

ERDGESCHICHTE UND KOSMOGONIE

Von

Dr. Kurt Himpel

z. Zt. Assistent a. d. Sternwarte Bamberg

Mit 8 Abbildungen im Text



1 9 4 0

AKADEMISCHE VERLAGSGESELLSCHAFT M. B. H.
LEIPZIG

Copyright 1940 by Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H. Leipzig
Printed in Germany/ Druck von Paul Dünnhaupt, Köthen (Anhalt)

Meinem verehrten Lehrer
Heinrich Vogt

Vorwort.

Von den Versuchen zur Lösung der von der Erdgeschichte aufgezeigten Probleme hat weder der geschichtlich ältere einer Zurückführung auf kosmische, meist katastrophale Einwirkungen noch der neuere eines Ausganges von den Verhältnissen der Jetztzeit, wie er in dem Aktualitätsprinzip seine besonders deutliche Formulierung fand, zu einem völlig befriedigenden Erfolg geführt. Nicht nur in der Erdgeschichte, sondern bis zu einem gewissen Grade auch bei der Betrachtung der Entwicklungswege im Weltall wird man heute vielmehr damit zu rechnen haben, daß auf längere Zeiten einer ruhigen und kontinuierlichen Entwicklung immer wieder Perioden stärkerer Aktivität mit mehr oder weniger diskontinuierlichem Ablauf der Geschehnisse folgen werden, die, was das Wesentliche dabei ist, dem Gesamtverlauf ihren Stempel ebenso deutlich aufdrücken wie die ersteren.

Unter bewußter Herausstellung dieser Auffassung will die vorliegende Schrift den Versuch machen, die Verbindungen zwischen Erdgeschichte und Kosmogonie einer erneuten Diskussion zu unterwerfen. Hinsichtlich der Kosmogonie wurde es dabei als Hauptaufgabe betrachtet, zu untersuchen, ob und inwieweit die Erdgeschichte — das Wort „Erdgeschichte“ im allgemeinsten Sinne zu verstehen — Aufschlüsse und Hinweise über bestimmte Entwicklungen im Weltall geben kann. Bezüglich der Erdgeschichte wurde dabei das Hauptaugenmerk darauf gerichtet, in welcher Weise und mit welcher Abgrenzung die autonome Entwicklung des Erdkörpers einerseits, die kosmische Beeinflussung andererseits das Bild, das durch die Beobachtungen erschlossen wurde, geformt haben.

Es ist mir ein Bedürfnis, auch an dieser Stelle dem Herausgeber für seine große Mühe und seine vielseitige Unterstützung, die er von Anfang an dem Buche zugewandt hat, von ganzem Herzen zu danken. Zu besonderem Danke bin ich jedoch auch dem Verlag für sein Entgegenkommen in jeder Art verpflichtet.

Heidelberg, Juli 1939.

Der Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung . . .	1
Erstes Kapitel: Das erdgeschichtliche Beweismaterial	3
1. Das Alter der Erde	3
2. Kosmischer Massenzufluß zur Erde	7
3. Paläoklimatologie	13
a) Die fossilen Klimazeugen	13
b) Der Verlauf der Vorweltklimata	15
c) Terrestrische Erklärungsmöglichkeiten	21
d) Veränderlichkeit der Sonnenstrahlung	31
Zweites Kapitel: Die Sonne als Fixstern	44
4. Das Zustandsdiagramm	44
5. Der innere Aufbau der Sterne	56
6. Alter, Energieerzeugung und Entwicklung der Sterne	65
Drittes Kapitel: Die Entwicklungsgeschichte des Planeten- systems	97
7. Das Beobachtungsmaterial	98
8. Entstehungsmöglichkeiten	106
Viertes Kapitel: Das System Erde-Mond	116
9. Allgemeines und Einfanghypothese	116
10. Die Rotationshypothese	118
11. Geologische Konsequenzen	122
Schlußzusammenfassung	127
Literaturverzeichnis	130
Namenregister	137
Sachregister	139

Einleitung.

Ebenso wie die Erde selbst nur ein winziger Baustein im Kosmos ist, ist auch ihre Geschichte nur ein unbedeutender Ausschnitt aus der weit größeren Entwicklungsgeschichte des Universums. Aber trotzdem sind die Grundlagen und Methoden in beiden Fällen von Grund aus verschieden. Denn, was wir vom Kosmos beobachten, ist das Augenblicksbild einer nach Belieben zu vermehrenden Zahl von Sternen, Sternsystemen oder sonstigen kosmischen Gebilden; auch eine jahrhundertelange Beobachtungszeit liefert kaum mehr, denn Jahrhunderte sind eben nur ein Augenblick im kosmischen Zeitmaß. Die Erdgeschichte hingegen klärt uns auf über die Entwicklungsgeschichte zwar nur eines einzigen Himmelskörpers, der Erde selbst; aber diese Erforschung erstreckt sich über eine Zeitspanne, die, wie wir heute sicher wissen, auch an kosmischen Zeiträumen gemessen, beträchtlich ist. Nun gibt es in beiden Gebieten eine Fülle ungelöster Probleme, und zweifellos kann es nur vorteilhaft sein, die Möglichkeit einer gegenseitigen Unterstützung und vor allem Ergänzung beider Forschungswege zu prüfen.

Was die Erdgeschichte uns liefert, ist einmal eine absolute Zeitskala, und sind weiter Aussagen über kosmischen Materialzufluß zur Erde, und vor allem gibt uns die Paläoklimatologie, zum mindesten grundsätzlich, die Möglichkeit an die Hand, aus der klimatischen Entwicklung der Erde Rückschlüsse auf den Lebensweg der Sonne sowie die Entwicklungsgeschichte des Planetensystems zu ziehen. Ein Teilgebiet der Kosmogonie schließlich ist ebensogut auch ein Teilgebiet der Erdgeschichte, nämlich die Geschichte des Systems Erde-Mond. Umgekehrt steht der Kosmogonie die Möglichkeit offen, an Hand der großen Zahl der zur Verfügung stehenden Objekte dieses räumliche Nebeneinander in die zeitliche Aufeinanderfolge des Einzelsternes, also auch der Sonne, umzudeuten; auch wird es ihr unter Umständen gelingen, besondere Ereignisse oder sonst abnorme Zustände, die auch die Sonne auf ihrem Lebensweg durchgemacht haben könnte, an der Sonne ähnlichen Fixsternen aufzufinden und durch deren Anwendung auf die Sonne umgekehrt erdgeschichtliche Phänomene eher verstehen zu lassen. Damit ist die Grundlage der Zusammenarbeit und somit auch das Ziel des Buches von vorneherein klar umrissen.

Die vorliegende Monographie soll ein Bericht über den Stand der Beziehungen der einzelnen Forschungszeige zu einander sein. Daß ein solcher Versuch stets mit großen Schwierigkeiten zu kämpfen haben wird, braucht wohl kaum besonders betont zu werden. Die erste und vielleicht bedeutsamste Schwierigkeit ist die, daß bei einem derart ausgedehnten Stoffbereich heutzutage einem einzelnen eine gleichmäßige Beherrschung kaum mehr möglich ist. Aber eine Kapitulation vor dieser Schwierigkeit, d. h. eine bewußte Beschränkung der Forschungstätigkeit auf jeweils vereinzelte Gebiete, wäre nur Wasser auf die Mühle einer weiteren Zersplitterung — gegen die gerade in unserer Zeit eine nur zu berechtigte Reaktion eingesetzt hat. Und wenn auf allen Seiten eine Bereitwilligkeit zu engerer Fühlungnahme mit dem Nachbargebiet vorhanden ist, wird das, was einem einzelnen nicht möglich ist, doch erreicht werden können. Die zweite Schwierigkeit betrifft speziell das vorliegende Buch, da in den in ihm behandelten Gebieten Vieles noch sehr hypothetischen, um nicht zu sagen spekulativen Charakter trägt, während das „gesicherte“ Wissen relativ gering ist. Die Grenze ist hier nicht leicht zu ziehen: Wer in der Geschichte der Naturwissenschaft mit offenen Augen blättert, wird immer wieder finden, daß vielfach gerade die scheinbar „selbstverständlichen“ Annahmen es waren, die den Fortschritt hartnäckig aufgehalten haben; erst nach Erschöpfung sämtlicher Möglichkeiten kam dann ein großer Geist, der liebgewordene Fesseln durch auf den ersten Blick scheinbar befremdende Ideen sprengte. Was also heute als das am besten Gesicherte erscheint, kann sich in wenigen Jahrzehnten als das Falscheste herausstellen, und umgekehrt.

Gegenüber diesen Ungewißheiten gibt es nur ein Kriterium: wie eine Hypothese sich nicht nur auf dem Gebiet, auf dem oder für das sie aufgestellt wurde, auswirkt, sondern wie sie sich zu anderen, nicht unmittelbar von ihr berührten Problemen stellt. Die Zusammenarbeit der verschiedenen Gebiete der Naturwissenschaft erscheint so nicht nur als eine mehr oder weniger interessante Erweiterung des eigenen Faches, sondern vielmehr als die beste und zuverlässigste Prüfungsmöglichkeit der Tragweite der Ideen des eignen Gebietes. Und so sehr der einzelne an seinem Forschungsgebiete hängen mag, eines darf er nicht vergessen: Jene Grenzen, die der Mensch gezogen hat, sind nicht von der Natur vorgezeichnet, sondern willkürlich, aus Tradition, Zweckmäßigkeit usw. heraus entstanden. Die Vorgänge und die Zusammenhänge in der Natur werden sich bestimmt nicht um jene willkürlichen Schranken bekümmern; wer es nicht vermag, über sie hinaus zu schauen, wird immer nur zu einem teilweisen Verständnis gelangen können.

Erstes Kapitel.

Das erdgeschichtliche Beweismaterial.

1. Das Alter der Erde.

Bereits in der Einleitung wurde gesagt, daß das Wichtigste, was die Erdgeschichte zu einem Anschluß an die Kosmogonie befähigt, die von ihr näher zu erforschende große Zeitspanne ist, und es versteht sich von selbst, daß auf eine sowohl theoretisch gut fundierte wie auch experimentell möglichst exakte Bestimmung des absoluten Wertes dieser Zeitspanne größtes Gewicht zu legen ist. Eine auch in historischer Hinsicht als Vorarbeit zu diesem Problem erscheinende Aufgabe ist die Bestimmung des *relativen* Alters, die schon viel früher in weitgehendem Maße von der Geologie durchgeführt wurde. Die Einteilung der Erdgeschichte in Altertum, Mittelalter und Neuzeit, die weitere und bis ins einzelste gehende Unterteilung dieser Abschnitte in Formationen, Unterformationen usw. wurde möglich gemacht durch die sich aus der fortschreitenden Entwicklung der Lebewelt ergebenden *Leitfossilien*, die als Zeitmarken verwendbar sind; vgl. [1] S. 78ff. Die nicht nur für die Geologie, sondern auch für die gesamten im Folgenden betrachteten Probleme wichtigste Aufgabe dieses Forschungszweiges ist die möglichst genaue *zeitliche Parallelisierung* der jeweiligen geologischen Befunde. Greifen wir, um gleich ein Beispiel zu geben, den Fall heraus, daß in der Steinkohlenzeit in Europa ein sehr warmes, in Indien aber ein sehr kaltes Klima geherrscht hat; bevor wir auch nur den Versuch einer Erklärung machen dürfen, müssen wir so genau wie irgend möglich wissen, ob diese beiden Klimate gleichzeitig, oder zu verschiedenen Zeiten geherrscht haben. Zur Beurteilung vor allem klimatischer Bilder ist ferner eine so weit wie möglich vollständige paläogeographische Erdkarte erforderlich, die ebenfalls auf Grund möglichst gleichzeitiger Fossilien¹⁾ erhalten werden kann. Aber damit haben wir nur die Frage der relativen zeitlichen Aufeinanderfolge gelöst; der zweite Schritt ist nun die Bestimmung der relativen Zeitdauer der einzelnen

¹⁾ Man wird hier zweckmäßig solche Fossilien bevorzugen, die bei weltweiter Verbreitung relative Kurzlebigkeit aufweisen.

Erdzeitalter; vgl. hierzu [2] S. 268ff. Diese geschieht am einfachsten durch Vergleich der relativen Mächtigkeit der Sedimentmassen; die besten Ergebnisse waren, bei Gleichsetzung des Tertiärs mit 1, für das Mesozoikum 3 und das Paläozoikum 12. Von hier zu einer absoluten Zeitskala überzugehen ist möglich, wenn wir die heutige Sedimentationsgeschwindigkeit bestimmen und extrapolieren. Eine ganze Reihe von Bestimmungen auf solche und ähnliche Weise führte für die Tertiärzeit zu einer Dauer von 3–4 Millionen Jahren und daraus für die gesamte Zeit seit dem Kambrium zu 50–60 Millionen Jahren. Aber selbst wenn wir davon absehen, daß ein und dieselbe Formation in verschiedenen Gegenden sehr verschieden mächtige Sedimente abgesetzt haben kann, haftet dieser Methode noch ein ernsthafter theoretischer Mangel an: ob die Geschwindigkeit der geologischen Prozesse, wie Sedimentation, Abtragung usw. immer die gleiche und gleich der heutigen war, ist eine Frage, die wir kaum bejahen können. Solche Prozesse hängen nämlich wesentlich ab einerseits von der Form des Erdreliefs, andererseits vom Charakter des Klimas. Bei stärker differenziertem Relief und schärferen klimatischen Kontrasten, wie wir sie heute auf der Erde vorfinden, gehen sie im allgemeinen wesentlich schneller vor sich als bei ebenen Relief und ausgeglicheneren Klimaten, wie wir sie in der Erdgeschichte vielfach vorfinden. Aus diesem Grunde müssen wir damit rechnen, daß unsere so gewonnenen Alterswerte merklich zu klein sind, da zur Bildung der gleichen Sedimentmenge früher längere Zeit erforderlich war. Für kleinere Zeitabschnitte hingegen, insbesondere für an die Jetztzeit anschließende, können wir auf diese Art verhältnismäßig zuverlässige Werte erhalten; wie man so z. B. aus der Rückwärtsverlegung des Niagarafalles Werte zwischen 10 und 30 Tausend Jahren seit dem Ende der letzten Eiszeit fand; Ähnliches auch bei der Sedimentation in Schweizer Seen, wo man hierfür Werte zwischen 10 und 20 Tausend Jahren erhielt. Die besten Resultate lieferte die Methode von de Geer [3], der die jährlich abgesetzten Bändertone in schwedischen Seen bis zum Ende der letzten Eiszeit verfolgte und hier zu rund 10000 Jahren kam, die also in befriedigender Übereinstimmung mit obigen Bestimmungen waren. Schließlich sei noch die Zählung von Jahresringen an jahrtausendealten kalifornischen Mammutbäumen erwähnt, die ebenfalls zu einem Anschluß der jüngsten Vergangenheit an die Jetztzeit verwendet wurde. Auf solche Weise kann man also eine absolute Zeitrechnung der Postglazialzeit durchführen; zu einer Extrapolation auf erdgeschichtliche Zeiträume reicht sie aber keinesfalls aus.

Sind die geologischen Methoden allein unzureichend, so kann man von einer Parallelisierung der geologischen mit astronomischen Vorgängen mehr

erhoffen: eine solche ist ja gerade das eigentliche Ziel des vorliegenden Buches, und es wäre sicherlich kein erfolgversprechender Anfang, schon a priori die Erdgeschichte in anderweitige Abhängigkeit zu bringen. In der Tat haben alle älteren diesbezüglichen Versuche, von denen der von A. Blytt (zitiert nach [2] S. 271), der mit extremen Werten der Erdbahnezentrizität geologische Ereignisse wie Transgression oder Regression des Meeres usw. parallelisieren wollte, am meisten Beachtung fand, heute nur noch historisches Interesse; ausgenommen ist hier vielleicht die Möglichkeit, durch Rückwärtsrechnung astronomischer Elemente zu einer absoluten Chronologie des Quartär zu gelangen (S. 34 f.), und hier kommt man zu einer Dauer von mindestens 600 000 Jahren. Da die Mächtigkeit der Ablagerungen des Tertiär mindestens das 20–30fache derjenigen des Quartär beträgt, erkennt man auch hier, daß ein Alter dieser Formation von 3–4 Millionen Jahren zu klein ist.

Aber auch mit dieser astronomischen Chronologie kommt man nicht über das Quartär hinaus, und so bleibt nach Versagen der geologischen und astronomischen Methoden nur noch die Physik, die in der Tat durch Anwendung der *Radioaktivität* das Gewünschte leistet. Bekanntlich zerfällt Uran bei einer mittleren Lebensdauer von $7 \cdot 6 \cdot 10^9$ Jahren nach einer Reihe von Zwischenprodukten in Blei, und man hat gefunden, daß durch keinen noch so intensiven Vorgang dieser Zerfall beeinflußt werden konnte. Hier haben wir also die unerläßliche theoretische Grundlage, daß sich die Zerfallsgeschwindigkeit in geologischer Zeit nicht geändert hat, und so können wir ohne weiteres aus dem Bleigehalt eines Uranminerals dessen Alter berechnen. Man kann nach dieser Methode auch den Heliumgehalt eines solchen Minerals verwenden, doch kann immerhin Helium entwichen sein, so daß speziell bei älteren Mineralien der Bleimethode der Vorzug gegeben werden muß. In vereinzelt Fällen schließlich konnte aus der Intensität und Färbung der sog. pleochroitischen Höfe das Alter berechnet werden; vgl. zu diesem Kapitel [44]. Das älteste gefundene Gestein, ein Uraninit aus Rußland, hat ein Alter von 1900 Millionen Jahren. Für das Kambrium ergaben verschiedene Mineralien ein Alter von 5–600 Millionen Jahren. Das Alter für die verschiedenen Formationen gebe ich im Zusammenhang mit anderen Daten in Tabelle 1. Unerläßlich ist ferner die Kenntnis der mittleren Unsicherheit einer solchen Bestimmung; sie wird von den Fachleuten zu nicht größer als 10% angegeben. Damit hätten wir eine theoretisch fundierte erdgeschichtliche Zeitskala; abgesehen davon jedoch, daß aus verschiedenen Formationen keine geeigneten Mineralien vorliegen, muß nach wie vor zur exakten zeitlichen Parallelisierung die Fossilienmethode benutzt werden. Erst bei den ältesten Formationen, z. B. dem

Algonkium und früheren, kann die radioaktive Methode die feldgeologische unterstützen.

