme hin. Er ist bei den Sa-Systemen größer als bei den irregulären Galaxien und Sc-Systemen. Aus den Veränderungen des Gesamtfarbenindex lassen sich einige Schlüsse auf die unterschiedliche Sternbevölkerung in den verschiedenen Typen von Sternsystemen ziehen. Eine schematische Darstellung der geschilderten Vorgänge vermittelt Abbildung 27. Dort sind die bei der Entwicklung einer Galaxie auftretenden Änderungen in der Sternbevölkerung in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Der Anteil der roten Riesensterne und der weißen Zwerge steigt im Laufe der Zeit ständig an. Dagegen sinkt die Zahl der hellen O- und B-Sterne nach dem Überschreiten eines Maximums auf Null ab. Die Gasdichte erreicht nach etwa $5 \cdot 10^9$ Jahren ebenfalls einen Maximalwert, da durch die Massenabgabe der entwickelten massereichen Sterne viel Material wieder in den interstellaren Raum gelangt. Durch weitere Sternneubildungen sinkt jedoch die Dichte des interstellaren Gases in den späteren Entwicklungsphasen gleichfalls ab.

Bei den Sternsystemen vom Typ S0 ist wahrscheinlich die Sternbildung schon abgeschlossen, außerdem dürfte der Anteil an Hauptreihensternen geringer Masse und an weißen Zwergen ziemlich hoch sein. Nach dieser Interpretation der Beobachtungsdaten sieht man die S0-Systeme als ein spätes Entwicklungsstadium eines Sternsystems an und ordnet die Spiralsysteme in zwei Entwicklungsfolgen ein. An ihrem Anfang stehen die irregulären Systeme, während die S0-Spiralen den Endzustand bilden:

$$\text{Irr} \rightarrow \text{Sc} \rightarrow \text{Sb} \rightarrow \text{Sa} \rightarrow \text{S0}$$

$$\text{Irr} \rightarrow \text{SBc} \rightarrow \text{SBb} \rightarrow \text{SBa} \rightarrow \text{S0}.$$

Man hätte nach dieser Einteilung streng zwischen den normalen und den balkenförmigen Sternsystemen zu unterscheiden. Beide Entwicklungsfolgen laufen wahrscheinlich unabhängig voneinander ab. Während über die Entstehung der Spiralarme in den normalen Spiralsystemen schon einige theoretische Erklärungsmöglichkeiten vorliegen, bestehen für die Entwick-

lung balkenförmiger Spiralarms noch nicht einmal qualitative Vorstellungen. Vielleicht hängt die Bildung eines balkenförmigen Spiralarms eng mit den Entstehungsbedingungen eines Sternsystems zusammen. Es wäre aber auch nicht ausgeschlossen, daß sich in einer späteren Entwicklungsphase die balkenförmige Verteilung der hellen Sterne zurückbilden und sich eventuell zu einer normalen Spirale umformen könnte. Allerdings liegt dieser Konzeption der Gedanke zugrunde, daß die balkenförmigen Spiralsysteme ein früheres Entwicklungsstadium repräsentieren als die normalen Spiralsysteme. An dieser Stelle berühren wir aber wieder die Grenzen der wissenschaftlichen Spekulation.

Die elliptischen Systeme wurden bei den bisherigen Betrachtungen noch nicht in den möglichen Entwicklungsweg einbezogen. Es ließe sich zunächst vermuten, daß sie in der aufgestellten Entwicklungsfolge zeitlich nach den S0-Systemen einzuordnen sind und demnach noch spätere Entwicklungsstadien verkörpern. Dieser Schluß wird vor allem deshalb nahegelegt, weil die Sternbevölkerung der S0-Systeme und der elliptischen Systeme fast identisch ist. Gegen diese Vorstellung sprechen aber einige Tatsachen. Insbesondere muß in diesem Zusammenhang daran erinnert werden, daß die elliptischen Systeme nicht so stark abgeflacht sind wie die spiralförmigen. Wenn sich die elliptischen Systeme aus den spiralförmigen entwickeln sollen, dann müßte ein Mechanismus wirksam sein, der einen schnellrotierenden, abgeflachten Körper in einen mehr kugelförmigen verwandelt. Ein solcher Prozeß ist aber nicht bekannt. Deshalb ist es wahrscheinlicher, daß die elliptischen Systeme eine von den spiralförmigen Galaxien völlig unabhängige Entwicklung durchlaufen haben, an deren Ende eventuell auch die S0-Systeme stehen. Im Sinne dieser Deutung könnten sich die elliptischen Sternsysteme aus Gaswolken gebildet haben, deren ursprünglicher Drehimpuls sehr klein war, so daß es bei der Kontraktion der Gaswolken zu einer geringeren Abplattung kam. Mit diesen Überlegungen kommen wir wieder auf die Frage der physikalischen Anfangsbedingungen zurück, die weitgehend unbekannt sind. Vielleicht spielen sie bei der Entstehung und Entwicklung der Galaxien eine viel bedeuten-

dere Rolle als im Falle der Sternentstehung. Auch diese Problematik ist noch weitgehend ungeklärt.

Während der Entwicklung der Galaxien setzt in einem bestimmten Zeitraum die Bildung der ersten Sterngeneration ein. Nach ihr entstehen noch weitere, die aus dem übriggebliebenen interstellaren Material hervorgehen, das im Laufe der Entwicklung auch mit Materie angereichert wird, die sich schon einmal in Sternen befand. Auf diese Weise wird die differierende chemische Zusammensetzung der verschiedenen alten Sterne verständlich. Bekanntlich ist der Gehalt der Sternmaterie an schwereren Elementen um so größer, je jünger die Sterne sind.

Auf Grund der vorgenommenen Erklärung des vorliegenden Beobachtungsmaterials, in den Formen der Sternsysteme Anzeichen unterschiedlicher Entwicklungsstadien zu sehen, kann man aber nicht eindeutig darauf schließen, daß sich die Sternsysteme zu verschiedenen Zeiten bildeten. Auf den ersten Blick wäre man geneigt, in den irregulären Systemen die jüngsten, gerade entstandenen Systeme zu sehen, während andere Typen älter sind. Mit dieser Deutung würden sich auch kosmologische Fragen lösen. Tatsächlich sind diese Überlegungen aber nicht zwingend. Man hat nämlich auch in den als jung geltenden Sternsystemen Kugelhaufen gefunden, die sehr alte Objekte sind. Dieser Befund läßt sich auf der Grundlage der dargestellten Entwicklungstendenz schwer verstehen.