Im Hinblick auf die Wichtigkeit dieser Zahlen sei noch folgendes gesagt: Wir hatten zuvor gesehen, daß die geologischen Methoden etwa 10mal kleinere Werte lieferten, und es ist daher begreiflich, daß manche Geologen die von der physikalischen Methode gelieferten großen Zahlen etwas skeptisch betrachteten. Es sei daher besonders erwähnt, daß die neuen Untersuchungen über die Änderung der Geschwindigkeit geologischer Vorgänge wie Sedimentation usw. tatsächlich eine bedeutende Zunahme dieser Geschwindigkeit vom Paläozoikum bis jetzt wahrscheinlich machen konnten, und daß deren Berücksichtigung die anfängliche Diskrepanz zwischen beiden Methoden nahezu völlig beseitigt hat (vgl. dazu den aufschlußreichen Aufsatz [5]).

Wir kommen so für die älteste Erdkruste zu einem Alter von rund 2 Milliarden Jahren und für die Dauer des Lebens auf der Erde, dessen Spuren weit ins Algonkium zurückreichen, zu wenigstens 1 Milliarde. Aber damit wissen wir noch nichts über das Alter der Erde selbst, und es entbehrt nicht einer gewissen Komik, daß hier gerade der entgegengesetzte Fehler gemacht wurde wie bei der Bestimmung des Alters der Erdkruste. Während, wie oben gesagt, anfänglich bei vielen Geologen Mißtrauen gegen die hierfür gefundenen Alterswerte bestand, war umgekehrt für die vermutete Zeitdauer der Erde im feurigen Zustand keine Zahl zu groß¹⁾; meist las man, vor allem in populären Darstellungen, von unermeßlichen Zeiträumen. Nun kommt ein Gaskugel- oder gar Fixsternstadium für die Erde überhaupt nie in Betracht (S. 109), und auch im feuerflüssigen Zustand kann sich ein so kleiner Himmelskörper nur relativ sehr kurze Zeit halten; Jeffreys [4] S. 79 kommt zu der auf den ersten Blick erstaunlich kurzen Zeit von 10–15000 Jahren, wobei es fast nichts ausmacht, ob die Anfangstemperatur 5000° oder 50000° betrug. Zwar wurde hiergegen eingewandt, daß durch die anfänglich mächtige Wasserdampfhülle der Abkühlungsprozeß stark verlangsamt würde [6], doch kann auch diese Verzögerung nur die Größenordnung von Jahrmillionen, aber nicht Jahr-milliarden erreichen, so daß auch die Erde jedenfalls nicht wesentlich älter als 2 Milliarden Jahre ist; gelegentlich einer Diskussion bekannter Autoritäten wurde 2·7 Milliarden als wahrscheinlichste Zahl genannt [7].

Schon an dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß diese Zahl die größte Bedeutung auch für die Kosmogonie hat: denn, da die Sonne mindestens

¹⁾ In der Zeitschrift „Natur und Volk“ schrieb noch im Jahre 1935 ein bekannter Geologe von den „unermeßlichen, auf mehrere Billionen (!) Jahre geschätzten Zeiten, während der die Erde als Stern bestand“.

gleichaltrig mit der Erde sein muß, so muß auch ihre Lebensdauer mindestens 2–3 Milliarden Jahre betragen, und wir haben somit eine untere Grenze für die Lebenszeit eines Fixsternes bereits festgelegt.

2. Kosmischer Massenzufluß zur Erde.

Die naheliegendsten und am besten prüfbarsten Zusammenhänge zwischen Erde und Kosmos ergeben sich aus dem direkten Zufluß kosmischen Materials zur Erde. Man kann an dieses wichtige Problem von zwei Seiten näher herankommen, indem man einerseits von dem jetzigen kosmischen Zufluß ausgeht, bzw. an Hand astronomischer Beobachtungen auf die Wahrscheinlichkeit anderweitigen Zuflusses schließt, andererseits aber, indem man die Frage stellt, ob es geologische Phänomene gibt, die einen kosmischen Materialzufluß fordern. Da über den in jeder klaren Nacht sichtbaren Zustrom kosmischer Materie, die Meteore, von berufenster Seite erst kürzlich in dieser Sammlung ein Band erschienen ist [8], sei für alle Einzelheiten dorthin verwiesen, und wir können daher gleich auf die für uns wichtigsten Punkte eingehen.

Die zuerst benötigte Angabe ist die Menge des kosmischen Zustromes an Meteoriten aller Gattungen, d. h. von den schwächsten Sternschnuppen bis zu den größten Meteoriten. Die diesbezüglichen Angaben gehen z. T. weit auseinander, da über die gesamte Menge vor allem des feineren kosmischen Staubes nur wenig sichere Schätzungen vorliegen. R. Schwinner, der sich um die Erforschung der Beziehungen der Meteoriten zur Geologie besonders bemüht hat, gibt hierfür in [9] S. 149 den Wert $5 \cdot 10^8$ g pro Jahr; Hoffmeister [8] S. 81 zitiert eine Bestimmung von Wylie mit $2 \cdot 10^9$ g pro Jahr, was eine genügende Übereinstimmung ist, so daß wir mit 10^9 g pro Jahr rechnen wollen. Das gäbe in erdgeschichtlicher Zeit insgesamt $2 \cdot 10^{18}$ g, also noch nicht einmal 10^{-9} der gesamten Erdmasse und noch nicht 1% der Masse der Erdatmosphäre; vorausgesetzt ist hier natürlich, der Meteorzustrom sei stets konstant und gleich dem heutigen gewesen, was aber sehr unwahrscheinlich ist, da wir bisher keine fossilen Meteoriten gefunden haben, obwohl, wie Schwinner abschätzt, mindestens einige tausend Stück durch die Hände der Bergleute gegangen sein müßten. Der Schluß, daß Meteoriten in erdgeschichtlicher Zeit zum mindesten bedeutend seltener fielen als heute, ist unvermeidlich; das Sonnensystem muß in allerjüngster Zeit (nach Schwinner vor etwa 20000 Jahren) in eine Meteoritenwolke hineingeraten sein, vgl. [10].

Von großer Wichtigkeit ist die Frage nach der kosmischen Herkunft der Meteore, worüber wir von der aus den Beobachtungen errechneten Bahngeschwindigkeit Aufschlüsse erhalten können. In der Mehrzahl der

Fälle ergaben sich hyperbolische Geschwindigkeiten, die mit Gewißheit auf interstellaren Ursprung hinweisen; in anderen Fällen, speziell bei den Meteorströmen, konnte deutlich ein Zusammenhang mit bestimmten Kometen festgestellt werden, womit die Zugehörigkeit zum Sonnensystem erwiesen ist.

Besonders wichtige Aufschlüsse ergab die genaue Erforschung der chemischen Zusammensetzung der Meteoriten. Während die Steinmeteoriten eine gewisse chemische Ähnlichkeit mit der Erdkruste zeigten, glaubte man aus den Eisenmeteoriten weitgehende Schlüsse auf den chemischen Aufbau des Erdkernes (S. 103) ziehen zu dürfen. So glaubte man auch aus der Tatsache, daß bei diesen zu 90 % Eisen noch 9 % Nickel kamen, beim Erdkern eine gleiche Beimengung annehmen zu müssen; schließlich glaubte man, durch die Feststellung, daß Eisenmeteoriten einen rund 10mal geringeren Gehalt an radioaktiven Elementen als Steinmeteoriten und diese wieder weniger als die Erdkruste enthielten, die von ganz anderer Seite nahegelegte Schlußfolgerung, daß radioaktive Stoffe im Erdinnern praktisch fehlten, bekräftigt zu sehen; auf diese äußerst wichtige Frage müssen wir noch zurückkommen (S. 104).

Von großer Bedeutung, vor allem für die Kosmogonie, glaubte man vielfach die von Paneth [11] an Meteoriten durchgeführten Altersbestimmungen ansehen zu dürfen. Diese geschahen nach einer ähnlichen Methode wie bei der Bestimmung des Erdalters, nur daß infolge des sehr geringen Bleigehaltes die Heliummethode bevorzugt wurde. Ein wesentlicher Verlust an Helium kommt angesichts der Tatsache, daß selbst ein mehrstündiges Erhitzen praktisch keinen Verlust brachte, kaum in Betracht. Durch Untersuchung an 38 Meteoriten kam Paneth zu dem wichtigen Resultat, daß 1. kein höheres Alter als 3 Milliarden Jahre gefunden wurde, 2. das Alter der Meteoriten sich ohne Bevorzugung eines bestimmten Wertes zwischen 100 und 2900 Millionen Jahren verteilte. Wenn besonders das erste Ergebnis als für die Kosmogonie insofern wichtig angesehen wurde, als es für ein Alter des Universums von nicht höher als 3 Milliarden Jahren spräche [12], so könnte das nur dann als beweiskräftig gelten, wenn — wie übrigens auch zumeist angenommen wird — die Meteoriten wirklich aus allen Gegenden des Weltraumes kämen, was aber angesichts der geologisch erwiesenen Beschränkung auf eine kosmische Wolke nicht zutrifft (vgl. hierzu S. 10ff.).

Der nächste Schritt ist der, daß wir an Hand unserer Kenntnisse über die Verteilung von Materie, einerseits innerhalb unseres Planetensystems, andererseits im Milchstraßensystem, Rückschlüsse auf ehemals möglichen Massenzufluß der Erde ziehen. Daß die Erde mit einem Himmels-

körper von Planeten- oder gar Fixsterngröße zusammengestoßen sei, kommt ernstlich wohl nicht in Betracht; der Zusammenstoß mit einem Planetoiden ist zwar angesichts der relativen Seltenheit dieser Körper im Bereich der Erdbahn nicht sehr wahrscheinlich, wenn auch im Hinblick auf die sich mehrenden Entdeckungen solcher Körper in großer Nähe¹⁾ der Erde durchaus nicht ausgeschlossen. Daß noch in geologisch jüngster Zeit größere Körper mit der Erde zusammentrafen, bezeugt z. B. der berühmte Meteorkrater in Arizona, der sich kaum anders als meteorischen Ursprungs deuten läßt. Welche Folgen solch ein Meteorfall für seine Umgebung haben kann, wird uns deutlich durch das sibirische Meteor vom 30. 6. 1908 vor Augen geführt.

Angesichts der regellos verteilten Bahnen der Kometen kann auch der Zusammenstoß der Erde mit einem Kometen in geologischer Zeit nicht als ganz unwahrscheinlich gelten; die Folge wäre ein gewaltiger Steinregen auf der Erde (vgl. S. 11).

Mit größerer Wahrscheinlichkeit dürfen wir aber mit dem Zusammentreffen bzw. dem Durchgang des Sonnensystems durch eine der sog. *Dunkelwolken* rechnen, wie wir sie ja mit freiem Auge am nächtlichen Himmel sehen können. Da trotzdem die genaue Erforschung dieser Wolken der jüngste Zweig astrophysikalischer Forschung ist, so kann es nicht verwundern, daß Schlüsse, die man auf Grund der anfänglich vermuteten großen Dichten dieser Wolken gezogen hat, heute nicht mehr als gültig betrachtet werden können. Während man zu Anfang mit Dichten von der Größenordnung 10^{-18} g/cm³, teilweise mit noch erheblich höheren, rechnen zu können glaubte, so haben die modernen Untersuchungen ganz wesentlich geringere Werte ergeben (vgl. [13], [14]). Die Absorption ergab sich zu weniger als einer Größenklasse pro 1000 parsec²⁾, die Dichte zu der Größenordnung 10^{-25} g/cm³ (z. B. Aurigawolke $0.6 \cdot 10^{-25}$, Cepheuswolke $0.4 \cdot 10^{-25}$ g/cm³), und wenn man bedenkt, daß $0.4 \cdot 10^{-26}$ g/cm³ die mittlere Dichte der interstellaren Materie überhaupt ist, so sieht man, daß, entgegen dem Augenschein, diese Dunkelwolken nur eine geringe Verdichtung darstellen. Verschiedene neuere Untersuchungen ergaben übereinstimmend, daß das Sonnensystem sich zur Zeit in unmittelbarer Nähe solcher Dunkelwolken befinden muß, die sich von dem Sternbild Taurus bis nach dem Ophiuchus hin erstrecken. Es ist ferner wahrscheinlich,

¹⁾ Am 29. Oktober 1937 wären „wir“ ums Haar mit einem solchen zusammengerannt, er war nur 100 000 km von der Erde entfernt und wurde durch Zufall von Reinmuth in Heidelberg entdeckt. Ähnliches erlebten wir im Jahre 1932.

²⁾ 1 parsec = $3\frac{1}{4}$ Lichtjahre, d. i. rund 30 Billionen km.

daß unsere Meteoritenwolke nur ein Teil dieser Dunkelwolken ist, denn aus dem Zustrom 10^9 g pro Jahr errechnet sich eine mittlere Dichte dieser Wolke von 10^{-24} g/cm³, also von gleicher Größenordnung wie bei den Dunkelwolken. Nölke hält es für möglich, daß durch den Durchgang des Sonnensystems durch eine solche Wolke infolge Schwächung der Sonnenstrahlung sowie direkter Einwirkung des Nebels auf die Erdatmosphäre eine irdische Eiszeit entstehen könnte [15]. Hier müßten aber, wie die Diskussion ergeben hat, Dichten von der Größenordnung 10^{-16} g/cm³ angenommen werden; vgl. [9] S. 19ff. Nun sind wir, wie obiger Dichtewert zeigt, möglicherweise auch gegenwärtig innerhalb einer derartigen Wolke, und von einer Abschwächung der Sonnenstrahlung durch sie kann keine Rede sein, ebensowenig wie von einer merklichen chemischen Beeinflussung der Erdatmosphäre. Aber selbst der Durchgang durch eine millionenfach dichtere kosmische Wolke könnte noch keine der diluvialen Eiszeit ähnlichen Konsequenzen gehabt haben, da während dieser Eiszeit das Klima wiederholt erheblich günstiger war als heute, und wir hier zu ganz anderen Erklärungsmöglichkeiten greifen müssen (S. 34f.). Damit soll aber keineswegs a priori jeglicher Einfluß der Meteoritenwolke auf das heutige Wetter abgestritten werden; es sei hier nur Hoffmeister zitiert, der [8] S. 127 an Zusammenhänge mit meteorologischen Störungen denkt.

Wir haben nun noch das Problem so anzugreifen, daß wir uns fragen, ob es geologische Phänomene gibt, die für einen irgendwie gearteten Massenzufluß sprechen.

Auf kontinentalem Gebiet haben wir, wie schon gesagt, wenig Gründe, kosmischen Zufluß zu fordern. Lediglich die vielleicht kosmische Herkunft des Löß wurde von Keilhack [16] zur Diskussion gestellt; doch läßt sich dessen Verbreitung auf der Erdoberfläche ungezwungener aus den meteorologischen Verhältnissen zur Eiszeit verstehen, während eine kosmische Wolke die ganze Erde ziemlich gleichmäßig bedeckt haben müßte.

Mehr Beachtung in dieser Hinsicht verdienen die rätselhaften Tektite (Beschreibung [9] S. 156ff., deren Entstehungsweise bis jetzt noch nicht einwandfrei geklärt ist. Die weltweite Verbreitung einerseits, das diskrete, vielleicht sogar einmalige Auftreten in der Erdgeschichte (Miozän-Frühquartär wird bei den verschiedenen Fundorten angegeben; die Moldawite scheinen die ältesten zu sein) andererseits spricht stark zugunsten kosmischer Herkunft; dagegen spricht jedoch der Chemismus, der von dem der gewöhnlichen Meteoriten völlig abweicht und mehr irdischen Sedimenten ähnelt. Die Möglichkeit, daß die Tektite mit dem die Eiszeit verursachenden solaren Phänomen im Zusammenhang stehen, habe ich kürzlich zur Diskussion gestellt [17]. Bei der vielbeachteten Hypothese von Spencer [18],

der die Tektite als beim Aufsturz großer Meteoriten geschmolzenen und umhergespritzten Sand ansieht, müßte ein solches plötzliches Meteoritenbombardement der Erde erst plausibel gemacht werden. Man könnte hier vielleicht an den Zusammenstoß mit einem Kometen oder Teilen eines solchen denken, was, wie schon auf S. 9 gesagt, nicht völlig ausgeschlossen ist.

Wesentlich anders sieht sich das Problem an, wenn wir uns dem irdischen Wasser zuwenden. Das Problem der Konstanz der Wassermenge in geologischer Zeit, das berühmte *Permanenzproblem* (vgl. [2] Kap. 6) ist in der Tat eines der wichtigsten Probleme geologischer Forschung. Fragen wir uns, wodurch es überhaupt aktuell wurde, so kann die Antwort kurz gegeben werden: aus paläogeographischen Rekonstruktionen glaubte man schließen zu müssen, daß ein wesentlicher Teil des nördlichen Atlantik ehemals den nordatlantischen Kontinent, ein solcher des südlichsten Atlantik und Indik hingegen den sog. Gondwanakontinent bildete (vgl. z. B. die Karte in [19] S. 113). Getrennt wurden sie durch das damals sehr ausgedehnte Mittelmeer, die Tethys, die jedoch, wie eingehende Untersuchungen zeigten, kaum je ein im heutigen Sinne tiefer Ozean gewesen sein kann, sondern fast durchwegs Flachseecharakter hatte ([19] S. 48). Wenn auch der Pazifik fast allgemein als seit ältesten Zeiten bestehendes Becken angesehen wird, so kommt man doch um die Frage, wo das die übrigen Ozeane füllende Wasser geblieben sein soll, nicht herum. In dieser scharfen Formulierung des Problems gab es nur zwei Auswege, nämlich, daß sich seit dem Paläozoikum 1. der Erdradius wesentlich verkürzt, 2. das irdische Wasser wesentlich vermehrt hätte. Die erste Möglichkeit lag, wenn allerdings auch nicht in solchem Ausmaße, im Sinne der sog. Kontraktionstheorie, die aber angesichts dauernd wachsender Schwierigkeiten von den meisten Geologen heute aufgegeben ist. Eine Vermehrung von Wasser könnte erfolgen durch Exhalation von Vulkanen; ob das aber quantitativ ausreicht, ist mehr als zweifelhaft, und dann wissen wir nicht sicher, ob es sich hierbei nicht nur um einen Kreislauf des Wassers handelt, indem versickertes Wasser als Dampf wieder ausgestoßen wird. Man wird hier von selbst zur Diskussion kosmischen Wasserzuflusses gedrängt. Die Heranziehung einer solchen Möglichkeit ist einer der Hauptpunkte der Hörbigerschen Glazialkosmogonie, die alle irdischen Niederschläge als durch kosmischen Eiszufluß erklären möchte. Da nun aber die Wassermenge der Erde ungefähr 10^{24} g beträgt, würde einer Vermehrung desselben um wenigstens 10% in 10^9 Jahren ein jährlicher Zustrom von der Größenordnung 10^{14} g entsprechen müssen, d. h. das 10⁵fache der Masse des jährlichen Meteorozustromes, was selbstverständlich ausgeschlossen ist. Wollte man also die Annahme der großen Kontinente beibehalten, so bliebe nur der Ausweg

übrig, daß der Pazifik früher tiefer als heute war, d. h. daß der heute schon sehr auffällige Gegensatz Pazifik zur übrigen Welt früher noch stärker hervortrat. Diese auf den ersten Blick wenig glaubwürdige Folgerung erscheint allerdings nicht ganz so abwegig, wenn man die mögliche Verbindung mit der Kosmogonie betrachtet (S. 122). Andererseits darf man nicht vergessen, daß die Schlüsse auf die Existenz jener großen Kontinente auf Feststellungen über Verwandtschaften von Floren und Faunen beruhen, und man zur Erklärung dieser auch mit schmäleren Landbrücken, vielleicht sogar Inselgruppen, auskommen kann. Als sicher können wir nur die Verbindung zwischen Nordamerika und Europa sowie zwischen Madagaskar und Vorderindien betrachten, was, wenn man einerseits an die nordatlantische Schwelle, andererseits an den durch die Auffaltung des Himalaja erfolgten Nordwärtsschub Vorderindiens denkt, auch mit der sog. Isostasie (S. 30) noch vereinbar sein dürfte. Jedenfalls treten uns die Schwierigkeiten des Permanenzproblems nicht mit solcher Schärfe entgegen, als daß wir nur die Wahl entweder zwischen erheblicher Wasservermehrung, oder aber zwischen bedingungsloser Annahme der auf S. 23f. besprochenen Verschiebungshypothese hätten. Zusammenfassend können wir also sagen: Kosmischer Wasserzufluß wäre mit den geologischen Tatsachen sehr gut vereinbar, zwingend bedürfen wir aber seiner nicht.

Somit bleibt nur noch die Erdatmosphäre zu prüfen. Über eine mögliche Änderung im Gehalt an Stickstoff und Edelgasen können wir unmittelbar nichts aussagen, desgleichen nichts über einen kosmischen Zustrom von Wasserdampf bzw. Kohlensäure, da diese Gase auch aus terrestrischen Ursachen mengenmäßig starke Änderungen erfahren können; wir müssen in anderem Zusammenhange in Abschnitt 3 darauf eingehen. Um so größere Schwierigkeiten begegnen uns aber bei dem lebenswichtigsten Element, dem *Sauerstoff*. Bei der Bildung der festen Erdkruste mußte nämlich dieses chemisch überaus aktive Element restlos gebunden sein; freier Sauerstoff kann in der ursprünglichen Atmosphäre nicht existiert haben (vgl. [9] S. 199ff.). Nun wissen wir zwar, daß die grünen Pflanzen mit Hilfe des Sonnenlichtes Kohlensäure zerlegen, wobei sie den Kohlenstoff zu ihrem Aufbau verwenden, den Sauerstoff aber an die Atmosphäre zurückgeben; aber bei noch so intensiver Produktion kommt man zu keinem *Anfang*, da die Existenz freien Sauerstoffs die unerläßliche Vorbedingung jeder Lebewelt ist. Da keiner der vorgebrachten Erklärungsversuche quantitativ ausreichend ist, hält Schwinner (S. 205) es für denkbar, daß bei dem Durchgang durch einen kosmischen Nebel die Erde freien Sauerstoff erhalten habe. Heute hat die Erde 10^{21} g freien Sauerstoff und mit wenigstens 1% „Anfangskapital“ müssen wir doch

wohl rechnen. Macht man weiter die der Hypothese sehr entgegenkommende Annahme, der Nebel habe völlig aus Sauerstoff bestanden und er sei so ungeheuer groß gewesen, daß die Erde 10^9 Jahre in ihm verweilte, so findet man bei den beobachteten Dichten 10^{-25} g/cm³ (S. 9) einen Gesamtgewinn von $5 \cdot 10^{16}$ g, also noch nicht 1 % dessen, was, dazu noch unter den entgegenkommendsten Annahmen, vorauszusetzen war. Hier begegnen wir einer der größten Schwierigkeiten: woher ist der Sauerstoff gekommen? Dies ist eine jener Fragen, die wahrscheinlich irgendwie im Zusammenhang stehen mit dem gewaltigen Problem der Entstehung des Lebens auf der Erde. Einen vielleicht gangbaren Ausweg werden wir auf S. 89 kennen lernen.

3. Paläoklimatologie.

Die Paläoklimatologie gibt uns die bei weitem reichhaltigsten Aufschlüsse über Wechselbeziehungen zwischen Erde und Kosmos in geologischer Zeit. Ganz besonders muß sich ein mehr oder weniger großes Stück des Lebensweges unserer Sonne in ihr aufgezeichnet haben, und es kann nur an der Unvollständigkeit oder an Mängeln des Beobachtungsmaterials liegen, ob wir es heute schon wagen können, dieses Stück Lebensweg unter Abzug aller übrigen Faktoren herauszuarbeiten. Daß ein in zeitlicher und räumlicher Hinsicht so weit wie möglich vollständiges, sorgfältig diskutiertes Beobachtungsmaterial unerläßliche Vorbedingung ist, ist wohl selbstverständlich; ihre Erfüllung erscheint zunächst nicht einmal übermäßig schwer, denn die Zahl der fossilen Klimazeugen ist Legion — trägt doch jeder fossile Boden, jedes fossile Lebewesen mehr oder weniger deutlich den Stempel seines Klimas. Da andererseits über Wert und Zuverlässigkeit einzelner Zeugen z. T. verschiedene Ansichten bestehen, müssen wir ihnen einige wenige Worte widmen; vgl. hierzu [2] S. 179 ff., [20], [21] S. 5 ff.

a) *Die fossilen Klimazeugen.* Ein Klimazeuge ist im allgemeinen um so wertvoller, von je weniger anderweitigen, mehr oder weniger schwer übersehbaren Faktoren er abhängt. Man kann die Klimazeugen einteilen in anorganische und organische; erstere haben den Vorteil, von einfacheren Gesetzmäßigkeiten beherrscht zu sein: daß Wasser ehemals nicht bei 0° zu Eis gefror, wird niemand behaupten wollen, daß aber eine fossile Pflanzenart ganz anderen klimatischen Bedingungen als ihre heute lebenden Verwandten angepaßt gewesen sein kann, ist durchaus vorstellbar. Dafür haben die organischen Zeugen meistens zahlenmäßige Überlegenheit.

Die bei weitem wichtigsten Klimazeugen sind fossile *Eisspuren*, die wir an verhärteten Blocklehmen, den sog. Tilliten, erkennen und die in älteren, speziell vorkambrischen, Zeiten die einzigen zuverlässigen Zeugen

überhaupt sind. Den Gegensatz hierzu bilden die Spuren von Wüstensandsteinen, Salzablagerungen, Gips usw., die für ein trockenes und warmes Klima sprechen. Bei diesen beiden Zeugengruppen haben wir eine Abhängigkeit von in der Hauptsache nur 2 Faktoren, nämlich im ersten Falle von Kälte und Niederschlag, im zweiten von Wärme und Trockenheit, die sich in ihrer Wirkung gegenseitig ergänzen können. Allerdings wird die Beweiskraft fossiler Wüstengebiete um so geringer, je weiter wir in der Erdgeschichte zurückgehen, da das damalige Fehlen einer Vegetation wüstenhafte Gebiete im heutigen Sinne vortäuschen kann, während in Wirklichkeit diese Gegend unter den gleichen klimatischen Bedingungen wie damals heute von üppiger Vegetation bewachsen wäre. Die ersten Landpflanzen treten im Ober-Silur auf, doch erst im Devon kann von einer üppigen Pflanzenwelt im heutigen Sinne gesprochen werden.

Die organischen Spuren lassen sich nicht so schematisch fassen; es gibt Pflanzen, die eine gewisse Sommerwärme verlangen; andere wieder sind empfindlich gegen Winterkälte; hochstämmige Bäume z. B. setzen heute eine Mindesttemperatur des wärmsten Monats von $+10^{\circ}\text{C}$ voraus. *Kohlenbildungen* sprechen im allgemeinen nur für humides, aber nicht unmittelbar für heißes Klima; außerdem sind sie stark vom Erdrelief, speziell von Gebirgen mit Süßwasserseen abhängig, so daß die Kohlenbildungen im Karbon und Tertiär noch kein unmittelbarer Beweis für besonderen Waldreichtum gerade dieser Formationen sind. Ähnliches wie bei der Pflanzenwelt gilt auch bei den Tieren, die allerdings insofern klimatischen Veränderungen gegenüber anpassungsfähiger sind, als sie sich leichter schützen können als die an ihren Standort gebundenen Pflanzen. Tiererzeugnisse sprechen deshalb zumeist weniger deutlich; einzelne Formen an Tieren jedoch, z. B. die Länge der Insektenflügel, liefern sehr gute Klimakriterien und passen sich den anderweitig gewonnenen Klimakurven bis ins einzelste an.

Ein in neuerer Zeit mehr und mehr an Bedeutung gewinnendes Phänomen ist die sog. *Jahresringbildung*, wie sie an fossilen Hölzern sowie an Sedimenten verschiedentlich beobachtet wurde. Jahresringe deuten auf Jahreszeitenwechsel hin, wobei dann noch im einzelnen festgestellt werden muß, ob es sich um warm-kalten bzw. trocken-feuchten Wechsel handelt. Findet man nun in einer Formation bei einer Gegend Jahresringe, anderswo keine, so darf man daraus schließen, daß im ersteren Falle schärfer ausgesprochene Jahreszeiten herrschten, was bei unseren heutigen Klimaverhältnissen auf höhere Breitenlage hinweisen würde.

Oft fand man, daß sich in ein und derselben Gegend die Klimazeugen für eine Formation scheinbar widersprachen. Vorausgesetzt, daß die

Altersbestimmung einwandfrei ist, kann dies nur daran liegen, daß die „Gleichzeitigkeit“, die wir festzustellen glauben, doch nicht genau genug ist, um die viel kürzeren Perioden damaliger Klimaschwankungen voneinander zu trennen. Findet man also in gewissen Formationen häufig sich widersprechende Zeugen, so hat man daraus zu schließen, daß das Klima raschen Wechseln unterworfen gewesen sein muß. Wenn so, um ein bekanntes Beispiel zu erwähnen, in unmittelbarer Nähe der amerikanischen Steinkohlenlager Eisspuren behauptet wurden, so kann dies bei korrekter Altersbestimmung nur als kräftige Klimaschwankung zur Karbonzeit gedeutet werden; methodisch unzulässig ist aber ein vielfach geübter Brauch, die Klimazeugen gegeneinander aufzubieten und die zahlenmäßig unterlegenen einfach zu ignorieren. Nach diesen kurzen Ausführungen wollen wir uns den Ergebnissen zuwenden.

b) *Der Verlauf der Vorweltklimata.* Um einen Anschluß der Paläoklimatologie an andere Gebiete zu finden, reicht es nicht aus, die klimatische Entwicklung nur eines Landes oder auch Erdteiles zu kennen; wir müssen ein Bild der ganzen Erde haben. Die Beantwortung der Frage, ob wir heute schon ein solches entwerfen können, erscheint wenig aussichtsreich; denn abgesehen davon, daß uns ja nur ein Drittel der Erdoberfläche zugänglich ist, und daß von diesem wiederum nur ein sehr kleiner Teil geologisch abgeschlossen ist, haben wir noch mit den Schwierigkeiten der zeitlichen Parallelisierung zu kämpfen, die nicht einmal für die so gut aufgehellte diluviale Eiszeit vollständig überwunden sind, geschweige denn für die früheren Perioden. Wenn ich es trotzdem wagen möchte, im folgenden ein Klimabild der Erde zu entwerfen, dann nur auf Grund folgender Überlegung: Den beiden hervorragenden Klimatologen Brooks und Kerner-Marilaun ist es gelungen, zu zeigen, daß auf der Erde offenbar zwei verschiedene Klimasysteme möglich sind, und zwar entweder das des *eisfreien*, oder das des *glazialen Polarklimas* [20], [22], [23]. In beiden Klimaten besteht eine sehr verschiedene Verteilung der atmosphärischen Aktionszentra; vor allem herrschen, insbesondere nach höheren Breiten zu, sehr verschiedene Temperaturen, wie folgende Fig. 1 nach Brooks zeigt. Man sieht, bis 55° Breite sind die Jahresmitteltemperaturen nur um knapp 2° C verschieden, aber dann wachsen die Unterschiede sehr schnell an;

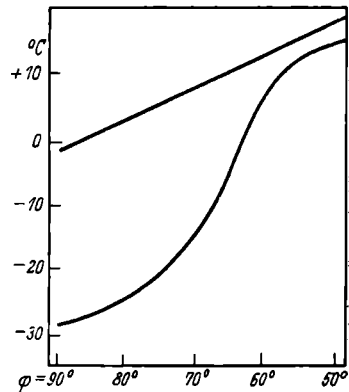


Fig. 1. Eisfreies und glaziales Polarklima.

besteht eine sehr verschiedene Verteilung der atmosphärischen Aktionszentra; vor allem herrschen, insbesondere nach höheren Breiten zu, sehr verschiedene Temperaturen, wie folgende Fig. 1 nach Brooks zeigt. Man sieht, bis 55° Breite sind die Jahresmitteltemperaturen nur um knapp 2° C verschieden, aber dann wachsen die Unterschiede sehr schnell an;

schon bei 60° sind es fast 5°C und in der Polarzone von $70\text{--}90^\circ$ über 25°C Jahresmitteldifferenzen. Nehmen wir, um ein sehr aktuelles Beispiel herauszugreifen, die am Rande der Antarktis in 65° Breite liegenden Seymour- und Snow Hill-Inseln, so finden wir heute Vergletscherung bei einem Jahresmittel von -4°C , was in das glaziale Polarklima hineinpaßt. Nun haben aber geologische Untersuchungen ergeben, daß zur mittleren Tertiärzeit auf diesen Inseln eine Lebewelt herrschte, die man als warmgemäßigt ansprechen muß, und die unter den heutigen Verhältnissen unmöglich dort existieren könnte. Im eisfreien Polarklima hingegen käme man zu $+9^\circ\text{C}$, was damit weit eher vereinbar ist. Was nun für uns das Wesentliche ist, wir können aus dieser Lebewelt den sicheren Schluß ziehen, daß *damals die ganze Antarktis eisfrei war*. Ähnlich ist es natürlich auch auf der Nordhalbkugel; wenn hier in Grönland und auf Spitzbergen aus der mittleren Tertiärzeit Floren gefunden wurden, die für ein mindestens 20°C höheres Jahresmittel als heute sprechen, so ist dies nicht nur durch eisfreies Polarklima erklärbar, sondern beweist die völlige Eisfreiheit des Nordpolargebietes zur damaligen Zeit. Aus diesem Grunde habe ich es für möglich gehalten, auf Grund der bis heute bekannten Klimazeugen ein ungefähres Gesamtbild des Erdklimas zu entwerfen; aus unten ersichtlichen Gründen habe ich die Klimakurven für Nord- und Südhalbkugel getrennt gezeichnet in der Tabelle 1. In dieser Tabelle gebe ich alle für den weiteren Zusammenhang benötigten Angaben, zunächst also die Formationsnamen, dann die Dauer, dann das Alter, schließlich Angaben über Gebirgsbildung, über Vulkanismus und zuletzt die Klimakurven. Bei der Auswahl der zur Ableitung solcher Kurven benötigten klimatischen Angaben für die einzelnen Formationen muß man vorsichtig sein, denn nur zu oft haben Autoren Hypothesen zuliebe einzelne Klimazeugen in ihrer Bedeutung stark übertrieben, andere hingegen unterdrückt oder umdatiert. Sehr vorsichtig geprüfte Angaben über die Klimazeugen der einzelnen Epochen findet man unter anderem bei Dacqué [2] S. 397 ff., der auch eine Gesamtklimakurve zeichnet, ferner bei Born [24] und Salomon-Calvi [25], [26].

Uns zu den Klimakurven selbst wendend, ist die Wahl unseres heutigen Klimas als Normallinie sicher wenig glücklich, aber mangels anderer Grundlage wenigstens zum Vergleich das Zweckmäßigste. Weicht die Kurve nach $+$ ab, ist der Gesamteindruck günstiger als heute, und umgekehrt bei $-$. Irgendeine Zahl oder gar Temperaturwerte für die Größe dieser Abweichungen zu setzen, halte ich heute noch nicht für möglich: schon hier möchte ich nämlich darauf hinweisen, daß Eisfreiheit einer Halbkugel nicht höhere *Gesamtwärme* zu bedeuten braucht (vgl. S. 42).