Zu neuen Gesichtspunkten bei der Diskussion dieser Diskrepanz wird man jedoch geführt, wenn man die mit der Entwicklungsgeschwindigkeit der Galaxien zusammenhängenden Probleme untersucht. Bisher wurde diese Frage überhaupt nicht berührt und damit stillschweigend vorausgesetzt, daß die Entwicklungsgeschwindigkeit bei allen Sternsystemen unabhängig von ihrer Massendichte gleichgroß ist. Es bestehen jedoch Anzeichen dafür, daß die Rate der Sternentstehung um so größer ist, je höher die Materiedichte in der Gaswolke ist. Nach Abschätzungen geht die Gasdichte sogar mit einer höheren Potenz in die Berechnungen ein. Treffen diese Überlegungen zu, dann wäre verständlich, warum im Frühstadium eines Sternsystems, in dem die Gasdichte noch verhältnismäßig

groß ist, der Hauptteil der Sterne entsteht. Außerdem würden die sehr massereichen Gaswolken, aus denen sich die großen Galaxien formten, eine schnellere Entwicklung durchlaufen, weil es in ihnen viel eher und heftiger zur Sternbildung kommt als in den masseärmeren Objekten. Dort kann sich die Sternbildung über viel längere Zeiträume erstrecken.

Im Zusammenhang mit solchen Überlegungen ist es durchaus sinnvoll, zwischen dem Entstehungsalter und dem Entwicklungsalter eines Sternsystems zu unterscheiden. Eine Galaxis kann sich vor langer Zeit gebildet haben und ein entsprechend hohes Entstehungsalter besitzen; dennoch ist das Entwicklungsalter möglicherweise noch verhältnismäßig gering, falls nämlich die Massendichte zu Beginn der ersten Sternentstehung entsprechend niedrig war.

Diese Überlegungen können auch auf einzelne Gebiete in einem Sternsystem übertragen werden. Bei den Spiralsystemen liegen in den dichten Kerngebieten eine große Zahl entwickelter Riesensterne vor, während die Spiralarme von wesentlich jüngeren Objekten bevölkert sind. Da schon im Frühstadium der Entwicklung einer Galaxis im Zentrum der Gaswolke die Materiedichte am größten war, setzte dort zuerst die Sternbildung ein, während die Bildung der Sterne in der galaktischen Scheibe und in den Spiralarmen erst später erfolgte.

Eine Verzögerung der Entwicklung des Sternsystems kann auch dadurch verursacht werden, daß die ursprüngliche Gaswolke in so kleine Untergebiete zerfällt, daß nur noch relativ massearme Sterne entstehen. Es ist von der Sternentwicklung her bekannt, daß sich solche Sterne nur sehr langsam entwickeln.

Auf das Vorhandensein sehr eigentümlicher (pekuliarer) Sternsysteme, die sich nicht in das Hubble-Schema einordnen lassen, machte V. A. Woronzow-Weljaminow aufmerksam. Auf photographischen Aufnahmen großer Reichweite fand er eine Anzahl von mehrfachen irregulären Systemen. Die einzelnen Objekte sind zumeist durch leuchtende Materiebänder miteinander verbunden. Das Aussehen der Galaxien läßt darauf schließen, daß es sich hierbei um ganz junge Systeme handeln muß. Zum Teil bestehen sie aus ausgedehnten Gebieten heißen

Wasserstoffs, der immer gemeinsam mit heißen O-Sternen auftritt. Nach groben Schätzungen könnte ihr Entwicklungsalter etwa 10^8 Jahre betragen. Über die tatsächliche Häufigkeit dieser eigentümlichen Gruppen von Galaxien lassen sich noch keine Angaben machen. Wie die Beobachtungen zeigen, neigen nicht nur die pekuliaren Typen unter den Sternsystemen zur Gruppenbildung, sondern auch die normalen Galaxien.

Die Doppel- und Mehrfachsysteme haben im Mittel gegenseitige Abstände von etwa 10^5 pc. Die mittleren Radien der kleineren Galaxienhaufen betragen schon ungefähr 10^6 pc, und die Dimensionen der sehr ausgedehnten massereichen Galaxienhaufen liegen in der Größenordnung von 10^7 pc. Eine Statistik der in den Haufen auftretenden Typen von Sternsystemen ergab, daß die elliptischen Systeme relativ oft in Haufen auftreten, während die spiralförmigen und unregelmäßigen Galaxien häufiger als Einzelobjekte vorkommen.

Der Untersuchung von Doppel- und Mehrfachgalaxien sowie Gruppen von Galaxien widmete W. A. Ambarzumjan besondere Aufmerksamkeit. Insbesondere diskutierte er die Frage, ob sich die Gruppierungen durch den Einfang von Einzelgalaxien gebildet haben. Die gemessenen Radialgeschwindigkeiten, die einen Einblick in die Bewegungsverhältnisse zulassen, weisen darauf hin, daß in der Mehrzahl der Fälle die Sternsysteme mit hohen Geschwindigkeiten auseinanderstreben. Daraus folgt aber, daß die Gruppen nicht stabil sind und kaum durch Einfangprozesse entstanden sein können. In der Tatsache des Auseinanderfliegens der Gruppen von Galaxien sieht Ambarzumjan ein starkes Argument für die Richtigkeit der von ihm aufgestellten Hypothese von der Bildung der Sternsysteme aus einem dichten Körper geringer Ausdehnung. Die Doppel- und Mehrfachsysteme entstanden nach seinen Vorstellungen durch Teilungsvorgänge in einem Galaxienkern bzw. einer gewaltigen Explosion in ihm. Allerdings sind dazu große Energiebeträge erforderlich, damit sich die gebildeten Teile aus dem System entfernen können. Kurz nach der Spaltung des alten Kerns, wenn sich die „Bruchstücke“ noch durch das Sternsystem bewegen und aus ihnen bereits Materie des neuen Systems „ausfließt“, ist mit starken explosionsartigen Vorgängen zu rech-

nen. Vor allem die diffus verteilte gasförmige Materie des alten Sternsystems tritt in Wechselwirkung mit der „neugebildeten“ Materie. Als Folge davon ist eine intensive Radiostrahlung zu erwarten, wie sie auch bei den starken Radiogalaxien beobachtet wird.

Als Beispiel für einen späteren Entwicklungszustand nach der Kernteilung sieht Ambarzumjan solche Sternsysteme an, die durch Materiebrücken miteinander verbunden sind. Da die Materiebänder oft in Spiralarmen enden, glaubt er, daß in vielen Fällen auch die Bildung der Spiralarme auf die Kernteilung zurückgeht. Die masseärmeren Begleiter großer Galaxien, z. B. die beiden Magellanschen Wolken in unmittelbarer Nähe unseres Milchstraßensystems, sollten ihre Entstehung entsprechend kleineren Ausbrüchen im Kern verdanken. Im Falle der Radioquelle Virgo A schießt ein Materiestrahl aus dem Kern dieses zugehörigen Sternsystems. Der Strahl weist einige Knoten auf, in denen Ambarzumjan die Kerne neuentstehender kleiner Galaxien sieht.

Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich auf die Entwicklungsvorgänge der Galaxien als Ganzes, wobei auf die Bildung der Spiralarme in den Spiralsystemen kein besonderes Augenmerk gerichtet wurde. Tatsächlich ist aber die Entstehung von Spiralarmen und darüber hinaus ihre Erhaltung eine bemerkenswerte Erscheinung. Es gibt eine ganze Reihe von theoretischen Untersuchungen, die dieses Problem schon zum Gegenstand hatten. Von ihnen wird jedoch nur die kürzlich von C.C. Lin ausgearbeitete Theorie erörtert.