Tabelle 1. Erdgeschichte.

Erdzeitalter	Formation	Unter-Formation	Dauer (Jahrmillionen)	Alter (Jahrmillionen)	Gebirgsbildung	Vulkanismus	Nordhalbkugel		Südhalbkugel				
							+	-	+	-			
Känozoikum (Erdneuzeit)	Quartär	Jetztzeit	0,02	1 60	Nur noch geringe Tätigkeit	Schwach							
		Postglazial (Alluvium)	1										
	Tertiär	Jungtert.	Eiszeit		1	Abflauend					Schwach		
			Pliozän		25								
		Alttert.	Miozän		35							Tertiäre Hauptfaltungen	Stark z. T. sehr stark
			Oligozän										
Eozän	60	Z. T. sehr stark											
Paläozän													
Mesozoikum (Erdmittelalter)	Kreide		O.K. Senon	50	Verhältnismäßig ruhig, nur kleinere Faltungen (Sadonische Faltung)	Zunehmend							
			Turon										
	U.K. Gault	30	140	Schwach									
					Neokom								
	Jura	Weißer Jura (Malm)	30	Kimmerische Faltung,	Schwach								
		Brauner Jura (Dogger)											
Trias	Schwarzer Jura (Lias)	30	Ruhe	Mäßig bis schwach									
	Keuper												
Muschelkalk	170												
Buntsandstein		200											
Paläozoikum (Erdaltertum)	Perm	Zechstein	15	230	Abflauend								
		Rotliegendes											
	Karbon	Ober-K.	20	310	Variskische Hauptfaltungen					Sehr stark			
											Mittel-K.		
											Unter-K.		
	Devon	Ober-D.	20	350	Kaledonische Faltung					Teilweise sehr stark			
Unter-D.													
Silur	Ober-S. = Gotlandium	40	450	Ruhe	Schwach								
						Unter-S. = Ordovizium							
Kambrium	Ober-K.	50	550	Mäßig									
					Unter-K.								
Präkambrium	Algonkium	Ober-A.	~300	1150	Wiederholt heftige Gebirgsbildungstätigkeit	Zeitweise äußerst stark							
											Unter-A.	~300	>2000
Urzeit			~1000										

Gestrichelt gezeichnet bedeutet nur vermutungsweise Kenntnis des Verlaufes.

Auf der Nordhalbkugel, die wir natürlich am besten kennen, gehen unsere Zeugnisse zurück bis ins untere Algonkium, wo wir starke Vereisungen vor allem in Nordamerika, aber auch solche in Nordasien finden; weitere starke Eisspuren, wieder besonders deutlich in Nordamerika, begegnen uns im Spätalgonkium-Frühkambrium. Obwohl wir verschiedene Anzeichen dafür haben, daß auch im Algonkium zeitweise ausgeglichene Klimate herrschten, lassen diese doch noch keine genaueren Schlüsse zu. Erst vom Kambrium wissen wir sicher, daß sich vom Unter- zum Mittelkambrium das Klima besserte; Silur, Devon und Karbon machen auf der Nordhalbkugel allgemein den Eindruck eines sehr ausgeglichenen, dabei z. T. ausgesprochen warmen Klimas. Wenn nun andererseits gerade im Karbon und darauffolgend auch im Perm an verschiedenen Stellen, so vor allem in Nordamerika und Nordasien, vereinzelte Eisspuren behauptet wurden, so ist das eine deutliche Warnung, ein während der ganzen Karbonzeit gleichmäßiges Tropenklima anzunehmen; vielmehr müssen wir damit rechnen, daß auch hier gelegentlich, wenn auch vielleicht nur vorübergehend, stärkere klimatische Kontraste auftraten, weshalb ich die gestrichelte Einsenkung zeichnete. Von da bis zum Ende des Pliozän finden wir keine gesicherten Eisspuren oder doch wenigstens keine solchen, die zur Annahme von Inlandeis zwingen, wengleich auch das Klima keine völlige Konstanz zeigte und wir im Lias, besonders deutlich aber in der oberen Kreide (vielleicht auch Grenze Kreide-Tertiär), zeitweise schärferer klimatischer Differenzierung begegnen. Es folgte nach einem allgemein warmen Tertiär Ende Pliozän der diluviale Klimasturz; doch wissen wir heute mit Sicherheit, daß auch im Quartär, und zwar mindestens zweimal, ein etwas günstigeres Klima als heute herrschte.

Wenden wir unseren Blick der Südkurve zu, so erkennen wir auf den ersten Blick, daß deren Klimaverlauf in mancher Hinsicht Ähnlichkeit mit dem nördlichen hat. Während die frühalgonkischen Spuren mir zur Zeichnung einer Kurve zu unsicher erschienen, finden wir überall starke Eisspuren im Spätalgonkium-Frühkambrium, so daß diese Eiszeit im Süden noch schärfer ausgeprägt erscheint als im Norden. Ein stark abweichendes Verhalten treffen wir aber im Karbon und Perm an, wo wir bei einem im allgemeinen günstigen Klima der Nordhalbkugel auf der südlichen eine aus mindestens zwei Hauptvorstößen bestehende, jedenfalls große Eiszeit antreffen; dann aber folgt eine starke klimatische Besserung und ebenso wie im Norden folgt lange Zeit ein eisfreies Klima; die zeitweilige Klimaverschlechterung in der oberen Kreide finden wir vor allem

in Australien sehr deutlich ausgeprägt [25] S. 27, wengleich auch hier von einer „Eiszeit“ nicht die Rede sein kann. Ende Pliozän folgt dann, auch hier offenbar ziemlich rasch, der diluviale Klimasturz. Daß die Kurve im Süden im Quartär weniger unter die Normallinie geht, soll nicht heißen, daß hier die Eiszeit schwächer gewesen sei, sondern nur, daß heute die Südhalbkugel noch viel näher an der Eiszeit liegt als die Nordhalbkugel. Auch hier sind Interglazialzeiten angedeutet; ganz so deutlich wie im Norden erscheinen sie aber nicht.

Wir wollen nun versuchen, die wichtigsten paläoklimatischen Ergebnisse in einer zum Anschluß an andere Gebiete geeigneten Form zusammenzufassen:

1. Wenn auch die klimatischen Gegensätze auf der Erde starken Schwankungen unterworfen waren, so hat doch thermisch uniformes Klima zu keiner Zeit geherrscht. Die alte Auffassung eines früher „gleichmäßigen Tropenklimas auf der ganzen Erde“ kann selbst für die klimatisch günstigsten Erdepochen nicht mehr gehalten werden.

2. In Zeiträumen von einer größenordnungsmäßig gleichen Dauer von ungefähr 250 Millionen Jahren finden wir auf der Erde große Eiszeitperioden, in denen zeitweise eine die heutige übertreffende Vergletscherung stattfand.

3. Die Gesamtdauer der Eiszeiten können wir deshalb nicht sehr sicher abschätzen, weil wir keinerlei Gewißheit haben, daß die diluviale Eiszeit wirklich beendet ist; denn nach dem sicheren Nachweis des postglazialen Klimaoptimums muß der heutige Zustand eher als der eines neuen Gletschervorstoßes betrachtet werden. Die Frage, ob der heutige Zustand noch als Interglazialzeit, oder aber als bereits außerhalb der Eiszeit liegend betrachtet werden soll, ist müßig, solange wir keine scharfe Definition haben, was eigentlich als „Eiszeit“ zu gelten hat. Nachdem uns nun die Natur im eisfreien und glazialen Polarklima eine so geeignete Definition nahelegt, wäre es doch wohl am richtigsten, überhaupt glaziales Polarklima als Eiszeit zu betrachten. Zu einer Schätzung der Gesamtdauer bliebe somit nur die permokarbone Eiszeit übrig, deren wahrscheinlichste Dauer 30 Millionen Jahre betrug (ich setze mittleres Oberkarbon bis an die Grenze Rotliegendes-Zechstein). Setzen wir für die übrigen Eiszeiten eine der Größenordnung nach gleiche Dauer an, so folgt, daß in rund 10% der Erdgeschichte „Eiszeit“, d. h. glaziales Polarklima, herrschte. Da nun unser heutiges Gesamtklima einem mittleren Interglazial entspricht (im Süden näher an der Eiszeit, im Norden näher am eisfreien Zustand), können wir folgern, daß in rund 95% der Erdgeschichte das Klima gleich oder günstiger war als heute, und nur in 5% ungünstiger. Dieser Schluß ist

deshalb berechtigt, weil auch in den anderen großen Eiszeiten ausgedehnte Interglaziale nachgewiesen sind.

4. Die maximalen Ausmaße der diluvialen Eiszeit lassen sich abschätzen unter der allerdings unbewiesenen Annahme, daß zu jener Zeit das Eis gleichzeitig die Erdoberfläche bedeckt hat. Für die Zeit maximaler Vergletscherung gelangen wir so zu rund 50 Millionen qkm Eisbedeckung; das ist rund $\frac{1}{3}$ der Landoberfläche; heute sind es 16 Millionen qkm, also rund 10% (nach [25] S. 5). Bei den übrigen Eiszeiten wird die Ausdehnung zu mindestens der gleichen Größenordnung geschätzt, wobei allerdings nicht vergessen werden darf, daß im Permokarbon das heute stärkste Eisgebiet der Erde, die Antarktis, sehr wahrscheinlich eisfrei war, was besonders auffällig ist, wenn man bedenkt, daß das heute tropische Indien stark vergletschert war [26] S. 114f. Natürlich müßte bei einem quantitativen Vergleich nicht nur die Ausdehnung, sondern auch die durchschnittliche Mächtigkeit der Eisdecke berücksichtigt werden, wie z. B. heute die Eismasse auf dem antarktischen Kontinent mit nur 600 m durchschnittlicher Dicke in dieser Hinsicht hinter dem grönländischen Inlandeis zurückbleibt.

5. Eines der wichtigsten Probleme der Paläoklimatologie ist dieses: treten Eiszeiten mehr oder weniger plötzlich auf, oder führt sie eine ganz allmähliche Klimaverschlechterung langsam ein? Es ist klar, daß diese Frage nur bei der diluvialen Eiszeit Aussicht auf Beantwortung hat. Zunächst hatte man für die Nordhalbkugel vielfach angenommen, daß die Eiszeit schon im Miozän in Alaska begonnen habe, dann im Pliozän über Nordamerika hereingebrochen und Ende Pliozän nach Europa gekommen sei. Die Forschungen des amerikanischen Geologen Dall [27] sind aber, worauf auch Brooks [23] S. 277 hinweist, dieser Annahme wenig günstig. Zwar fand Dall eine deutliche Abkühlung vom Eozän zum Miozän, doch folgte hierauf wieder ein wärmeres Pliozän und erst am Ende desselben der glaziale Klimasturz. Auch auf der Südhalbkugel haben wir bei Antarktika keine sicheren Anzeichen dafür, daß sehr lange vor dem Diluvium eine der heutigen auch nur vergleichbare Eisbedeckung geherrscht habe. Nach unserem heutigen Kenntnisstand hat also die Annahme, daß die Eiszeit auf der ganzen Erde ungefähr gleichzeitig Ende Pliozän hereinbrach, größere Wahrscheinlichkeit als die einer ganz allmählichen Klimaverschlechterung durch das Jungtertiär hindurch.

6. Zwischen diesen Eiszeiten, also während des bedeutend längeren Teiles der Erdgeschichte, finden wir ausgeglichene Klimate mit erstaunlich weitem Vordringen der Lebewelt gegen die Pole zu. Noch zur mittleren Tertiärzeit finden wir im Süden und Norden in heute vergletscherten Ge-

bieten eine Lebewelt, wie sie heute in 40–50° Breite vorkommt, was mit Sicherheit auf einen damals viel geringeren Temperaturabfall nach höheren Breiten zu hinweist, wie er im eisfreien Polarklima auch tatsächlich möglich ist.

Mit diesem kurz skizzierten Beobachtungsmaterial — für alle Einzelheiten sei unbedingt auf die zitierte Literatur verwiesen — wollen wir an die Erklärungsversuche herantreten.

c) *Terrestrische Erklärungsmöglichkeiten.* Bevor wir einen Anschluß an die Entwicklungsgeschichte der Sonne versuchen können, müssen wir alle geologischen Phänomene auf mögliche Korrelation mit den Klimaschwankungen untersuchen. Zu diesem Zweck kehren wir zur Tabelle 1 zurück, in der die beiden nächstliegenden Phänomene, zwischen denen möglicherweise eine Korrelation besteht, Gebirgsbildung und Vulkanismus, angegeben sind. In der Tat scheint eine Beziehung angedeutet: zumindest sind die beiden gut bekannten Eiszeiten in der Nähe großer Gebirgsbildungsepochen. Eine genauere Nachprüfung zeigt jedoch auch hier Schwierigkeiten auf, zunächst die, daß die diluviale Eiszeit erst einige Millionen Jahre nach den stärksten Faltungen eingetreten ist, einen Widerspruch, der auch durch die von neueren Forschungen aufgezeigte z. T. stärkere Gebirgsbildungstätigkeit im Pliozän und Quartär nicht völlig beseitigt wird. Bedenklicher noch erscheint die Tatsache, daß in Nordamerika, dem Land der stärksten diluvialen Eisüberschwemmung, kein erkennbarer Gebirgskern, der, wie z. B. die Alpen, als Vereisungszentrum hätte dienen können, nachgewiesen ist. Nach den verdienstvollen Untersuchungen von Obrutscheff [28] wissen wir, daß auch Nordasien eine mit den übrigen großen Eisgebieten vergleichbare Eisdecke trug, und hier gilt Ähnliches wie in Nordamerika. Der dritte und vielleicht schwerwiegendste Einwand ist der, daß bei Richtigkeit der Reliefhypothesen nur *eine* große Eiszeit zu erwarten wäre, aber nicht jene kräftigen Schwankungen erwartet werden könnten mit Interglazialzeiten, die ein teilweise günstigeres Klima zeigen als heute. Während die einzelnen orogenetischen Hauptphasen einer großen Gebirgsbildungsära (die tertiäre Gebirgsbildung hatte 5 Hauptphasen) Zwischenzeiten von einigen Jahrmillionen haben, zählen die Klimaschwankungen der diluvialen Eiszeit nach 10–100 Tausenden von Jahren, können also kaum mit jenen irgendwie verglichen oder gar parallelisiert werden. Wir müssen also folgern, daß *Gebirgsbildungen allenfalls notwendige, aber keinesfalls ausreichende Bedingungen zum Auftreten von Eiszeiten sind.* Wir werden also von selbst zur Suche nach einer weiteren Ursache gedrängt, als die der Vulkanismus am nächstliegenden erscheint. Welche klimatologischen Konsequenzen eine starke vulkanische Tätigkeit mit sich bringt, läßt sich schwer theoretisch voraussagen, denn zu der Exhalation vulkanischer Asche, die in der

Erdatmosphäre Trübung und möglicherweise vermehrte Niederschläge¹⁾ verursachen könnte, kommt noch die Zufuhr anderer Gase, speziell eine Vermehrung der Kohlensäure, hinzu. Da Kohlensäure die Treibhauswirkung der Atmosphäre erhöht, glaubte man in der Tat anfänglich nach einer von Arrhenius und Frech [29] ausgearbeiteten Theorie an eine Verbesserung des Klimas durch Vulkanismus. Da aber physikalische Experimente die gezogenen Schlußfolgerungen nicht bestätigten, kehrte man zu der Annahme einer mäßigen Abkühlung durch Vulkanismus zurück [30]. Daß aber weder diese Erniedrigung noch die etwaige Erhöhung der Temperatur große Ausmaße gehabt haben konnte, beweist die empirische Korrelation: im Devon und Eozän, wo der Vulkanismus sehr stark war, finden wir auf der ganzen Erde ein warmes Klima, im Rotliegenden, wo er ebenso stark oder noch etwas stärker war, im Norden ein im allgemeinen warmes, im Süden ein kaltes Klima und schließlich im Diluvium, wo er ziemlich schwach war, ein auf der ganzen Erde vorherrschend kühles Klima. Das Ergebnis also: die beiden wichtigsten geologischen Faktoren, bei denen sich eine klimatologische Korrelation vermuten ließ, haben unsere Erwartungen nicht hinreichend befriedigt.

Aber auch hier ist der Zeitpunkt des Anschlusses an die Kosmogonie noch nicht gekommen; wir müssen uns vielmehr fragen, ob nicht irgendwie bei den geologischen Phänomenen zusammenhängende mehr oder weniger indirekte, vielleicht sogar im Erdinnern stattfindende Vorgänge Einfluß auf das Klima gewinnen konnten. Um zu sehen, in welcher Richtung Erfolg zu erwarten ist, kehren wir zu unseren Klimakurven zurück. Die schwierigste Stelle ist zweifellos das ausgeprägt konträre Verhalten beider Halbkugeln im Perm und Karbon, was wir uns an den in Fig. 2 für die großen Eiszeiten gezeichneten Eisspuren noch einmal deutlich vor Augen führen wollen. Bei der diluvialen Eiszeit erkennen wir auf den ersten Blick deutliche Symmetrie zu den Polen, im Permokarbon keine Spur einer solchen, denn wie hätte sonst Antarktika unvergletschert bleiben können? Die sich bei dieser Formulierung von selbst aufdrängende Lösung ist die, daß eben *die Pole damals anders gelegen haben*. In der Tat hatte es schon Kreichgauer [31] im Jahre 1902 in umfassender Weise unternommen, die Vorweltklimata durch große Polverschiebungen zu erklären. Aber welche Lage man dem Südpol auch geben will, die permokarbonischen Eisspuren sind so raffiniert verteilt, daß bei jedweder Pollage ein Teil derselben in tropische Gebiete fiel. Hier war es die glänzende Idee

¹⁾ Ob eine verstärkte Vulkantätigkeit notwendigerweise eine entsprechende Niederschlagsvermehrung nach sich ziehen muß, ist eine durchaus offene Frage; vgl. dazu z. B. Wigand [148], sowie auch Junge [149].

eners, daß die Kontinente ihre Lage zueinander geändert hätten, h durch die eigenartigen Umrisse vor allem der Südkontinente

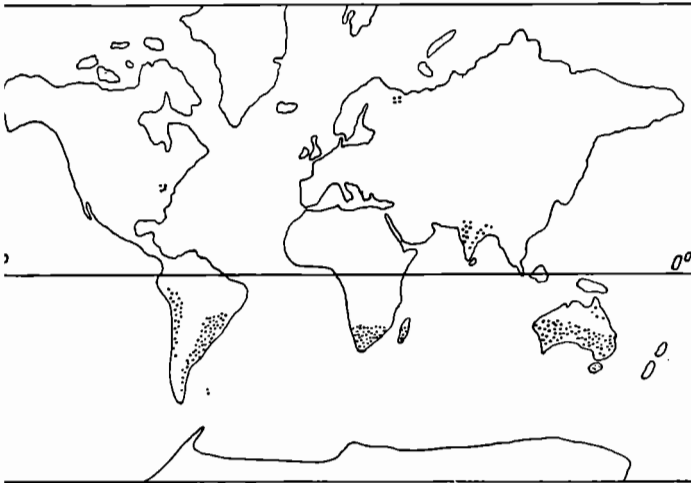


Fig. 2 a.

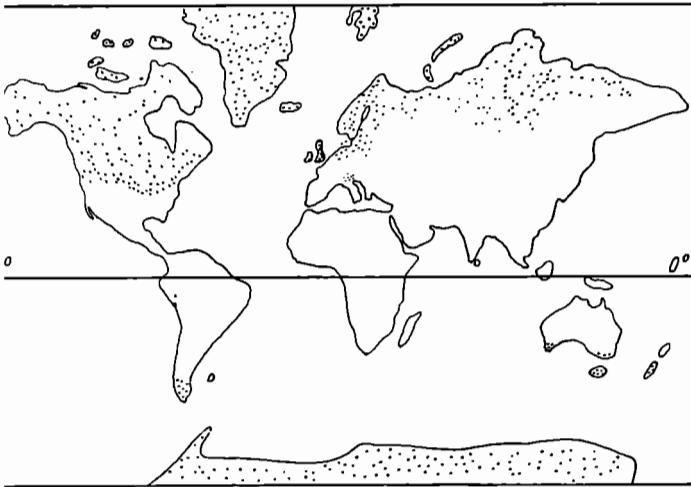


Fig. 2 b.

2 a u. b. Die permokarbonischen und die diluvialen Eisspuren.

gt schien [21], [32]. Ein Blick auf die Fig. 3 und 4 in [21] zeigt, permokarbone Eiszeit im Süden ebenso wie ihr Fehlen im Norden n früher engeres Zusammenliegen der Kontinente in Verbindung r Polverschiebung eine vielleicht brauchbare Erklärung finden Da es wohl keinem Zweifel unterliegt, daß eine solche Annahme

in wesentlichen Punkten eine völlige Umstellung im geologischen Denken erforderlich macht, ist die lebhafteste Diskussion seitens verschiedener Gebiete nur zu verständlich. Die wesentlichen Angriffe gegen die Theorie setzten von zwei verschiedenen Seiten ein: 1. der empirisch-paläoklimatologischen und 2. der dynamisch-theoretischen.

Was zunächst die erste Seite betrifft, so stellte man sich zwei Fragen: 1. kann die permokarbonische Eiszeit nicht auch anders erklärt werden, 2. wie verträgt sich die Hypothese mit den übrigen Erdzeitaltern? Was die erste Frage anbetrifft, so hat es gewiß nicht an Versuchen gefehlt, diese Eiszeit durch Veränderung von Meeresströmungen oder der atmosphärischen Aktionszentra zu erklären. Aber wie in [26] im einzelnen aufgeführt, kann es sich bei den meisten untersuchten Gebieten, auch in Indien, nur um *Inlandeis* handeln, womit die Reliefhypothesen ausscheiden. Dann wurde eingewandt, daß die auf S. 20 erwähnten nördlichen Eisspuren bei Wegeners Rekonstruktion in die Tropen fallen müßten. Eine strenge Prüfung ergab aber, daß in der Mehrzahl der untersuchten Fälle entweder die glaziale Natur oder die Altersbestimmung nicht völlig sicher ist. Die wenigen sicheren Spuren können an Ausmaß nicht mit den Eisfeldern im Süden verglichen werden und deuten eher auf episodische Ereignisse, vielleicht vorübergehende Kälteeinbrüche hin, wie ich das in der Kurve andeutete. Man wird also kaum ganz um eine Kontinentenverschiebung herumkommen, wenn auch Wegeners Annahme, die versteinerten Gebiete hätten in großer Nähe des Poles gelegen, nicht richtig sein kann; die überall nachgewiesenen Interglazialzeiten mit zweifellos mildem Klima beweisen vielmehr, daß wir uns in der kühl-gemäßigten Zone befinden, und eine Rekonstruktion, wie sie Salomon [26] S. 128 versucht, wird eher annehmbar sein. Nun heißt ein vergletschertes Indien und eine gleichzeitig eisfreie Antarktis nichts anderes, als daß am heutigen Äquator kaltes und am heutigen Pol warmes Klima geherrscht hat, womit vielfach die Widersinnigkeit einer Beibehaltung der jetzigen Lage von Polen und Kontinenten als erwiesen angesehen wird. Ist das aber wirklich so widersinnig? Daß der Äquator heute so viel wärmer als der Pol ist, liegt nämlich nur an der kleinen Schiefe der Ekliptik. Welche klimatologischen Konsequenzen hätte nun eine Zunahme der Schiefe? Schon A. Wegener hat sich diese Frage überlegt und, allerdings ohne eine Zahl zu nennen, die seiner Hypothese sehr ungünstigen mesozoischen Südpolarklimate damit zu erklären versucht [32] S. 170. Auch Gripenberg [33] hat dieses Problem näher durchgearbeitet. Schon bei einer Schiefe der Ekliptik von $\epsilon = 36^\circ$ erhalten alle Breiten die gleiche Strahlungsmenge wie heute der 35. Breitengrad. Gleichheit der Jahressumme an Strahlung bedeutet nun

freilich noch nicht gleiche Temperatur und erst recht nicht gleiche biologische Wirkung des Klimas; so viel ist aber sicher, daß die Pole ein eisfreies, sehr exzessives Klima hätten bei hoher Sommerwärme und im Winter strenge Kälte, aber nicht viel strengere als heute. Was aber, wenn $\varepsilon > 36^\circ$ würde? Dann erhielten die Pole mehr Strahlung als der Äquator; an diesem müßte daher die Schneegrenze immer tiefer rücken. In höheren Breiten würde eine intensive Durchwärmung der Meere erfolgen, die den Küstengebieten trotz Polarnacht milde Winter brächte. Vielleicht könnte, allenfalls noch unterstützt durch eine dafür geeignete Verteilung des Festen und Flüssigen, die permokarbone Eiszeit wenigstens z. T. in dieser Weise erklärt werden; denn, wie unsere Fig. 2 zeigt, schmiegen sich die Eis Spuren dem Äquator viel eher an als dem Südpol; ja, man könnte dazu noch anführen, daß in Indien das Eis von Süden, in Südafrika aber von Norden, d. h. in beiden Fällen vom Äquator her, vorgestoßen ist. Nehmen wir also z. B. an, ε sei im Karbon $\sim 60^\circ$ gewesen und habe seither aus einem näher anzugebenden Grunde abgenommen, sagen wir, der Einfachheit halber, gleichmäßig um 1° in 6 Millionen Jahren. Dann mußte sich das Klima am Äquator langsam bessern — wir finden in der obersten Trias am Tanganykasee in $3\text{--}5^\circ$ Südbreite einige Eisspuren bei gleichzeitig warm-gemäßigtem Klima in Spitzbergen — und es folgt dann eine lange Zeit völliger Eisfreiheit der Erde; in der Jurazeit hätten wir bei $\varepsilon \sim 40\text{--}45^\circ$ ein ziemlich gleichförmiges Klima auf der ganzen Erde. In der oberen Kreide bei $\varepsilon \sim 35^\circ$ gewinnt der Äquator thermisch die Oberhand; es treten nach höheren Breiten zu schärfere Kontraste auf, aber noch im Miozän bei $\varepsilon \sim 26\text{--}28^\circ$ haben wir Eisfreiheit der Pole, die erst bei einem Wert unter 24° Ende Pliozän zusammenbricht. Man sieht, hiermit ließe sich manches erklären. Größere biologische Schwierigkeiten brächte nun aber die lange Polarnacht mit sich, und über den Kontinenten müßten sich jedenfalls im Winter Hochdruckgebiete mit strengen Strahlungsfrösten ausdehnen; und schließlich ist eine Änderung der Schiefe der Ekliptik, vor allem aber eine derartige Verminderung, theoretisch noch viel schwerer vorstellbar als Kontinentenverschiebungen (vgl. S. 125).

Wenden wir uns nun den übrigen Zeitaltern zu, so kann die Verschiebungshypothese nur mäßige Beiträge liefern. Wie erwähnt, waren Wegener selber die Schwierigkeiten der Verschiebungshypothese hinsichtlich der milden Südklimate im Mesozoikum und Tertiär bekannt; denn es ist kein Zufall, sondern zwangsläufige Konsequenz, daß bei jedem Erklärungsversuch der warmen Klimate der Nordhalbkugel durch Polverschiebungen ein ebensolches Defizit am Südpol auftauchen muß. Was uns also im Permokarbon so nützlich war, schadet in anderen Zeitaltern;

im einzelnen ist dies in [34] und [35] ausgeführt. Eine besonders gute Prüfung der Verschiebungshypothese darf wohl bei der am besten bekannten diluvialen Eiszeit erwartet werden, und hier hat sie ebenfalls nicht befriedigt. Daß die Wanderung des Nordpales im Miozän-Pliozän durch Nordamerika schwer mit den Ergebnissen von Dall vereinbar ist, wurde bereits auf S. 20 gesagt. Die Wegener nicht mehr bekannt gewordene sibirische Vereisung spricht unwiderlegbar gegen eine um 20° südlichere Lage

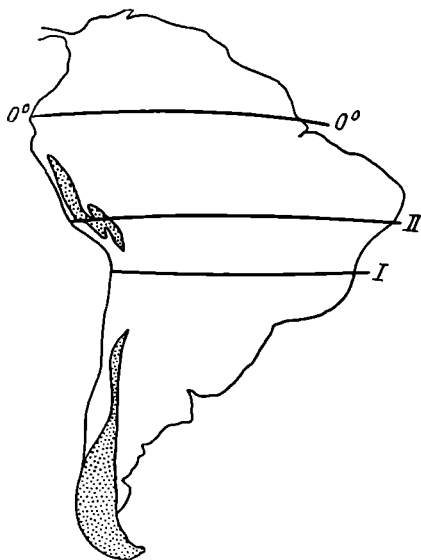


Fig. 3. Die diluviale Vergletscherung in Südamerika.

Sibiriens im Quartär. Die überzeugendste Prüfungsmöglichkeit liefert jedoch Südamerika, das im Quartär unbedingt ein besseres Klima als jetzt gehabt haben müßte — in Wirklichkeit war auch in ihm die Eiszeit sehr deutlich. Besonders überzeugend zeigt dies Fig. 3, in der die vereisten Flächen schraffiert gezeichnet sind. Die dick ausgezogene Linie I ist die von Wegener angenommene Äquatorlage zu Beginn des Quartär, II diejenige für Würm; Köppen-Wegener hatten nämlich die Schwierigkeiten bezüglich der Eisspuren in Südamerika damit zu beheben versucht, daß diese Eiszeit relativ rezent, also etwa entsprechend Würm, wäre und

somit bei einer der heutigen nahezu gleichen Pollage entstanden sein könnte. Das ist, wie die Lage von II zeigt, kein ausreichender Gewinn, ganz abgesehen davon, daß auch bei den patagonischen Eisspuren mindestens eine längere Interglazialzeit angedeutet erscheint, möglicherweise entsprechend dem großen Interglazial im Norden. Auch bei den vor-kambrischen Epochen bestehen z. T. Schwierigkeiten. Betrachten wir z. B. eine Karte der kambrischen Eisspuren, wie sie Range [36] gibt, so ist die Bevorzugung der nördlichen Halbkugel völlig verschwunden; im Süden allerdings finden wir die gleichen Gebiete vereist wie auch im Permokarbon, also auch Südafrika und Indien, während diese im Quartär bekanntlich eisfrei blieben. Damit gewänne zum mindesten für die Nordhalbkugel, die permokarbene Eiszeit einen mehr episodischen Charakter; auf jeden Fall käme im Oberkarbon in die Erdgeschichte ein Umkehrpunkt.

Das Besprochene trifft im wesentlichen jede Hypothese, die alle Änderungen des Vorweltklimas allein durch Pol- oder Kontinentverschiebungen erklären will, so auch einen den modernen Anschauungen besser angepaßten Abänderungsversuch der Verschiebungshypothese durch Gutenberg [37], die sog. Fließhypothese. Der Hauptunterschied gegen Wegener ist der, daß bei diesem der Gegensatz Kontinente zu Ozeane, bei Gutenberg aber Pazifik zu übriger Welt, der springende Punkt ist.

Ebenso wie diese werden sämtliche möglichen Verschiebungshypothesen auch von der zweiten, der dynamischen Seite angegriffen. Was zunächst das statische Bild betrifft, so kann die Vorstellung des Gegensatzes von Kontinent zu Ozean bzw. des Schwimmens der ersteren als der leichteren Sialschollen auf dem schwereren Sima, ähnlich wie des Eises in offenem Wasser, wohl als Arbeitshypothese gelten (vgl. [9] S. 277ff.). Welche Kräfte nun aber diese großen Kontinentverschiebungen bewirken sollten, war nicht ersichtlich, denn eine strenge Durchrechnung (ich zitiere hier nur Prey [38], [39]) ergab, daß weder die Gezeitenreibung noch die sog. Polfluchtkraft merkliche Verschiebungen hervorrufen kann. Milankovitch [40] dagegen machte den Versuch, einfach aus einer anfänglich gegebenen Lage der Kontinente deren Bewegung in erdgeschichtlichen Zeiten zu errechnen; doch könnte nur bei praktisch widerstandsloser Bewegung an etwas Derartiges gedacht werden; in der Natur ist dies bestimmt nicht verwirklicht [41]. Nun bestand noch eine ganz andere Schwierigkeit. Für den Gebirgsbildungsprozess in seinem episodischen, erdumspannenden Auftreten haben wir bis jetzt keine wirkliche Erklärung gefunden, nur mehr oder weniger gekünstelte Darstellungsversuche. Nun wies schon Wegener in dem Kapitel „Die verschiebenden Kräfte“ in [32] darauf hin, daß sehr wahrscheinlich zwischen Kontinentenverschiebung und Gebirgsbildungsprozeß irgendein Zusammenhang besteht, mußte es doch auffallen, daß gerade zu den orogonischen Zeiten besonders starke Verschiebungen stattgefunden hätten. Nun unterliegt es keinem Zweifel, daß zur Aufrichtung von Gebirgen ganz unverhältnismäßig größere Kräfte erforderlich sind als nur zur Kontinentenverschiebung, und das Kraftproblem würde nur noch hoffnungsloser. Man mußte sich also nach anderen Kräften umsehen, wollte man an den vermuteten Beziehungen festhalten; vielleicht, so sagte man sich, waren die Mißerfolge unter anderem darin begründet, daß man bei den untersuchten Kräften den *Impuls in die Kontinente selbst* verlegte, d. h. entweder ließ man äußere Kräfte an ihnen angreifen, wie bei der Gezeitenreibung, oder es sollte ihnen ihre Lage selbst den Impuls verleihen. Einen Ausweg konnte nur die Annahme bieten, daß die Kräfte *nicht* in den Kontinenten selbst, sondern in dem

säkularflüssigen *Untergrund* zu suchen seien. Diesen Gedankengang hat zum ersten Male O. Ampferer [42] zu einer Hypothese der Unterströmungen ausgearbeitet, der sich u. a. auch Salomon anschließt; jedoch erst eine auch physikalisch faßbare Begründung dieser Unterströmungen und ihres zyklischen Auftretens könnte als wirkliche Erklärung gelten. Auch hier sind aussichtsreiche Ansätze zu verzeichnen, so vor allem die Radioaktivitätshypothese von Joly [43], die Kirsch auch in quantitativer Hinsicht zu einer in vieler Hinsicht bemerkenswerten Theorie ausgearbeitet hat [44], [45]. Der Grundgedanke ist kurz folgender: während man früher allgemein mit fortschreitender Abkühlung der Erde als etwas Selbstverständlichem rechnen zu müssen glaubte, gebot die Entdeckung der Radioaktivität hierin ein Halt, denn eine durch das ganze Erdinnere in gleicher Menge wie an der Oberfläche verteilte Beimischung radioaktiver Stoffe würde den durch Ausstrahlung erfolgten Wärmeverlust nicht nur kompensieren, sondern umgekehrt zu einer fortschreitenden Temperaturerhöhung der Erde Anlaß geben. Man mußte hier die Hypothese machen, daß praktisch alle radioaktiven Substanzen in den äußersten Schichten angesammelt seien, und daß sie im Erdinnern so gut wie völlig fehlen. Daß Meteoriten nur sehr wenig solcher Substanzen enthalten, kann jedoch als überzeugender Vergleich schwerlich dienen, nachdem wir heute in den Meteoriten kaum mehr Trümmer eines „Schwesterplaneten“ sehen, sondern in ihnen wahrscheinlich von Anfang an selbständig entstandene interstellare Körper vor uns haben, vgl. [46]. Denn die Altersbestimmungen S. 8 einerseits, die überwiegend interstellare Herkunft andererseits, sprechen entschieden gegen die Trümmerhypothese; auch die von Schwinner [10] vorgeschlagene Hypothese der Kollision zweier Fixsterne schneidet nicht besser ab, ganz abgesehen davon, daß von der Wahrscheinlichkeitsrechnung in den 10^{10} Jahren seit der Entstehung des Milchstraßensystems kaum mehr als ein einziger derartig nahezu zentraler Zusammenstoß plausibel gemacht werden könnte. Wir müssen also mit der Tatsache, daß im Erdinnern doch mehr Wärme produziert wird, als ausgestrahlt werden kann, ernstlich rechnen. Wie aber sollte die Erde, falls sie nicht einer neuerlichen Aufschmelzung zustrebt, dieses Mehr an Wärme wieder los werden? Ein naheliegender, von Lotze [47] erwogener Gedanke war der, daß durch starken Vulkanismus eine genügende Wärmemenge abgeführt würde; doch ist es fraglich, ob der dadurch verursachte Wärmeverlust als repräsentativ für die ganze Fläche unter den Kontinenten gelten kann. Machen wir daher die Annahme, die produzierte Wärme stau sich unter den Kontinenten mehr und mehr an, so folgt weiter, daß die unteren Teile der Kontinente anfangen, zu schmelzen; diese sinken also etwas ein,