Zu den Grundgedanken der Theorie von Lin gehört die Annahme, daß für die Bewegung der Sterne in der galaktischen Ebene nur Gravitationskräfte ausschlaggebend sind, während die interstellaren Magnetfelder keinen nennenswerten Einfluß ausüben sollen. Die Bewegungen der Sterne, aber auch der interstellaren Materie unterliegen daher nur den Anziehungskräften, deren Betrag an jeder Stelle der Galaxis von der vorliegenden Massenverteilung bestimmt ist. Das bedeutet, daß die Bewegungen nicht nur durch den Abstand vom Massenzentrum, dem Kern des Sternsystems, abhängen, sondern auch von der lokalen Dichteverteilung in den äußeren Gebieten der

Galaxis. Da die Massenverteilung in der galaktischen Ebene am Anfang der Entwicklung statistischen Gesetzmäßigkeiten gehorcht, dürften die sich einstellenden individuellen Bewegungen der Sterne und der interstellaren Materie ebenfalls statistischen Charakter aufweisen. Diesen Bewegungen ist natürlich noch die großräumige Rotation der Galaxis überlagert. Die Richtung und Geschwindigkeit, mit der sich die Sterne oder Gaswolken an jedem Ort des Sternsystems bewegen, läßt sich durch entsprechende Gleichungen der Himmelsmechanik beschreiben. Unter den Lösungen der Gleichungen sind solche für das vorliegende Problem am interessantesten, die zur Ausbildung und „Selbsterhaltung“ von Spiralarmen führen. Die Lösungen der Gleichungen geben die Verteilung der Örter in der Galaxis an, in denen sich auf Grund der zunächst statistischen Verteilung der Materie größere Verdichtungen bilden. Aus ihnen entstehen Sterne, und die von ihnen ausgedehnten Anziehungskräfte sorgen dafür, daß neue Gasmassen zu diesen Orten gelangen. Auf diese Weise kann dort eine neue Sterngeneration entstehen, während die älteren Sterne infolge ihrer Eigenbewegungen die Spiralarme inzwischen verlassen haben. Dafür regt dort die jüngere Sterngeneration durch ihre Massenanziehung erneut die Konzentration von Materie an, und die Spiralarme bleiben so erhalten.

Aus den theoretischen Untersuchungen geht hervor, daß die am Anfang der Entwicklung vorhandenen lokalen Störungen des allgemeinen Gravitationsfeldes durch die statistische Materieverteilung anwachsen können und sich durch die vom Zentrumsabstand abhängige Rotationsgeschwindigkeit im Laufe der Zeit zwei Spiralarme bilden, deren Enden bei der Bewegung nachgeschleppt werden. Fordert man dagegen, daß die Enden der Spiralarme bei der Rotation vorangehen sollen, dann zeigen die Berechnungen, daß sich die anfänglichen statistischen Störungen des Kraftfeldes nicht verstärken, sondern verringern. Auf diese Weise wurde unter den genannten Voraussetzungen auf theoretisch-mathematischem Wege der Nachweis erbracht, welchen Windungssinn die Spiralarme besitzen.

Die vorhandenen Beobachtungsdaten über die räumliche Ver-

teilung des interstellaren Gases in unserem Milchstraßensystem und seine Bewegungsverhältnisse ermöglichen Vergleiche mit den theoretischen Ergebnissen. Dabei ergab sich, daß sich die in den verschiedenen galaktischen Richtungen gemessenen Radialgeschwindigkeiten der Wasserstoffwolken in guter Übereinstimmung mit den berechneten Werten befinden. Auch der berechnete Schnittwinkel der Spiralarme mit den konzentrischen Kreisen um den Kern der Galaxis zeigt keine großen Abweichungen von dem Beobachtungswert.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die von Lin vorgelegte Theorie ein bedeutender Fortschritt bei der Erklärung des Spiralarmphänomens ist. Die Untersuchungen über die Entstehung der Balkenspiralen sind dagegen von einer Lösung noch weit entfernt.

Radiogalaxien und quasistellare Objekte

Nachdem man durch die Entdeckung K. G. Janskys erkannt hatte, daß aus dem Weltraum Strahlung im Radiofrequenzbereich zu uns gelangt, begann Ende der vierziger Jahre eine stürmische Entwicklung des neuen Forschungsgebietes. Das große Interesse kam vor allem daher, daß nun die Möglichkeit bestand, unabhängig von den Beobachtungen im optischen Spektralbereich von einem zweiten Gebiet des elektromagnetischen Spektrums Informationen über die Strahlungsintensität der Gestirne zu erhalten.

Bei der Weiterentwicklung leistungsfähiger Radioteleskope wurde — abgesehen von der Erhöhung ihrer Empfindlichkeit — besonderes Augenmerk auf die Steigerung ihres Auflösungsvermögens gelegt. Als Ergebnis dieser Bemühungen stehen jetzt Kombinationen von Radioteleskopen zur Verfügung, deren Auflösungsvermögen das optischer Fernrohre teilweise übertrifft. Der Bau hochleistungsfähiger Radioteleskope war für die Identifikation von Radioquellen mit optisch sichtbaren Objekten eine unbedingt notwendige Voraussetzung.

Die erste Radioquelle, die sich vom Hintergrund des „Radiohimmels“ abhob und nur eine begrenzte räumliche Ausdeh-

nung besaß, wurde 1946 entdeckt. Dieser Entdeckung folgte noch eine große Anzahl weiterer. Man bezeichnet diese Radiostrahler als diskrete Radioquellen, um damit anzudeuten, daß sie Objekte von relativ geringer Winkelausdehnung sind. Auch von der Sonne wird im Radiofrequenzbereich Strahlung empfangen. Allerdings ist die Intensität der Strahlung so gering, daß ihr Nachweis kaum gelungen wäre, wenn sich die Sonne nicht in so geringer Entfernung von uns – kosmisch betrachtet – befinden würde.

Die bei den systematischen Durchmusterungen des Himmels nach diskreten Radioquellen anfallenden Beobachtungsergebnisse wurden in Katalogen niedergelegt. Ein bekanntes Katalogwerk stammt von den Radioastronomen der Sternwarte in Cambridge. Die in diesem Sammelwerk erhaltenen Radioquellen sind außer mit einer laufenden Nummer mit der Katalogangabe und einem C (Cambridge) versehen. In dieser Bezeichnung bedeutet 3 C 48 die 48. Radioquelle im 3. Cambridge-Katalog. Die aufgestellten Kataloge, zu denen auch die vom Südhimmel hinzukommen, enthalten jeweils einige hundert diskrete Radioquellen.

Am Anfang der Entwicklung des neuen Forschungsgebietes, Ende der vierziger Jahre, war noch nicht einmal klar, ob die diskreten Radioquellen ihren Sitz im Sonnensystem haben oder nicht. Durch Parallaxenbestimmungen konnte jedoch bald nachgewiesen werden, daß die damals schon bekannten starken Radioquellen Cygnus A und Cassiopeia A weiter als $2 \cdot 10^{-2}$ pc von uns entfernt sein mußten. Damit war gezeigt, daß diese Quellen außerhalb des Sonnensystems liegen.