was sich geologisch durch umfassende Transgressionen bemerkbar machen müßte. Es entsteht schließlich durch einsetzende thermische Strömungen im Untergrund eine Wanderung der Kontinente; die stark erwärmten Stellen werden vom Ozean überflutet, und nach einiger Zeit kann das Spiel von neuem beginnen. So viel steht jedenfalls fest, diese Kräfte können Verschiebungen von Kontinenten und vielleicht auch Auffaltungen von Gebirgen weit eher bewerkstelligen als die oben betrachteten minimalen Kräfte der Polflucht und Westdrift. Was nun gerade für unsere Probleme von besonderer Wichtigkeit ist, ist die nicht abweisbare Schlußfolgerung, daß das *Weltmeer eine starke Erwärmung erfahren müßte*. Kirsch hat dies näher durchgerechnet. Da er im Sinne von Köppen-Wegener mit starker Verschiebungstätigkeit während des 1–2 Millionen Jahre langen Quartär rechnet, kommt er [45] S. 102 zu einer Erwärmung des Meeresbodens von 20° C, was in den äußeren Schichten 14° C ausmacht; daraus findet er eine Vermehrung der Niederschläge um ungefähr 20% und er hält es daher für möglich, daß hier der vielfach vermutete Zusammenhang zwischen Gebirgsbildung und Eiszeit gefunden sei. Da nun aber an den Polen die Wassertemperatur dauernd merklich über 0° C läge, kann an Vereisung kaum gedacht werden; eher noch vermöchte man damit das Gegenteil einer Eiszeit, nämlich Verhältnisse, wie sie in den klimatisch ausgeglichenen Perioden der Erdgeschichte herrschten, zu erklären. Andererseits sahen wir aber auf S. 26, daß wir für das Quartär der Annahme großer Verschiebungen entbehren können, und so sehen wir, daß sich die freiwerdende Wärme auf viel längere Zeiträume, etwa auf das ganze Miozän verteilen könnte. Man könnte so mit einer Erwärmung des Meeres von 2–3° C möglicherweise im Sinne der Reliefhypothesen verständlich machen, warum die Eiszeit nicht schon im Miozän hereinbrechen konnte, sondern erst dann, als alles zur Ruhe gekommen war.

Wir haben also die Kontinentalverschiebungen, ebenso wie die mit ihnen möglicherweise verknüpften Vorgänge der Gebirgsbildung, sehr wahrscheinlich als *diskontinuierliche Vorgänge in der Erdgeschichte* anzusehen, und daher können wir auch nicht mit Bestimmtheit erwarten, daß die astronomisch-geodätischen Nachprüfungen heute noch stärkere Verschiebungen ergeben, was ja bekanntlich bisher auch nicht der Fall war, und vielfach, vielleicht etwas zu voreilig, als Gegenargument gegen Kontinentenverschiebungen überhaupt aufgefaßt wurde. Denn Vorbedingung hierzu wäre ein gleichmäßiges Fortdauern des Verschiebungsprozesses.

Aber auch tier- und pflanzengeographische sowie paläoklimatologische Feststellungen werden allein kaum in der Lage sein, die letzte empirische Entscheidung über die Verschiebungshypothese zu fällen; denn erstere

können auch ohne Verletzung des Permanenzproblems oder der sog. Isostasie (vgl. zu diesem Problem [48]) durch Inselbrücken erklärt werden. Paläoklimatische Aussagen wiederum können sich nur auf Breiten-, nicht aber Längenänderungen beziehen, und auch dann nur, wenn die Breite um mehr als $15\text{--}20^\circ$ variierte. Hingegen sind geologische Untersuchungen über Form und Struktur von Festländern und Gebirgen eher zu einer Entscheidung berufen. Von neueren Arbeiten hierüber sei u. a. die vorläufige Mitteilung von Salomon-Calvi [49] zitiert, der die Linie, längs der die ursprünglich durch die große Tethys voneinander getrennten Nord- und Südkontinente aufeinander trafen, auf weite Strecken von Europa bis Indien verfolgen konnte, die „damit die gewaltigste geologische Linie der Erde sein dürfte, der sich höchstens die Westfront der amerikanischen Kontinente zur Seite stellen kann“. Bemerkenswert ist ferner eine Arbeit von F. E. Sueß [50] über den Bau der Kaledoniden, in der die Wegenersche Vorstellung eines ursprünglich engen Zusammenliegens von Grönland, Spitzbergen und Skandinavien durch geologische Untersuchungen eine Stütze erfährt. Besonders hervorzuheben ist die Feststellung einer *Umkehr der verschiedenen Kräfte*, S. 335 — gerade das, woran man, solange keine empirische Bestätigung vorliegt, stets Anstoß nehmen wird. —

Gerade bei der Weitverzweigung der Fragen, die sich an ein so umfassendes Problem wie das der Kontinentenverschiebungen anschließen, und die dem einzelnen Forscher ein Gesamturteil sehr erschweren, ist eine zusammenfassende Stellungnahme und Diskussion einer ganzen Reihe von Autoren zweifellos sehr vorteilhaft. So erschien im Jahre 1928 von amerikanischer Seite ein Symposium [51], dem dann 10 Jahre später, gerade bei Abschluß des vorliegenden Buches, seitens der deutschen Geologen ein ähnliches Unternehmen gefolgt ist [52]. Man wird sich bei beiden Darstellungen nicht verhehlen können, daß ein definitives Urteil heute noch verfrüht wäre, daß im Gegenteil die Diskussion noch keineswegs als abgeschlossen zu betrachten ist.

Zu einer Stellungnahme, soweit sie für unsere Probleme erforderlich erscheint, gelangen wir, wenn wir aus dem Gesagten einen Gesamtüberblick über die Möglichkeiten terrestrischer Beeinflussung des Klimas zu gewinnen versuchen. Die am nächsten liegenden Faktoren Gebirgsbildung und Vulkanismus können das Klima insofern beeinflusst haben, als sie die näher anzugebende Hauptursache der Eiszeit mehr oder weniger unterstützen würden; für sich allein können sie aber keine Eiszeit auf der Erde hervorrufen. In verschiedenen Zeiten der Erdgeschichte, speziell vom älteren Mesozoikum rückwärts, finden wir vor allem auf der Südhalbkugel eine von der heutigen so stark abweichende Anordnung der Klimazonen, daß

wir ohne die Hinzunahme von Kontinentenverschiebungen von wenigstens $20-25^\circ$ in Breite nicht auskommen; wir müssen also, ohne uns auf ein spezielles Verschiebungsbild festzulegen, die Kontinentalverschiebung zumindest als Arbeitshypothese annehmen. Da solche Verschiebungen kaum anders als durch Unterströmungen im Sima verursacht werden können, besteht die Möglichkeit, auch die Entstehung der Gebirge auf diese zurückzuführen, was an Wahrscheinlichkeit gewinnt, wenn wir bedenken, daß in orogenetisch ruhigen Zeiten auch keine größeren Verschiebungen vorkamen. Bei unserem heutigen Kenntnisstand darf man die Radioaktivitätshypothese als aussichtsreiche Diskussionsbasis betrachten, und hier ergeben sich auch indirekte klimatologische Folgen, indem der Kontinentalverschiebungsprozeß eine Erwärmung der Ozeane zur Folge hat.

Aber selbst unwahrscheinlich günstige Kombinationen terrestrischer Faktoren könnten dem komplizierten Charakter der Klimaschwankungen noch nicht gerecht werden. In der Tat darf man sagen, daß die Mehrzahl der Forscher der Auffassung, daß die großen Klimaschwankungen letzten Endes kosmisch bedingt seien, positiv gegenüber stehen; nur über die Natur dieser Zusammenhänge herrschen noch sehr geteilte Meinungen. Während ein Teil der Forscher bereits hier einen Anschluß an die Kosmogonie für gegeben hält, möchten andere unter Verzicht auf spezielle Theorien lieber, von heute an der Sonne festgestellten Phänomenen ausgehend, einen Übergang zu größeren Schwankungen versuchen. Da dieser Weg bei nötiger Vorsicht immer der leichter gangbare sein wird, wollen wir ihn kurz beschreiten. Wir nehmen also einmal an, außer der Sonne sei uns kein Fixstern bekannt, und wir wollten, lediglich von dem aus, was wir über die Sonne wissen, einen Anschluß an die Klimaschwankungen der Vorzeit versuchen.

d) *Veränderlichkeit der Sonnenstrahlung.* Für unsere Zwecke brauchbare Beobachtungen der Sonne sind begreiflicherweise nicht älter als das Fernrohr, mit dessen Hilfe Galilei sogleich die Sonnenflecken entdeckte (1610); die Entdeckung der bekannten elfjährigen Periode liegt gerade ein Jahrhundert zurück (Schwabe 1843); die Feststellung der Zusammenhänge der Flecken mit anderen solaren Erscheinungen und erst recht ihre klimatologischen und gar biologischen Einflüsse sind erst jüngsten Datums, letztere z. T. auch noch sehr umstritten. Unsere nächstliegende Aufgabe ist die Prüfung empirischer Zusammenhänge mit klimatischen Faktoren; hierzu sei auf [53], S. 396ff. sowie [54] verwiesen. Für uns am wichtigsten ist die Kenntnis des Einflusses der Sonnenflecken auf Temperatur und Niederschlag. Schon Köppen fand 1873, daß in den Tropen dem Sonnenfleckenmaximum eine mäßige Temperaturdepression von etwa 0.5°C

und eine leichte Vermehrung der Niederschläge entsprechen. In den höheren Breiten sind entsprechend dem allgemein etwas unregelmäßigeren Verlauf des Klimas auch diese Beziehungen nicht so regelmäßig; im großen und ganzen liegen auch hier die Temperaturen beim Fleckenmaximum etwas niedriger; über die ganze Erde gemittelt findet man im Maximum eine um 0.3°C niedrigere Temperatur. Die Niederschläge zeigen in kontinentalen bzw. ozeanischen Gebieten entgegengesetzte Abhängigkeit vom Fleckenzyklus; in ersteren nehmen sie ab, in letzteren nehmen sie zu mit steigender Fleckenzahl. Als Beispiel der Temperaturbeeinflussung sei die in 50° Nordbreite liegende kanadische Stadt Winnipeg nach [54] angeführt. Ich wählte einen Ort gerade dieses Landes als Beispiel, da wir hier den meisten und stärksten Eiszeiten der Erdgeschichte begegnen, und gerade in einer solchen Gegend die Frage der Auswirkung der solaren Phänomene besonderes Interesse hat.

Die Jahresamplitude nimmt also zu, was in Verbindung mit einer sinkenden Jahrestemperatur wie auch einer Abnahme der Niederschläge als ein Kontinentalerwerden des Klimas nach dem Maximum hin bezeichnet werden kann. Um nun zu untersuchen, ob vom Fleckenphänomen aus irgendein Anschluß an geologische Klimaschwankungen möglich ist, müßten wir für folgende zwei Fragen eine Beantwortung suchen: 1. ist das Sonnenfleckephänomen selbst größeren Schwankungen unterworfen? und 2. ist es in geologischer Zeit stets vorhanden gewesen? Was zunächst die erste Frage betrifft, so sind in der Tat neben der elfjährigen verschiedene andere, teils längere, teils kürzere, Perioden behauptet worden, deren Realität allerdings zum Teil dahingestellt bleiben muß. Von besonderer Bedeutung ist die 34jährige sog. Brückner-Periode, die neben der elfjährigen eine wichtige Rolle in klimatologischer Hinsicht spielt; aber auch noch höhere, bis zu mehrhundertjährige Perioden erschienen in manchem, so z. B. in den Jahresringen sehr dicker Bäume oder in der geschichtlichen Überlieferung sehr strenger Winter usw. angedeutet. Mit Sicherheit kann man aber sagen, daß, je länger die behauptete Periode ist, desto kleiner und vor allem desto unregelmäßiger ihre klimatologischen Einwirkungen sind,

Tabelle 2. Monatstemperaturen und Jahresmittel in

Flecken	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
Maximum . . .	-20.4°C	-17.9	-8.9	+2.6	10.1	16.2
Minimum . . .	-18.7	-16.7	-8.6	+4.2	11.2	16.9
Differenz . . .	-1.7	-1.2	-0.3	-1.6	-1.1	-0.7

wie auch bereits die Brücknerperiode, verglichen mit der elfjährigen Hauptperiode, erheblich stärkeren Schwankungen unterworfen ist. Um auf die Feinstruktur der Eiszeit überzugehen, müßten Perioden nicht nur von Jahrhunderten, sondern Jahrzehntausenden Dauer plausibel gemacht werden, was nicht bewiesen werden kann, für deren Existenz wir auch bis heute keinerlei theoretische oder empirische Gründe anführen können. Nun könnte man im Anschluß an unsere zweite Frage so argumentieren: es kann gut sein, daß das Fleckenphänomen *allein* nichts ausrichten kann, in Verbindung mit anderen, z. B. geographischen Effekten könnte es aber doch zum Zustandekommen einer Eiszeit ausreichen. Das wäre denkbar, wenn das Fleckenphänomen nur während der Eiszeiten aufgetreten wäre. Nun besitzen wir heute noch keine derart befriedigende Theorie des Fleckenphänomens, daß wir die wichtige Frage, ob es temporären oder dauerhaften Charakter trägt, theoretisch beantworten könnten (vgl. S. 64). Um so wichtiger ist es daher, daß das Phänomen von den Geologen verschiedentlich bis in ältere Formationen zurück nachgewiesen wurde; David fand einen elfjährigen Rhythmus in den Bändertonen der permischen Eiszeit in Australien (nach [23] S. 102) und Korn [55] gibt eine ganze Reihe eigener und fremder Bestimmungen bis zurück ins Devon. Eine noch weiter ausgedehnte und lückenlose Zeitfolge solcher Bestimmungen wäre eines der schönsten Geschenke, das die Geologie der Astronomie machen könnte! Wir können daher das Fleckenphänomen als etwas Vorgegebenes betrachten, welches das Klima zu allen Zeiten beeinflußt hat; eine Brücke von ihm zu den großen Klimaschwankungen wäre ein unbewiesenes Postulat.

In noch unglücklicherer Situation befinden wir uns hinsichtlich der sehr wichtigen Frage, in welcher Beziehung das Fleckenphänomen mit der Gesamtstrahlung steht und welchen Verlauf diese überhaupt nimmt, denn den diesbezüglichen hohen Anforderungen genügende Beobachtungen liegen erst seit kaum zwei Jahrzehnten vor; vgl. die ausführliche Darstellung bei Bernheimer [56]. Jedenfalls ist bisher noch keine genügend strenge Koinzidenz festgestellt worden, weder zwischen Fleckenzahlen und Gesamtstrahlung, noch zwischen diesen beiden und der Ultraviolett-

Winnipeg bei Fleckenmaxima und Minima.

Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	Jahresmittel
19'0	17'8	12'3	+ 4'9	-5'1	-16'0	+ 1'2
19'8	17'7	12'2	+ 5'9	-2'3	-13'2	+ 2'4
-0'8	+ 0'1	+ 1'0	-1'0	-2'8	-2'8	-1'2

strahlung. Auf der einen Seite haben die direkten Messungen der Amerikaner Schwankungen bis zu einigen Prozent ergeben, auf der anderen Seite haben an verschiedenen Sternwarten durchgeführte lichtelektrische Helligkeitsmessungen an Planeten und Jupitermonden ein klar negatives Resultat gezeitigt; denn Schwankungen von der Größenordnung 1% liegen merklich oberhalb des mittleren Fehlers dieser Beobachtungen. Dieser scheinbare Widerspruch kann am einfachsten dadurch geklärt werden, daß die beobachteten Schwankungen im Trübungsfaktor der Erdatmosphäre zu suchen sind, die bei den astronomischen Beobachtungen herausfallen, da sie den Vergleichssterne ebenso betreffen. Jedenfalls können nur weitere sorgfältige Beobachtungen eine definitive Entscheidung hierüber bringen. Sind so diese unregelmäßigen Schwankungen selbst unsicher, so muß die Frage nach etwaiger systematischer Helligkeitsänderung der Sonne ganz offen bleiben; von hier aus eine Brücke zu den großen Schwankungen des Klimas der Vorzeit schlagen zu wollen, wäre noch gewagter als vom Fleckenphänomen aus.

Den uns von hier aus schwer zugänglichen Übergang zu größeren Zeiträumen ermöglicht uns vielleicht der vor 100 Jahren erstmalig vorgetragene Versuch¹⁾, die Veränderung der Erdbahnelemente sowie der Ekliptikschiefe mit den geologisch aufgezeigten Klimaschwankungen zu parallelisieren (vgl. dazu [57], [35], [21] S. 159ff.). Dabei geht es nicht darum, wie Außenstehende manchmal meinen, mit der berühmten astronomischen Genauigkeit das Klima auszurechnen; die dazu erforderlichen Rechnungen liefern nur den Rahmen: der eigentliche Kernpunkt dieser Hypothese ist das *rein meteorologische Problem*, ob eine Veränderung dieser Elemente sich wirklich in einer solchen Weise dem Kreislauf von Wasser und Luft aufzwingt, daß daraus große Klimaschwankungen resultieren können. Die wesentlichen Grundgedanken dabei sind folgende: wir wissen heute von der empirischen Klimatologie, daß die Ausbildung von Gletschern besonders stark durch *fehlende Sommerwärme* begünstigt wird; erst in zweiter Linie kommt die Temperatur des Winters oder auch die Jahresmitteltemperatur in Betracht. Als eindruckliches Beispiel hierfür seien zwei Orte in 65° Breite genannt: Godthaab (Westgrönland) mit Juli + 6° C, Januar - 10°, Jahr - 2°, ist vergletschert, der sibirische Kältepol mit Juli + 17, Januar - 50°, Jahr - 15°, ist unvergletschert. Nimmt also die Sommertemperatur ab, so würde, unbeachtet einer entsprechenden oder sogar stärkeren Zunahme der Wintertemperatur, zu-

¹⁾ Adhémar, Les révolutions de la mer, déluges périodiques. Paris 1842; eine kurze historische Übersicht von Adhémar und Croll bis Milankovitch findet man in [53] S. 420ff.

mindest in höheren Breiten Gletscherbildung begünstigt. Nun ist klar: wenn das Perihel in den Sommer fällt, und sich allenfalls dazu noch ein Maximum der Schiefe der Ekliptik gesellt, wird die Strahlungsdifferenz zwischen Sommer und Winter wesentlich vergrößert; würde sich nun diese Strahlungsdifferenz in einer Erhöhung der Temperaturdifferenz auswirken, d. h. würden nicht etwa Effekte existieren, die dies verhindern, so wäre das Gewünschte bereits erreicht: den Zeiten höherer Sommerbestrahlung entsprächen Interglazialzeiten, jenen niedrigerer Bestrahlung Eisvorstöße. Aber, ob diese Bedingung des Fehlens ausgleichender Effekte wirklich erfüllt ist, können wir nicht ohne weiteres sagen. Zwar ist die ältere Vorstellung, daß in dem langen sonnenfernen Aphelwinter die Schneemassen so stark angehäuft würden, daß in dem kurzen Perihelsommer nicht alles weggeschmolzen würde, nicht mehr beweiskräftig. Die heutigen Einwände berufen sich mehr auf geometeorologisches Geschehen, auf den planetarischen Kreislauf der Erde. Nehmen wir also einmal an, es sei Winterperihel bei geringer Schiefe, was nach heute zumeist vertretener Auffassung zur Eiszeit führen würde. Hier wird infolge vergrößerter Temperaturdifferenzen die atmosphärische Zirkulation zwischen Pol und Äquator zunehmen, was die Verfrachtung subtropischer Luftmassen in höhere Breiten unterstützt, so daß hier also öfters winterliche Tauwettereinbrüche erfolgen werden als z. B. jetzt. Andererseits unterstützt die stärkere Auflockerung und Erwärmung der Luftmassen in den mittleren Breiten der entgegengesetzten Halbkugel, die ja Perihelsommer hat, die Bildung ausgedehnter Hochdruckgebiete über den Kontinenten der Winterhalbkugel; hier würde also das Klima kontinentaler, entgegen einer verstärkten Ozeanität über den Meeren. Ob solche Verhältnisse notwendig zu Gletschervorstößen führen müssen, ist eine durchaus offene Frage. Anders liegen die Verhältnisse im Sommer, speziell im Frühsommer. Hier wissen wir, daß durch verstärkte Insolation über dem Lande hervorgerufene Erwärmung regelmäßig den Einbruch kühler Luft nach sich zieht; es entstehen die bekannten Kälterückfälle. Man erinnere sich nur an den einzigartigen März 1938, den wärmsten März seit mehr als 100 Jahren, auf den im April strenge Kälte mit schwersten wirtschaftlichen Schäden folgte; erfolgt nun der Anstieg der Bestrahlung zum Sommer hin steiler als jetzt, wie es bei Perihelsommern der Fall ist, da hier Sonnenhöhe und Sonnennähe dauernd zunehmen, so wären auch heftigere Kälterückfälle im Frühjahr die wahrscheinliche Folge, was besonders im Gebirge zu nachhaltiger Verspätung der Schneeschmelze führen dürfte. In der Tat wird diese Schwierigkeit vielfach so ernst genommen, daß man heute nicht mehr einem Perihel in der Sommersonnenwende, sondern einem solchen etwa Anfang

August optimale Wirkung zuschreibt. Im Aphelsommer erfolgt umgekehrt der Strahlungsanstieg langsamer; hier würde, auch im Hinblick auf die verminderte Zirkulation Pol-Äquator, der Sommer vermutlich trockener, wenn auch etwas kühler. Kehren wir wieder zum Winter zurück, so ist es bekannt, daß nicht starker Druckgegensatz Kontinent zu Ozean, sondern gerade eine flache Druckverteilung einer starken Schneeanhäufung auf den Kontinenten günstig ist; erstere ist aber gerade im Perihelwinter, letztere im Aphelwinter wahrscheinlich. Der Perihelwinter würde eher eine Austrocknung als eine Vereisung der Kontinente nach sich ziehen und das Umgekehrte könnte beim Aphelwinter eintreten. Zu all diesen Schwierigkeiten kommen noch spezielle geometeorologische Probleme hinzu; vor allem entsteht die Frage, wie sich klimatische Anomalien eines Kontinentes auf die übrige Erde auswirken würden. Würde, um nur eines von zahllos zu vermehrenden Beispielen anzuführen, heute die Antarktis eisfrei, so würde dieser Kontinent einer starken sommerlichen Erwärmung zugänglich, zudem das Meer und damit die ganze Südhalbkugel infolge Fehlens der Eisdriften wärmer. Diese stärkere Erwärmung der Luft würde die Hochdruckgebiete über den Nordkontinenten im Nordwinter verstärken, das Klima würde hier also wahrscheinlich kontinentaler. In analoger Weise müßte man die Beziehungen aller Kontinente zueinander kennen; meistens ist es keine einfache Parallelität, ja ist konträres Verhalten geradezu vorherrschend. Ob Eiszeiten von einem Kontinent auf andere, oder gar über den Äquator weg von einer Halbkugel auf die andere, übergreifen können, ist heute noch eine ganz offene Frage. Daß, obwohl gleichsinniges Verhalten beider Halbkugeln in der Erdgeschichte vorherrscht, doch auch starke thermische Anomalien beider Halbkugeln jedenfalls längere Zeit existenzfähig sind, beweisen die Verhältnisse im Permokarbon, denn eine solche Anomalie bleibt, wenn auch mehr oder weniger abgeschwächt, bei jeder Kontinentenverschiebung bestehen.

Führt also eine theoretische Diskussion zu keinem zwingendem Ergebnis, so bleibt doch der Weg einer empirischen Prüfung offen. Unter den verschiedentlich vorgelegten Berechnungen des Bestrahlungsganges wird zu einem solchen Vergleich derjenigen von Milankovitch [57] gewöhnlich der Vorzug gegeben, da er alle drei Elemente, also Perihellage, Exzentrizität und Schiefe der Ekliptik, gleichmäßig brücksichtigt, während in der Mehrzahl der übrigen, vor allem der älteren Versuche, die Schiefe mehr oder weniger unberücksichtigt blieb. Die erste Antwort erheischt die Frage, warum sich nur im Quartär, d. h. in 1-2⁰/₁₀₀ der ganzen Erdgeschichte, diese doch immer vorhanden gewesenen Schwankungen der astronomischen Elemente klimatologisch auswirken konnten, denn vorher bemerken

wir nichts davon, ja nicht einmal bei der permokarbonen Eiszeit, deren Schwankungen mindestens die 10fache Dauer der quartären haben. Wirft man ferner einen Blick auf die Strahlungskurve (z. B. die Tafel am Schluß von [21] oder [57] S. 150), so erkennt man, daß die schraffiert gezeichneten, d. h. die eigentlichen eiszeiterzeugenden Zeiten, nur knapp 10% der ganzen Zeit ausmachen. Die geologischen Untersuchungen machen hingegen durchaus nicht den Eindruck einer derartigen zeitlichen Überlegenheit der Interglaziale. Dieser Widerspruch wurde geklärt durch Untersuchungen von Wundt [58] und Sörgel [59], von denen der erstere vor allem die eiszeitverstärkende Wirkung der erhöhten Reflexion untersuchte, während Sörgel durch Untersuchung der verzögernden Wirkung der Gletscherphänomene zu einer besseren Übereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtung gelangte. Will man ein Urteil über die Übereinstimmung des astronomischen Bestrahlungsganges mit der geologischen Eiszeitfolge gewinnen, so wird man natürlich ein einzelnes solches Schema, wie z. B. das vielbenutzte Eberl-Schema, für das nördliche Alpenvorland [60], kaum als repräsentativ für die ganze Nordhalbkugel ansehen dürfen. Dagegen muß hier ganz besonders hervorgehoben werden, daß das überall deutlich nachgewiesene lange Mindel-Riß-Interglazial ebenso wie das überall nachgewiesene postglaziale Klimaoptimum im Bestrahlungsgang gut zum Ausdruck kommt. Allerdings erfolgte im Klimaoptimum der Eisrückzug kräftiger und schneller, als man nach der Strahlungskurve erwarten sollte; ja, es war hier die Vergletscherung noch erheblich geringer als heute, während eine Eisfreiheit Skandinaviens sonst im Quartär höchstens für das große Mindel-Riß-Interglazial in Frage kommt, obwohl doch z. B. noch in der Riß-Würm-Interglazialzeit stärker bestrahlte Sommer als im Klimaoptimum vorkamen. Dies ließe sich am einfachsten so erklären, daß die für das Auftreten der Eiszeit verantwortliche primäre Ursache etwas an Stärke nachgelassen hätte. Anfang und Ende einer Eiszeit, darüber müssen wir uns im klaren sein, werden eben nicht durch die astronomischen Elemente selbst bestimmt.

Ein weiterer Einwand gegen die astronomische Theorie wird häufig in der behaupteten Gleichzeitigkeit der Vereisungen auf der Nord- und Südhalbkugel gesehen. Hierzu muß aber gesagt werden, daß die aus der Theorie sich ergebenden Differenzen nur die Größenordnung 10000 Jahre oder noch weniger aufweisen, was zur Zeit noch weit unterhalb der besten zeitlichen Parallelisierungen, selbst für Würm, zwischen Patagonien und dem Norden liegt. Man wird erst dann urteilen können, wenn nach einer absoluten Methode, z. B. der von de Geer, S. 3, die Zeit der letzten Vereisung in Patagonien exakt, d. h. also auf wenigstens 2–3000 Jahre sicher,

ermittelt sein wird, was bis heute noch lange nicht erreicht ist. Ein mehr gefühlsmäßig vorgebrachter Einwand war der, daß die Schwankungen der astronomischen Elemente in tropischen Gegenden keine Schneegrenzdepression hervorrufen könnten. Die neuesten Berechnungen von Milankovitch [61] ergaben aber, daß auch in den Tropen Schneegrenzverschiebungen, die über den Betrag 1000 m hinausgehen, durch die Schwankungen der astronomischen Elemente erklärt werden können. Eine weitere, wenigstens teilweise Prüfung der astronomischen Theorie ermöglicht der Anschluß an das Klima der historischen Vergangenheit. Die aus der Strahlungskurve zu erwartende zunehmende Vergletscherung nach dem vor 8–10000 Jahren stattgefundenen Klimaoptimum kann als bestätigt gelten; sowohl in verschiedenen Hochgebirgen als auch in Grönland ist, wie wir aus zahlreichen Sagen wissen, das Eis früher, ja noch im frühen Mittelalter, weniger mächtig gewesen. Geht man zu den relativ gut überlieferten letzten 2000 Jahren über, so ist die größte Vorsicht deshalb am Platze, weil wir hier infolge Interferenz mit den bis zu Jahrhunderten gehenden Perioden klimatischer Schwankungen zu falschen Schlüssen kommen könnten (vgl. dazu [53] S. 384ff.). Eine sorgfältige Diskussion führte jedenfalls zu dem Schlusse, daß systematische Änderungen des Klimas in diesen Zeiträumen nicht zu erkennen sind; der gelegentlich ins Feld geführte Einwand, noch im Mittelalter seien abnorm strenge Winter häufig vorgekommen, kann ernstlich nicht gewertet werden, da andererseits auch außergewöhnlich milde Winter vorkamen, z. B. in den Jahren 1186 und 1289. Bedenkt man jedoch, daß in den letzten 2000 Jahren die Schiefe der Ekliptik nur von $23^{\circ}44'$ auf jetzt $23^{\circ}27'$ abnahm, und das Perihel vom 30. November zum 3. Januar wanderte, so kann angesichts dieser relativ kleinen Änderung das Fehlen nachweisbarer systematischer Klimaänderungen kaum als Gegenargument gegen die astronomische Hypothese gewertet werden¹⁾.

Nicht unwichtig ist in diesem Zusammenhange die Frage nach *klimatischen Änderungen in der Gegenwart*, also etwa seit der Jahrhundertwende, da wir hierzu nicht nur ein ausgedehntes Beobachtungsmaterial haben, sondern auch anderweitige Vergleiche, z. B. mit solaren Beobachtungen, durchführen können. Tatsächlich findet man, daß wir uns gegenwärtig in der Periode einer außergewöhnlich starken Erwärmung des Polargebiets befinden, jedenfalls der stärksten seit Bestehen meteorologischer Messungen, deren Maximum noch nicht erreicht ist [62]. Damit stimmt auch überein,

¹⁾ Das Ergebnis von A. Wagner, [Gerland **20** (1928) 134ff.], daß in einem großen Teile Europas seit dem Ende des 18. Jahrhunderts die Jahresschwankung der Temperatur abgenommen hat, kann vielleicht als Bestätigung dieser Gedankengänge angesehen werden.

daß gegenwärtig die meisten Gletscher im Rückzug begriffen sind. Man wird auch hier, obwohl diese Entwicklung nicht in der Richtung der nach der astronomischen Theorie zu erwartenden verläuft, kein ernstliches Gegenargument herauslesen können, da eben die Zeit unserer Beobachtungen noch zu kurz ist.

Noch ein ganz anderer Punkt, über den ich in der Literatur bisher keine Äußerung gefunden habe, scheint mir in diesem Zusammenhange einer Prüfung wert: ob sich nicht ein Unterschied in der Auswirkung astronomischer Schwankungen, je nachdem diese im eisfreien oder im glazialen Polarklima stattfanden, ergibt. Denn in beiden Klimasystemen herrschen, vor allem in höheren Breiten, derart verschiedene Druck- und Temperaturverhältnisse, daß es zum mindesten voreilig wäre, anzunehmen, daß sich die Änderungen der Bestrahlung in beiden Systemen genau in der gleichen Weise auswirken müssen. Nun beziehen sich die Untersuchungen über das Quartär selbstverständlich auf glaziales Polarklima, das ja seit Beginn der Eiszeit bis heute herrscht. Wenn andererseits verschiedene Forscher die Möglichkeit erwogen haben, daß bestimmte, auf ein sehr mildes Klima hinweisende Klimazeugen in unseren Breiten im eisfreien Polarklima bei kleiner Schiefe der Ekliptik und Winterperihel mit großer Exzentrizität gedeihen konnten, so liegt darin scheinbar ein Widerspruch mit den üblichen Auffassungen vor, denen zufolge gerade diese Elementenkombination zu großen Eiszeiten führen müsse. Voraussetzung zu dieser Schlußfolgerung wäre jedoch, daß der Übergang vom eisfreien zum glazialen Polarklima durch die astronomischen Elemente allein erfolgen könnte. Nun können wir über eine solche Möglichkeit theoretisch nichts aussagen; vom rein empirischen Standpunkt aus erscheint sie aber nicht sehr naheliegend, da in der Erdgeschichte, in der doch das eisfreie Klima vorherrschte, auf jeden Fall des öfteren noch erheblich geringere Sommerbestrahlungen, als je im Quartär, vorkamen und das eisfreie Polarklima sich trotzdem erhielt. Ebenso wohl auch nicht durch Veränderungen der geographischen Verhältnisse; denn diese waren mindestens zeitweise einer Klimaverschlechterung günstiger, als gerade Ende Pliozän. Nach allem erscheint es wahrscheinlich, daß *der eisfreie Zustand ein sehr stabiles Klimasystem* darstellt, dem die normalen astronomischen und geographischen Verhältnisse nichts anhaben können. Wenn nun im eisfreien Klima im Winter nicht die meteorologischen Verhältnisse der Jetztzeit herrschten, sondern solche, wie sie ähnlich heute im Sommer im Nordpazifik sind, so müßte sich ein erhebliches Mehr an winterlicher Bestrahlung auch in einer wirksamen Erhöhung der Temperatur bemerkbar machen. Es wäre weiterhin denkbar, daß für ein trockenes und warmes Klima sprechende paläoklimatische Befunde den Perihelsommern entsprechen, wogegen gerade jenen

Klimaten, die in der paläoklimatischen Überlieferung den Charakter sehr ausgeglichenen Klimas zur Schau tragen, die Perihelwinter entsprochen hätten. Wenn so Brooks [23] S. 271 es für möglich hält, daß die nördlichen Steinkohlenlager bei Winterperihel und großer Exzentrizität entstehen konnten, so wird man dem insofern zustimmen dürfen, als es im eisfreien Klima schon in Breiten von etwa 30° bei geringer Schiefe und Winterperihel bei $e = 0.05-0.06$ ein weitgehender Ausgleich der Jahreszeiten erfolgen kann; auf jeden Fall brauchte man auch hier die Steinkohlengebiete nur um $20-25^\circ$ zu verschieben, und nicht unter den Äquator, ebensowenig, wie wir die Eisgebiete im Süden unmittelbar beim Südpol anzunehmen haben. Solche Abschätzungen können einen Mindestwert für die im Permokarbon erforderliche Verschiebung liefern: viel mehr als $20-25^\circ$ werden nicht unbedingt erforderlich sein. So viel dürfte sicher sein: eine genaue Kenntnis der hier nur vermutungsweise angedeuteten Auswirkungen der astronomischen Elemente im eisfreien Polarklima würde einen sehr bedeutenden Erfolg mit sich bringen können, denn das paläoklimatische Problem würde sich dann auf die relativ einfache Frage reduzieren: eine Ursache dafür anzugeben, warum das eisfreie Klima Ende Pliozän eine Zeitlang dem glazialen Platz machte.