Die ersten Versuche, an den angegebenen Positionen der Radioquellen nach bemerkenswerten Objekten zu suchen, fielen etwa in die gleiche Zeit. Die Ergebnisse legten die Vermutung nahe, daß die Radioquellen Taurus A mit dem Krebsnebel, Virgo A mit der Galaxis NGC 4486 und Centaurus A mit der Galaxis NGC 5128 identisch sind. Später wurde der Nachweis erbracht, daß auch einige andere Sternsysteme, unter ihnen der bekannte Andromeda„nebel“, Radiostrahler sind.

Die Richtigkeit der Zuordnung der starken diskreten Radioquellen mit optisch sichtbaren Objekten bestätigten W. Baade

und R. Minkowski in einer erneuten Untersuchung mit verbesserten „Radio“positionen. Außerdem gelang es ihnen, eine weitere Anzahl von Radioquellen mit optisch sichtbaren Objekten zu identifizieren. Ein wichtiges Ergebnis ihrer Arbeit bestand jedoch darin, daß die beiden Astronomen beweisen konnten, daß es zwei Arten von Radioquellen gibt, nämlich solche, die zum Milchstraßensystem gehören, und solche, die extragalaktisch sind. Zu den galaktischen Radioquellen, die sich zur Milchstraßenebene konzentrieren, gehören die Wolken ionisierten Wasserstoffs sowie die bei Supernovaexplosionen ausgestoßenen Gashüllen.

Die extragalaktischen Radioquellen verteilen sich ziemlich gleichmäßig über den ganzen Himmel. Baade und Minkowski führten den Nachweis, daß an den Positionen der meisten bekannten Radioquellen Sternsysteme anzutreffen sind.

Hinsichtlich der Intensität der von den Galaxien ausgehenden Radiostrahlung bestehen beträchtliche Unterschiede. Während im Normalfall die Radiostrahlung nur Bruchteile der im optischen Bereich emittierten Energie ausmacht, gibt es Sternsysteme, die einen Großteil ihrer insgesamt ausgestrahlten Energie im Radiofrequenzgebiet emittieren. Zu den sogenannten Radiogalaxien gehören vorwiegend elliptische Sternsysteme und solche, deren optisches Aussehen Eigentümlichkeiten aufweist.

Bei der Untersuchung der Energieverteilung im Radiospektrum stellte man bei den einzelnen Radioquellen beachtliche Unterschiede fest, die auf verschiedene Entstehungsursachen der Strahlung hinweisen. Bisher hatten wir nur die thermische Strahlung betrachtet, die bei der Sternstrahlung die ausschlaggebende Rolle spielt. Die vorliegenden Beobachtungsdaten erfordern jedoch die Betrachtung eines zweiten Mechanismus für die Entstehung von Strahlung. Es handelt sich hierbei um nichtthermische Strahlung, die, wie schon der Name andeutet, nicht auf thermische Ursachen zurückgeht. Ihr Auftreten ist an die Existenz von Magnetfeldern gebunden, in denen sich geladene Teilchen bewegen. Da diese Strahlung zuerst in großen Teilchenbeschleunigern festgestellt wurde, bezeichnet man sie als Synchrotronstrahlung. Sie entsteht, wenn sich hoch-

energetische Elektronen in einem Magnetfeld bewegen. Genauer gesagt, beschreiben die Elektronen Spiralbahnen um die magnetischen Feldlinien, und die Energieabstrahlung erfolgt lediglich in einen schmalen Kegel in ihrer Bewegungsrichtung. Der ganze Vorgang ist in gewisser Hinsicht mit der Wirkungsweise von Scheinwerfern eines Autos vergleichbar. Da wir von einer nichtthermischen Radioquelle nur die Strahlung empfangen, die von den gerade auf uns zulaufenden Elektronen emittiert wird, ist eine Schwingungsebene der Strahlung bevorzugt, und sie ist deshalb stark linear polarisiert. Das Spektrum der Synchrotronstrahlung besteht nur aus einem Kontinuum, in dem keine Emissions- bzw. Absorptionslinien auftreten. Außerdem ist die spektrale Energieverteilung der Synchrotronstrahlung von der thermischen verschieden. Die nichtthermische Strahlung beschränkt sich nicht nur auf das Radiofrequenzgebiet, sondern kann auch im optischen Spektralbereich wahrgenommen werden.

Es darf nicht übersehen werden, daß die ersten erfolgreichen Identifikationen der intensiven Radioquellen mit optisch wahrnehmbaren Objekten dadurch begünstigt waren, daß sie nicht allein helle Galaxien waren, sondern auch auffallende Formen aufwiesen. Als aber die Positionen schwächerer Radioquellen mit der Genauigkeit von einigen Bogensekunden vermessen werden konnten, änderte sich die Situation. Es waren nun die Voraussetzungen dafür geschaffen, auch optisch viel schwächere und weniger auffällige Objekte den Radioquellen zuzuordnen. Die Untersuchungen führten 1962 zu dem überraschenden Ergebnis, daß einige Radioquellen im optischen Spektralbereich ein sternförmiges Aussehen besitzen, das sie in nichts von den normalen Sternen unterscheidet. Deshalb nannte man diese gefundenen Objekte quasistellare Objekte oder abgekürzt Quasare. Die Bezeichnungen beziehen sich nur auf das optische Aussehen der Objekte und sagen noch nichts über ihre weitgehend ungeklärte physikalische Natur aus.

Die Anzahl der mit sichtbaren Objekten identifizierten Radioquellen betrug Mitte 1966 schon 258. Davon sind 28% quasistellare Objekte und 72% Radiogalaxien. Von den Radio-

galaxien entfallen 30% auf die absolut hellsten Mitglieder von Galaxienhaufen.

Bei dem Versuch, die Ausdehnung der diskreten Radioquellen zu bestimmen, stellte sich heraus, daß die Winkeldurchmesser der meisten extragalaktischen Radioquellen kleiner sind als das Auflösungsvermögen der normalen Parabolspiegel. Daraufhin begann die Entwicklung von Antennensystemen auf Interferometerbasis. Die erste große Entdeckung mit den neuen Geräten war die Auflösung der Radioquelle Cygnus A in zwei Radioquellen, die 85 Bogensekunden voneinander getrennt sind und sich symmetrisch zu beiden Seiten des optisch sichtbaren Sternsystems anordnen.

Aus dem inzwischen stark angewachsenen Beobachtungsmaterial ist zu entnehmen, daß der größte Teil der diskreten Radioquellen aus zwei oder mehr Komponenten besteht. Diese überraschende Entdeckung und die Tatsache, daß die Komponenten symmetrisch zu beiden Seiten der optisch wahrnehmbaren Objekte liegen, führte zu der Vermutung, daß es sich hierbei um Folgeerscheinungen von explosionsartigen Vorgängen handelt, bei denen Materie ausgeworfen wurde. Es ist möglich, daß bei solchen Ereignissen Elektronen auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt werden und mit den eventuell vorhandenen Magnetfeldern in Wechselwirkung treten. Dann kommt es auch zur Emission von Synchrotronstrahlung.

Einen direkten Hinweis auf die Existenz explosionsartiger Vorgänge ergab sich bei der optischen Untersuchung der Radioquelle 3C 231, die mit der eigentümlichen Galaxis M 82 identisch ist. Wie photographische Aufnahmen des Sternsystems im Lichte der Wasserstofflinie H_{α} ergaben, schießen aus dem Kern ausgedehnte Wasserstoffwolken hervor. Sie besitzen eine faserartige Struktur und erstrecken sich besonders weit in den Richtungen senkrecht zur Hauptebene des Sternsystems. Die vom Kerngebiet dieser Galaxis gewonnenen Spektralaufnahmen weisen stark verbreiterte Linien auf, die auf rasche Bewegungsvorgänge hindeuten. Weiterhin wurden in den Spektren einige Emissionslinien gefunden, die nur dann auftreten, wenn sich die Materie in einem hoch angeregten Energiezustand befindet. Da das Sternsystem auch im Radiofrequenz-

bereich des elektromagnetischen Spektrums Energie ausstrahlt und ein großer Energiebetrag im Kerngebiet gespeichert ist, lag die Vermutung nahe, daß es sich um Synchrotronstrahlung handelt. Es war zu erwarten, daß diese Strahlung auch im optischen Bereich einen Beitrag zur Gesamtleuchtkraft des Sternsystems leistet. Auf speziellen Filteraufnahmen zeigten sich tatsächlich an den Stellen, wo sich auch die Wasserstoffwolken befinden, die gleichen Strukturen. Ihr Licht ist hochgradig polarisiert, was auf einen Synchrotronmechanismus bei der Emission des Lichtes hinweist. Nach groben Schätzungen beträgt die Masse des aus dieser Galaxis herausfliegenden Gases etwa $6 \cdot 10^6$ Sonnenmassen. Die Explosion könnte sich vor etwa $1,5 \cdot 10^6$ Jahren ereignet haben. Es ist zur Zeit noch nicht möglich, sich ein umfassendes Bild von den Vorgängen in M 82 zu machen, das alle Beobachtungen widerspruchsfrei erklären kann. Eine der offenen Fragen ist die Tatsache, daß der Durchmesser der Radioquelle im Kerngebiet der Galaxis kleiner ist als das Gebiet, aus dem die optisch sichtbare Synchrotronstrahlung emittiert wird.

Die bisher diskutierten Eigenschaften des Sternsystems M 82 sind kein Einzelfall, sondern treten bei einer ganzen Gruppe von Galaxien auf, der neun Objekte angehören. Sie zeichnen sich alle durch einen kleinen, aber sehr hellen Kern aus. Die von ihnen aufgenommenen Spektren enthalten Emissionslinien, die normalerweise bei Sternsystemen nicht vorkommen. Da auch einige verbotene Linien im Spektrum vorhanden sind, muß in den Gebieten des Sternsystems, in denen sie gebildet werden, die Materiedichte sehr gering sein. Außerdem deuten die starken Linienverbreiterungen auf heftige Bewegungsvorgänge im Innern der Galaxien hin. Die aus den spektroskopischen Daten berechneten Radialgeschwindigkeiten der aus dem Kern davonfliegenden Materiewolken liegen im Bereich von 500 bis 4250 km/s. Nach ihrem Entdecker C. K. Seyfert werden diese eigentümlichen Sternsysteme als Seyfert-Galaxien bezeichnet.

Auf die zweifelsfreie Identifikation einiger Radioquellen mit sternförmigen Objekten folgte die Untersuchung ihrer optischen Eigenschaften. Die Quasare sind zum Teil so hell, daß

Spektren von ihnen gewonnen werden konnten. Dabei fand man eine Anzahl breiter Emissionslinien, für die zunächst keine Erklärung bestand. Die Energieverteilung im kontinuierlichen Spektrum der Quasare ähnelt der eines schwarzen Strahlers. Sie unterscheidet sich dadurch hinreichend von der überwiegenden Mehrzahl der Sternspektren. Deshalb besteht auch die Möglichkeit, durch mehrere Aufnahmen eines Sternfeldes in speziell ausgewählten Spektralbereichen und ihren Vergleich eine Vorauswahl verdächtiger Objekte zu treffen. Diese Methode hat sich bei der Auffindung von quasistellaren Radioquellen sehr gut bewährt. Darüber hinaus fand man eine Reihe von sternartigen Objekten, die zwar die gleichen optischen Eigenschaften wie die Quasare besitzen, aber im Gegensatz zu ihnen keine Radiostrahlung emittieren. Nach einem Vorschlag von A. Sandage bezeichnet man diese Körper als quasistellare Galaxien.

Das Rätsel um die unbekannten Linien in den Spektren der quasistellaren Objekte löste M. Schmidt. Er wies nach, daß die Linien zum Teil von verbotenen Übergängen bekannter Elemente stammen, die jedoch sehr stark rotverschoben sind. Bei einigen Quasaren wichen die beobachteten Wellenlängen bis um das Doppelte von den theoretisch zu erwartenden Werten ab. Durch die enorme Rotverschiebung gelangten Spektrallinien in den sichtbaren Spektralbereich, die sich normalerweise im nicht beobachtbaren Ultraviolettbereich befinden. Die starke Rotverschiebung der Linien weist auf extreme physikalische Verhältnisse hin. Die Interpretation des Beobachtungsbefundes soll jedoch erst erfolgen, wenn alle noch ausstehenden Beobachtungstatsachen erwähnt sind.

Einige der quasistellaren Radioquellen zeigen einen Lichtwechsel wie die veränderlichen Sterne. Im Falle des relativ hellen Quasars 3C 273 liegt ein ziemlich umfangreiches Beobachtungsmaterial vor, das bis in das Jahr 1890 zurückreicht. Die bei diesem Objekt auftretenden Schwankungen der optischen Helligkeit lassen über diesen Zeitraum eine mittlere Periode von ungefähr 13 Jahren erkennen, der außerdem kleinere Schwankungen mit einer Zeitdauer von Wochen bis Monaten überlagert sind.

Weil noch nicht alle quasistellaren Radioquellen auf einen eventuellen Lichtwechsel untersucht wurden, kann noch nicht gesagt werden, wieviel Prozent davon überhaupt konstant sind.

Inzwischen gelang die Entdeckung, daß einige der Radioquellen auch im Radiofrequenzgebiet Schwankungen in der Strahlungsintensität aufweisen. Die Amplitude hängt aber von der Frequenz der Strahlung ab, bei der beobachtet wird.

Da schon einige charakteristische physikalische Daten über die quasistellaren Objekte bekannt sind, besteht die Möglichkeit, sie mit darauf geeichten rationellen Methoden systematisch zu suchen. Auf Grund statistischer Ergebnisse schätzt man die Gesamtzahl der über den ganzen Himmel verteilten Quasare und quasistellaren Galaxien, die heller als 18^m sind, auf etwa 10000.

Die sicher identifizierten quasistellaren Radioquellen verteilen sich nahezu gleichmäßig über den Himmel. Genauer gesagt, muß diese Aussage auf den nördlichen Himmel beschränkt werden, da sich die entsprechenden Untersuchungen auf der Südhalbkugel des Himmels noch im Rückstand befinden. Auch das Milchstraßengebiet ist von den Betrachtungen auszuschließen, weil dort infolge der interstellaren Absorption Zuordnungen sehr erschwert, wenn nicht gar unmöglich sind. Die unter den genannten Einschränkungen gefundene nahezu gleichförmige Verteilung der Quasare spricht dafür, daß es Objekte sind, die sich außerhalb unseres Sternsystems befinden.

Die erwähnten Beobachtungsergebnisse weisen darauf hin, daß in den Radiogalaxien und quasistellaren Objekten ungewöhnliche physikalische Vorgänge ablaufen müssen. Für sie besteht gegenwärtig noch kein tieferes Verständnis, da alle bisherigen Deutungsversuche an irgendeiner Stelle in Widerspruch mit den Meßdaten gerieten. Im folgenden soll etwas näher auf die Konsequenzen der verschiedenen Beobachtungstatsachen eingegangen werden.

Zur Natur der Radiogalaxien und Quasare

Als es gelungen war, die intensiven Radioquellen mit Galaxien zu identifizieren, ging man sofort daran, aus den spektrosko-

pisch festgestellten Linienverschiebungen im Spektrum ihre Radialgeschwindigkeiten zu bestimmen. Sind sie erst einmal bekannt, dann lassen sich mit Hilfe des Hubble-Effektes ungefähre Entfernungen ableiten. Für die Radioquelle Cygnus A fand man eine Entfernung von etwa $1,6 \cdot 10^8$ pc. Damit bot sich die Möglichkeit, die tatsächlichen Dimensionen aus den gemessenen Winkelausdehnungen zu berechnen. Außerdem konnte die absolute Radioleuchtkraft des Systems aus den scheinbaren Radiointensitäten abgeleitet werden. Es ergab sich für Cygnus A ein Wert für die Strahlung aus dem ganzen Radiofrequenzgebiet von $4,4 \cdot 10^{34}$ kW. Die Gesamtstrahlung aus dem optischen Bereich ist dagegen um einen Faktor 10 kleiner. Bei solchen hohen Energiebeträgen erhebt sich natürlich die Frage, wie diese Radioquelle die enorme Energieabstrahlung aufrechterhält. Außerdem ist zu untersuchen, warum es zur Bildung der räumlich sehr ausgedehnten Doppelstruktur der Radioquelle kommt.

Der theoretischen Deutung des Beobachtungsbefundes erwachsen schon Schwierigkeiten bei der Interpretation des optischen Bildes von Cygnus A. Es kann nämlich nicht mit Sicherheit entschieden werden, ob es sich dabei um zwei zusammenhängende elliptische Sternsysteme, einen sich teilenden Kern einer Galaxie oder nur ein normales Sternsystem mit einem extrem starken Gürtel aus interstellarer Materie handelt. Jede der genannten Möglichkeiten ließe sich durch eine andere Hypothese nahelegen.

Lange Zeit wurde die Vorstellung diskutiert, daß im Falle der Radioquelle Cygnus A ein Zusammenstoß zwischen zwei Sternsystemen vorliegt. Dabei würden die Sterne beider Systeme nicht miteinander in Wechselwirkung treten, da ihre gegenseitigen Abstände im Verhältnis zu ihren Durchmessern außerordentlich groß sind. Die Gaswolken prallen jedoch beim Stoß mit voller Wucht zusammen und geraten dadurch in heftige turbulente Bewegungen. Hierbei werden auch relativistische, d. h. sehr schnell bewegte Elektronen erzeugt, die dann für die nachgewiesene Radiostrahlung verantwortlich wären. Entscheidend gegen diese Hypothese spricht aber der Umstand, daß bei den beobachteten Geschwindigkeiten Energiebeträge

beim Aufprall umgesetzt würden, die nur etwa 10% der erforderlichen Mindestenergie entsprechen. Außerdem gibt es eine Reihe von Sternsystemen, die sich wahrscheinlich durchdringen, von denen aber keine Radiostrahlung ausgeht.

Eine andere Hypothese zieht die Umwandlung magnetischer Energie aus dem gesamten Magnetfeld einer Galaxis in Strahlungsenergie in Betracht. Auch bei diesem Vorgang ist es fraglich, ob dabei genügend Energie freigemacht wird.

Die Energiefreisetzung durch eine Kettenreaktion von Supernovaausbrüchen wurde ebenfalls untersucht. Die Überlegungen gehen davon aus, daß im Kern einer Galaxis die Sterndichte verhältnismäßig hoch ist. Deshalb könnte die bei einer Supernovaexplosion entstehende Druckwelle die oberflächennahen Schichten der benachbarten Sterne so weit erhitzen, daß es auch dort zu Explosionen kommt. Falls von der Kettenreaktion ein Gebiet von 10 bis 50 pc Durchmesser erfaßt wird, würde im Kern einer solchen Galaxis innerhalb kurzer Zeit die für die Radiostrahlung erforderliche ungeheure Energiemenge freigesetzt. Dieser Mechanismus ist allerdings nur dann wirksam, wenn sich die Oberflächen der Sterne nahezu berühren.

Auch die Bildung und Entwicklung eines sogenannten Supersterns mit 10^5 bis 10^8 Sonnenmassen wurde diskutiert. In einem solchen Stern würden die Energiefreisetzungsprozesse außerordentlich rasch ablaufen. Die absolute Helligkeit eines solchen Sterns könnte bis auf -20^m ansteigen. Bei den sich einstellenden extremen Temperaturen in seinem Innern muß mit einem hohen Energiestrom gerechnet werden, der von den entstehenden Neutrinos abgeführt wird. Die Materie beginnt in diesem Zustand unter gleichzeitiger Temperatur- und Dichteerhöhung zu kontrahieren und entartet schließlich. Dagegen expandieren die äußeren Schichten des Sterns und zeigen die beobachtete Aktivität.

Auch wurde versucht, das Phänomen der Radiogalaxien und Quasare durch das Zusammentreffen von Materie und Antimaterie zu erklären. Bei diesem Vorgang wird ebenfalls Energie freigesetzt. Problematisch ist bei dieser Hypothese wie es vorher zur Trennung der Materie von der Antimaterie kommt.

In modifizierten Formen tauchen die erwähnten Hypothesen in einer ganzen Reihe weiterer Vorstellungen auf. Eine annehmbare Lösung der durch die Radiogalaxien aufgeworfenen Probleme steht allerdings noch aus.

Die an den Quasaren gemessenen ungewöhnlich großen Rotverschiebungen der Spektrallinien können verschieden ausgelegt werden. So ließen sie sich als Hubble-Effekt deuten und würden dann mit der Expansionsbewegung des Weltalls zusammenhängen. Für die Quasare ergeben sich unter diesen Umständen enorme Entfernungen. So wäre die quasistellare Radioquelle 3C 9 mit der größten bisher nachgewiesenen Rotverschiebung rund $3 \cdot 10^9$ pc von uns entfernt.

Der Effekt der Rotverschiebung tritt aber auch ein, wenn sich die Lichtquanten gegen ein starkes Gravitationsfeld bewegen müssen. Sie leisten dann in dem Feld Arbeit und verlieren dabei Energie, so daß sich entsprechend der Größe des Energieverlustes ihre Wellenlänge nach dem roten Teil des Spektrums verschiebt. Sollte diese Erklärung zutreffen, dann müßten die Quasare relativ kleine Objekte sein, in deren Innerem die Materie eine extreme Dichte aufweist. Dagegen muß die Materiedichte in den Quasarahüllen sehr gering sein, weil die Spektren der quasistellaren Objekte verbotene Linien enthalten, die nur bei geringen Materiedichten auftreten können. Beim Aufbau von Modellvorstellungen auf der geschilderten Grundlage muß auf den zuletzt genannten Umstand Rücksicht genommen werden.

Eine dritte Erklärungsmöglichkeit besteht in der Annahme einer gigantischen Explosion, die vor etwa 10^7 Jahren im Kern unseres Milchstraßensystems stattgefunden hat. Dabei konnten die Quasare mit sehr hohen Geschwindigkeiten ausgestoßen werden. In diesem Fall wäre die Rotverschiebung ein rein kinematischer Doppler-Effekt, und die quasistellaren Objekte würden sich in der „Nachbarschaft“ von unserer Galaxis befinden.

Von den in Frage kommenden Interpretationen der Rotverschiebung führen jedoch die beiden zuletzt genannten zu Widersprüchen mit bestimmten Beobachtungstatsachen, so daß die Erklärung auf der Grundlage des Hubble-Effektes die

wahrscheinlich zutreffende ist. Die quasistellaren Objekte würden sich demzufolge in sehr großen oder, wie man sagt, in kosmologischen Entfernungen von uns befinden. Aus den bekannten scheinbaren Helligkeiten und den aus dem Hubble-Effekt abgeleiteten Entfernungen kann man die absoluten Helligkeiten berechnen. Sie liegen bei den Quasaren bei -26^m , das ist ein Betrag, der die Leuchtkraft normal großer Galaxien um das 100fache übersteigt.

Falls die physikalische Natur der Quasare in einiger Zeit noch besser verstanden ist, könnten uns diese Objekte eventuell wichtige Auskünfte über die Struktur des Weltalls im großen vermitteln.

Der an einigen quasistellaren Objekten gefundene Lichtwechsel war eine überraschende Entdeckung, welche auch die Möglichkeit eröffnete, Informationen über ihre geometrische Größe zu erlangen. Durch die kürzesten Lichtschwankungen ist nämlich die obere Grenze für ihre Durchmesser festgelegt, was man sich durch folgende Überlegung erklären kann. Nimmt man etwa kugelförmige Körper an, so gibt es Gebiete, die verschieden weit von uns entfernt sind. Da das Licht nur eine endliche Strecke in der Zeiteinheit zurücklegt, erreichen uns die von den entfernteren Gebieten emittierten Lichtquanten etwas später als die gleichzeitig mit ihnen ausgestrahlten Photonen der uns näherliegenden Bereiche. Solange das Objekt keinen Lichtwechsel besitzt, ist dieser Effekt belanglos. Wenn aber Helligkeitsschwankungen an den Quasaren auftreten, dann lassen sie sich nur nachweisen, falls die Laufzeitunterschiede der von verschieden weit entfernten Gebieten ausgehenden Photonen kleiner sind als die Hälfte der Periode des Lichtwechsels. Andernfalls würde die Überlagerung aller aus beliebigen Gebieten stammenden Photonen zu einem „Verwaschen“ der Lichtkurve führen.

Auf der Grundlage dieser Überlegungen ergibt sich zum Beispiel für die Radioquelle 3C 273 ein Durchmesser von 0,6 pc für das im optischen Spektralbereich emittierende Gebiet. Der Wert ist außerordentlich klein und unterstreicht erneut die noch rätselhafte Natur der Quasare.

Die zeitliche Einordnung der Explosionen in den Radio-

galaxien, die offensichtlich stattgefunden haben, ist einfach, wenn es dafür optische Anhaltspunkte gibt. Gemeint sind hierbei die filamentartigen Strukturen und ihre Geschwindigkeiten, mit denen sie sich aus den Galaxienkernen wegbewegen. Die durchgeführten Abschätzungen ergaben, daß die eruptiven Vorgänge höchstens 10^8 Jahre, eventuell aber erst 10^4 Jahre zurückliegen.

Die Mehrheit der Radiogalaxien zeigt aber keine optischen Merkmale, die zur Datierung der Explosionen geeignet sind. Daher muß zu einer anderen Methode gegriffen werden, die darauf beruht, daß ein Großteil der Strahlung auf nichtthermische Ursachen zurückgeht. Auf der Grundlage der Theorie der Synchrotronstrahlung läßt sich – wenn die Stärke des Magnetfeldes bekannt ist – die „Lebenszeit“ der schnellbewegten Elektronen berechnen, d. h. der Zeitraum, in dem sie die Hälfte ihrer Energie abgestrahlt haben. Allgemein gilt, daß die energiereichsten Elektronen die kürzeste Lebenszeit haben, weil sie am schnellsten ihre Energie in Strahlung umwandeln. Setzt man voraus, daß die gesamte Energieausstrahlung der Radiogalaxien auf dem Synchrotronprozeß beruht und die Elektronen durch einen einmaligen Vorgang in das Magnetfeld „hineingeschossen“ wurden, dann kann aus der beobachteten Energieverteilung im Spektrum auf die Maximalenergie der schnellen Elektronen und damit auch auf deren Alter geschlossen werden. Die abgeleiteten Zeiten betragen maximal $3 \cdot 10^8$ Jahre, mindestens aber $7 \cdot 10^5$ Jahre.

Die wahrscheinlichste Dauer der Ausbrüche in den Radiogalaxien scheint in der Größenordnung von 10^6 Jahren zu liegen. Die explosiven Vorgänge im optischen Spektralbereich deuten Zeiträume von 10^4 Jahren an. Auf Grund der Kürze der Zeitdauer der Explosionen und beobachteten Häufigkeit der Radiogalaxien und Quasare ist anzunehmen, daß derartige Vorgänge während der Entwicklung einer Galaxis öfter auftreten müssen. Nach einer statistischen Untersuchung verhält sich die Anzahl der Radiogalaxien zu der normaler Sternsysteme wie 1 zu 10^3 bis 10^4 . Setzt man deren „Lebensdauer“ mit 10^{10} Jahren an und die Zeitspanne einer beobachteten Explosion mit 10^6 Jahren, dann folgt daraus, daß im Durch-

schnitt jede Galaxis während ihrer Entwicklung bis zu 10 derartigen Ereignissen erleiden kann. Sollten sich die explosiven Prozesse nur auf bestimmte Typen von Sternsystemen beschränken, etwa nur auf die absolut hellsten, dann erhöht sich die Anzahl der Explosionen je Galaxis erheblich. Unter diesen Umständen macht eine Galaxis sogar 20 bis 200 Ausbrüche während ihrer Entwicklung durch.

Der kurzlebige Charakter der eruptiven Vorgänge und die bis jetzt gefundene Anzahl von Radiogalaxien und Seyfert-Galaxien sprechen für die Wiederholungstendenz der Explosionen in den Sternsystemen. Da bei jedem derartigen Vorgang ein Energiebetrag von etwa 10^{48} bis 10^{55} Ws freigesetzt wird, dürfte die damit verbundene Zerstreuung der in den Sternsystemen enthaltenen Energie auf deren Entwicklung einen wesentlichen Einfluß ausüben. Die freigesetzte Energie entweicht in den intergalaktischen Raum und trägt dort zur Erhöhung der Energiedichte bei.

Der gegenwärtige Stand der Erforschung der Radiogalaxien und Quasare erlaubt noch keine endgültigen Aussagen über die physikalische Natur der bei ihnen beobachteten katastrophenartigen Vorgänge. Die Häufigkeit ihres Auftretens deutet aber an, daß sie keineswegs als Ausnahmefälle anzusehen sind. Man ist daher gezwungen, in ihnen Ausdrücke von bestimmten Entwicklungsphasen in Sternsystemen zu sehen. Von V. A. Woronzow-Weljaminow wird vermutet, daß die Quasare und quastellaren Galaxien sogar Vorstadien von Galaxienhaufen sind. Bei der Explosion eines derartigen massereichen Objektes sollen sich einige größere Bruchstücke bilden, die auseinanderstreben und sich ihrerseits weiter teilen. Am Ende des Vorganges wäre auf diese Weise ein Galaxienhaufen entstanden. Durch diese Hypothese fänden einige Beobachtungstatsachen eine Erklärung, und es könnten andererseits einige bestehende Schwierigkeiten bei der Interpretation der Quasarerrscheinung umgangen werden.

Auch in unserem Milchstraßensystem scheint sich vor einiger Zeit eine etwas schwächere Explosion ereignet zu haben. Ihr schreibt man die Existenz des Radiohalos unserer Galaxis zu. Auch das beobachtete Ausfließen von interstellarem Wasser-

stoff aus dem Kerngebiet des Sternsystems findet durch die Annahme einer Explosion eine Erklärung.

Die Erforschung der Radiogalaxien und quasistellaren Objekte wird uns in den kommenden Jahren noch manche Rätsel aufgeben. Wenn sie aber gelöst werden, gelangen wir sicher zu teilweise völlig neuen Einsichten in die Vorgänge bei der Entwicklung der Galaxien.

Schluß

In den einzelnen Kapiteln wurde der Versuch unternommen, vom gegenwärtigen Stand der Arbeiten über die Entwicklung der verschiedenen Himmelskörper einen kurzen Überblick zu geben. Dabei wurde darauf geachtet, gesichertes Wissen von hypothetischen Vorstellungen und den noch ungelösten Problemen zu trennen. Die noch offenstehenden Fragen fanden nicht nur deshalb Erwähnung, weil sie die Grenzen des erreichten Wissensstandes am besten charakterisieren, sondern weil sich gerade auf diese Probleme die künftige Forschung konzentrieren wird.

Notwendigerweise wird die Übersicht über die kosmogonischen Vorstellungen in dem Maße veralten, wie der wissenschaftliche Fortschritt in der Astronomie vorangeht. Dieser Aspekt sollte nicht aus den Augen gelassen werden, denn jede neue Erkenntnis führt zu neuen Horizonten. Wir sehen daher mit großer Spannung der vor uns liegenden Zeit entgegen, die nicht nur die Beantwortung alter, noch offener Fragen bringen wird, sondern uns noch manches aufregende Problem aufgibt.

Übersicht über die Tabellen

Tab. 1	Zahlenwerte einiger Zustandsgrößen der Sterne	45
Tab. 2	Zustandsgrößen eines chemisch homogenen Sternes von 2,5 Sonnenmassen (nach M. Schwarzschild)	62
Tab. 3	Verweilzeiten von Sternen verschiedener Masse auf der Hauptreihe	69
Tab. 4	Einteilung der Populationen	86
Tab. 5	Zeitdauer der einzelnen Entwicklungsphasen für Sterne unterschiedlicher Masse (nach I. Iben jr.)	111
Tab. 6	Zustandsgrößen der Planeten	157
Tab. 7	Massenverteilung und Bahnformen im Sonnensystem	160
Tab. 8	Chemische Zusammensetzung der Gesteinsproben vom Mond und ihr Kristallisationsalter (Angaben in Massenprozent bzw. Jahren)	184
Tab. 9	Einige charakteristische Größen von Sternsystemen	189

Inhalt

Einleitung	5
Mathematische, physikalische und astronomische Grundlagen	9
Große und kleine Zahlen	9
Strahlungsgesetze	11
Atome, ihre Kerne, Elektronenhüllen und Eigenschaften	13
Lufthülle der Erde	22
Photometrische Grundlagen	25
Astronomische Beobachtungsinstrumente	31
Beobachtungsgrundlagen	36
Zustandsgrößen der Sterne	36
Innerer Aufbau der Sterne	54
Energiefreisetzung in den Sternen	62
Interstellare Materie	71
Veränderliche Sterne	78
Sternsystem	80
Entwicklung der Sterne	89
Kurzer historischer Überblick	89
Bildung der Sterne	93
Kontraktionsstadium der Sterne	98
Sterne im Hauptreihenstadium und ihre Entwicklung zu roten Riesen	103

Sternentwicklung nach dem Riesenstadium	112
Vergleich der theoretischen Ergebnisse mit den Beobachtungen	119
Entstehung der chemischen Elemente im Weltall	138
 Kosmogonie des Planetensystems	 151
Untersuchungsprobleme	151
Mitglieder des Sonnensystems und ihre Eigenschaften	153
Kosmogonische Hypothesen über die Entstehung des Sonnensystems	163
Doppelplanet Erde-Mond	178
Mond	182
 Sternsysteme	 186
Beobachtungsdaten	186
Zur Kosmogonie der Sternsysteme	195
Radiogalaxien und quasistellare Objekte	206
Zur Natur der Radiogalaxien und Quasare	213
 Übersicht über die Tabellen	 221

URANIA

Wie entstehen die Himmelskörper?
Welchen Entwicklungsprozessen unterliegen sie?
Woraus bestehen die Sterne und der interstellare „Staub“?
Gab es einen „Urknall“? Sind Sternexplosionen häufig?
Wie groß ist die Energiefreisetzung im Universum?
Wie erforschen wir unsere Galaxis
und die anderen Sternsysteme?