Wenn wir uns ein Gesamturteil über die astronomische Klimalehre bilden wollen, so dürfen wir nicht den Wald vor Bäumen übersehen: denn den gewiß nicht geringen Schwierigkeiten steht ein auf exakter Grundlage durchgearbeitetes Schema gegenüber, das in vieler Hinsicht gute Übereinstimmung mit der geologischen Überlieferung zeigt und das man nicht leichtfertig verwerfen sollte. Vielmehr dürfte es sich lohnen, nach einer Überwindung dieser Schwierigkeiten zu suchen, die sich im wesentlichen in dem einen Satze zusammen fassen lassen: man kommt mit der astronomischen Theorie allein zu keinem Anfang und keinem Ende.

Um einen klaren Überblick zu behalten, wollen wir den Stand des Problems nochmals scharf präzisieren: daß die astronomische Theorie die Feinstruktur ausreichend erklären kann, daß hier also etwas Besseres gar nicht erforderlich ist, ist unbestreitbar; woran sie möglicherweise scheitert, ist das Fehlen der Kenntnis einer geeigneten Hauptursache, die aber mit den astronomischen Schwankungen nichts zu tun hat. Will man also die astronomische Theorie durch eine bessere ersetzen, so bleibt nur noch die Möglichkeit übrig, daß die gleiche Ursache, die die Eiszeit selbst hervorrief, auch für deren Schwankungen verantwortlich ist. Alle terrestrischen Versuche, das Zustandekommen der Eiszeit zu erklären, sind hierzu ungeeignet, denn geographische Faktoren, Pol- oder Kontinentenverschiebungen sowie auch atmosphärische Zustandsänderungen, sie alle verlaufen nicht so schnell,

daß die relativ sehr kurzen Schwankungen der Eiszeit damit irgendwie parallelisiert werden könnten. Nur kosmische Ursachen wären hierzu in der Lage; ja man kann geradezu sagen, daß es ein Hauptunterschied kosmischer und terrestrischer Hypothesen ist, daß erstere die Eiszeit und deren Gliederung im allgemeinen durch ein und dasselbe Phänomen erklären wollen, während letztere zumeist eine Kombination verschiedener Ursachen annehmen. Die einfachste denkbare Ursache wäre die spontan einsetzender, direkter solarer Schwankungen, eine Möglichkeit, auf die wir schon auf S. 34 hinwiesen, und zu deren Beantwortung sich unsere heutigen Beobachtungen als unzulänglich erwiesen. Der Anschluß an die Kosmogonie erscheint nach der somit abgeschlossenen Diskussion aller übrigen Möglichkeiten in der Tat nicht mehr umgehbar. Und er wird uns sehr erleichtert dank der Forschungen von C. G. Simpson, die uns den Übergang fast selbstverständlich erscheinen lassen und die sich für die von uns betrachteten Probleme als sehr fruchtbar erweisen werden.

Man kann den Simpsonschen Grundgedanken in einem Satze zusammenfassen: *das Gesamtklima der Erde wird wesentlich bestimmt durch die Intensität der Sonnenstrahlung.* Viele Klimatologen werden hieran begrifflichen Anstoß nehmen: unabhängig von jeder Theorie beweise doch insbesondere der Golfstrom, welch dominierende Rolle die geographischen Verhältnisse zu spielen imstande seien. Dem kann aber entgegengehalten werden, daß auf der gegenüberliegenden Seite des Atlantik ein ebenso großes klimatologisches Defizit zu verzeichnen ist. Gäbe es keinen Golfstrom, so wäre, das ist ziemlich sicher, in Skandinavien heute noch mindestens eine zusammenhängende Gebirgsvergletscherung; aber dafür wäre sehr wahrscheinlich Grönland im Klimaoptimum ganz oder fast völlig eisfrei geworden und trüge heute höchstens im Landinnern eine Eiskappe. Das Ausmaß der gesamten Eisbedeckung auf der Nordhalbkugel wäre aber kaum geändert, nur ausgeglichener. Daß ganz allgemein meteorologisch-geographische Faktoren nicht in der Lage sind, die von der Paläoklimatologie vorgelegten Hauptprobleme „1. subtropisches Klima in polaren Gebieten, 2. die Vereisung von Europa und Nordamerika, 3. Inlandeis in den Tropen“ zu erklären, hat Simpson schon früher auseinandergesetzt [63]. Pol- und Kontinentenverschiebungen können auch nur die Verteilung der Klimate, aber nicht deren Gesamtcharakter ändern; und schließlich ändern die astronomischen Schwankungen ebenfalls praktisch nichts an der Gesamtstrahlung, nur an deren jahreszeitlicher Verteilung. Nun bestimmt die Gesamtstrahlung wesentlich die Temperaturdifferenz und damit die Stärke der atmosphärischen Zirkulation Pol-Äquator, die bekanntlich im Winter stärker ist als im Sommer. Nimmt die Gesamt-

strahlung zu, wird auch die atmosphärische Zirkulation energischer, was eine Zunahme der Niederschläge zur Folge hat; da in vielen Gegenden

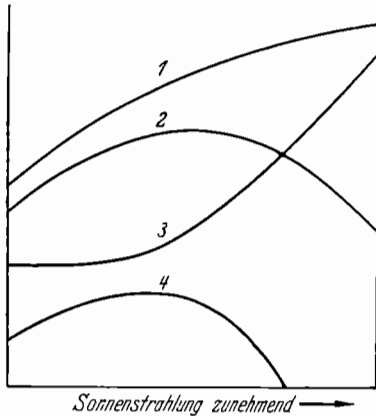


Fig. 4a u. b. Zur Simpson'schen Eiszeittheorie.

a) Allgemeine Zusammenhänge.

Es bedeuten: 1 Gesamtniederschlagsmenge, 2 Schneefall, 3 Verdunstung und Abschmelzung, 4 Jährliche Schneeanhäufung

gibt; die zweite gibt die Anwendung auf die quartäre Eiszeit. Die Sonne hätte demnach zwei Maxima durchlaufen, deren Höhe Simpson zu 40 % Strahlungssteigerung gegenüber heute abschätzt, doch kommt es auf diese Zahl nicht so genau an; weiter dürfen wir nicht vergessen, daß diese Strahlungskurve im Gegensatz zu der astronomischen keine exakte Berechnung darstellt, sondern nur ein den geologischen Ergebnissen angepaßter Darstellungsversuch. ist Die Jahreszahlen darunter sind ebenfalls nicht ausschlaggebend; sie beinhalten nur, daß das für das Quartär anzunehmende Mindestalter $\frac{1}{2}$ Million Jahre ist. Eine der Hauptschlußfolge-

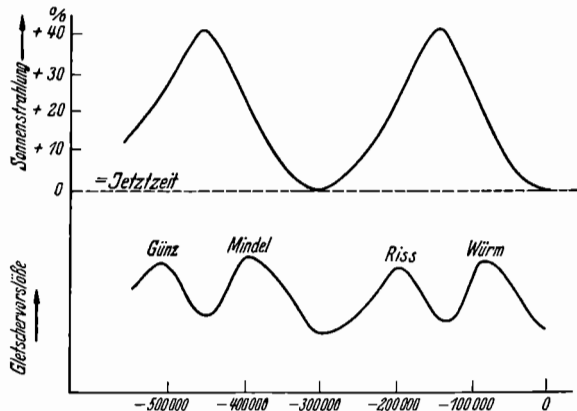


Fig. 4b. Simpson's Eiszeitschema.

nur deshalb kein Eis ist, weil die heutigen Niederschläge zu gering sind, könnte dann also Vergletscherung folgen. Das Neue an Simpsons Idee ist also gerade die Möglichkeit wachsender Vergletscherung auch bei Zunahme der Sonnenstrahlung, ein Gedanke, der bis dahin nicht weiter verfolgt worden war, und Simpson hat dies zu einer Erklärung der diluvialen Eiszeit ausgearbeitet [64]. Ich will nun versuchen, die Simpsonsche Hypothese an Hand zweier Figuren zu veranschaulichen, von denen die erste den Zusammenhang von Gesamtniederschlag, Verdunstung und Abschmelzung, Gesamtschneefall und schließlich, was für uns das Wichtigste ist, jährlicher Schneeanhäufung, mit der Sonnenstrahlung

rungen wäre eine Wesensverschiedenheit der beiden kurzen Interglaziale, die feuchtwarm wären, von der großen Interglazialzeit, die trockenkalt und dem gegenwärtigen Zustand sehr ähnlich gewesen wäre. Das postglaziale Optimum ließe sich ebenfalls befriedigend verstehen. Ein gegen die Hypothese erhobener Einwand, die Feinstruktur der Eiszeit sei in verschiedenen Gebieten zu kompliziert, um durch einen relativ einfachen Variabilitätszyklus dargestellt zu werden, könnte damit entkräftet werden, daß wir ja bei dieser Strahlungskurve ohne weiteres auch die Wirkung der astronomischen Schwankungen *mitberücksichtigen* könnten; daß in kleineren Eisgebieten, z. B. den Alpen, deren Mitwirkung deutlich zum Ausdruck komme, in den großen Inlandeisgebieten wie Nordamerika dagegen nur die Hauptschwankung der Sonnenstrahlung selbst sich spiegele; hier taucht also zum ersten Male ein ganz neuer Gedanke auf, nämlich der einer *Interferenz der astronomischen Schwankungen mit jenen der Hauptursache selbst*.

Eine eingehende meteorologische Diskussion, ob auch in Gebieten wie Nordamerika eine Inlandeisdecke bei 20% stärkerer Sonnenstrahlung entstehen könnte, kann hier nicht gegeben werden (vgl. dazu z. B. [65], [66]). Ganz gleich, welches die Hauptursache ist, eines muß sie erklären können: daß die Sommertemperatur entsprechend erniedrigt worden ist, sei es nun, wie bei der astronomischen Theorie, durch sommerliche Strahlungsarmut, oder wie bei dieser Hypothese, durch verstärkte Bewölkung und Niederschläge. Daß aus analogen Gründen, wie auf S. 35 besprochen, die erste Hälfte des Sommerhalbjahres infolge vermehrter Kälterückfälle trotz der stärkeren Strahlung kühler wäre als heute, kann als wahrscheinlich gelten. Aber diesem Defizit stünde ebenso wahrscheinlich ein Wärmegewinn während der spätsommerlichen Trockenperioden im August-September gegenüber und es bedürfte noch einer eingehenden Prüfung, ob das frühj. hrliche Defizit, allenfalls unterstützt durch vermehrte winterliche Niederschläge, wirklich die Oberhand gewinnen und so zu wachsender Vergletscherung führen könnte, oder ob es nicht nur bei einer auf der ganzen Erde vermehrten Ozeanität des Klimas zu einer Verschiebung der thermischen Extrema käme. Aber so instruktiv ein solches Ergebnis für den Meteorologen auch wäre, für uns könnte es nicht viel besagen, und zwar aus folgenden Gründe: wie nämlich die Sonne ganz friedlich zwei derartige Maxima durchlaufen soll, ist schwer einzusehen; es müßte hierbei mit einer ebensolchen Verstärkung der gesamten solaren Aktivität gerechnet werden, d. h. also auch mit verstärkter Protuberanzentätigkeit usw. Denken wir andererseits an das Fleckenphänomen, das sich doch klimatologisch so deutlich auswirkt, nicht wegen Strahlungsänderungen, sondern wegen anderweitiger Beeinflussung durch elektrische, magnetische

und korpuskulare Effekte. Und es ist ganz klar, daß eine solche Beeinflussung in entsprechender Steigerung schwer übersehbare Folgen haben könnte; außerdem müßten wir noch indirekte Einflüsse dieser Strahlungssteigerung, nicht zuletzt ihre Wirkung auf die den Strahlungshaushalt der Erdatmosphäre stark beeinflussende Ozonschicht, berücksichtigen: das Problem würde jedenfalls hoffnungslos kompliziert.

Es führt vielmehr von Simpsons Gedanken aus ein direkter Weg zur Kosmogonie. Hier können wir unseren zweiten großen Trumpf ausspielen — die große Zahl der zur Verfügung stehenden Objekte. Wenn es uns gelingt, aus dem Nebeneinander der dort verwirklichten Zustände Anhaltspunkte über den von unserer Sonne zurückgelegten Entwicklungsweg zu gewinnen, kann andererseits die Paläoklimatologie solche Möglichkeiten prüfen oder gegebenenfalls uns eine Entscheidung bei verschiedenen Möglichkeiten erleichtern. Schließlich werden wir im Anschluß an Simpsons Idee unser Hauptaugenmerk auf zeitweise Störungen in der Sonnentätigkeit richten, wie sie zu den Eiszeiten stattgefunden haben könnten, und nachsehen, ob derartige Störungen auch an anderen der Sonne ähnlichen Sternen wiederzufinden sind. Der Weg, den wir im folgenden Kapitel zu gehen haben, ist daher in großen Zügen bereits festgelegt.

Zweites Kapitel.

Die Sonne als Fixstern.

4. Das Zustandsdiagramm.

Wenn, wie wir im vorhergehenden Abschnitt abschließend bemerkten, die Hauptstärke der Kosmogonie die große Zahl der zur Verfügung stehenden Objekte ist, so wird es die selbstverständliche Grundaufgabe der empirischen Kosmogonie sein, für möglichst viele Fixsterne die unserer Beobachtung zugänglichen Daten, gewöhnlich Zustandsgrößen¹⁾ genannt, exakt zu ermitteln.

Was wir von einem alleinstehenden Stern ermitteln können, ist recht wenig. Aus bekannter Entfernung und scheinbarer Leuchtkraft erhalten wir die auf ein näher zu bestimmendes Normalmaß, gewöhnlich 10 parsek, reduzierte *absolute Leuchtkraft*, die erforderlichenfalls durch Anbringung der sog. bolometrischen Korrektur auf die absolute bolometrische Leuchtkraft gebracht werden kann. Die Leuchtkräfte werden im allgemeinen in

¹⁾ Auf die beobachtungsmäßige Ermittlung und Reduktion dieser Daten kann hier nicht näher eingegangen werden; man vgl. dazu u. a. E. u. B. Strömberg, Lehrb. d. Astronomie, Berlin (1933) p 321 ff; eingehendste Darstellung bei Lundmark [67]

Größenklassen und durch das Zeichen m , also z. B. $10^m =$ zehnter Größenklasse angegeben, wobei die Differenz einer Größenklasse einem Intensitätsverhältnis 2·5 entspricht. Aus der spektralen Verteilung der ausgestrahlten Energie erhalten wir die Temperatur, wobei man sich oft, besonders bei statistischen Untersuchungen, mit einem Äquivalent der Temperatur, z. B. dem Spektraltypus, begnügen muß. Da wir die Sterne bekanntlich nicht in ihrer wahren Gestalt sehen, sind direkte Durchmesserbestimmungen im allgemeinen ausgeschlossen; nur auf dem Umweg über das Interferometer konnte bei einigen wenigen sehr großen und sehr nahen Sternen der Durchmesser bestimmt werden. Man muß diesen sonst unter gewissen Annahmen über die Sternstrahlung aus der Temperatur und der Leuchtkraft berechnen.

Bekanntlich hat man schon seit längerem die Sternspektren nach Buchstaben klassifiziert. Die Reihe

$O, B, A, F, G, K, M,$

die mit ganz wenigen Ausnahmen alle normalen Sterne umfaßt, stellt eine Reihe abnehmender Temperaturen dar, etwa entsprechend

$30\,000^\circ, 23\,000^\circ, 12\,000^\circ, 8\,000^\circ, 5\,900^\circ, 4\,500^\circ, 3\,300^\circ.$

Diese Spektralklassen werden noch von 1–9 unterteilt, z. B. liegt A_5 gerade zwischen A und F ; die Sonne hat ein G_2 -Spektrum bei einer Temperatur 5800° .

Leider können wir die wichtigste Zustandsgröße eines Sternes, seine *Masse*, nicht bei alleinstehenden Sternen ermitteln; wir sind vielmehr auf Doppelsterne angewiesen, und zwar einerseits auf visuelle Doppelsterne, andererseits auf Bedeckungsveränderliche; bei den spektroskopischen Doppelsternen geht die unbekanntene Neigung i mit $\sin^3 i$ ein, wir erhalten also hier nur untere Grenzwerte der Massen. Glücklicherweise sind gerade die visuellen Doppelsterne in der Mehrzahl der Sonne hinsichtlich Leuchtkraft und Masse sehr ähnlich, wodurch der Schluß, daß an Doppelsternen ermittelte Massen auch für einzelne Sterne als repräsentativ gelten können, als berechtigt angesehen wird. Wirklich zuverlässige Massenbestimmungen existieren von visuellen Doppelsternen bzw. Bedeckungsveränderlichen kaum 50, woraus die Gewagtheit, die Masse heute schon in kosmogonische Theorien einzubeziehen, klar erhellt. Sonstige „Massenbestimmungen“, z. B. auf Grund behaupteter Beziehungen zwischen Masse und Geschwindigkeit oder solcher zwischen Masse und Leuchtkraft, müssen, abgesehen von dem stark hypothetischen Charakter dieser Beziehungen, doch am empirischen Material geeicht werden, können uns also auch nicht weiterhelfen. Die für manche Probleme wichtige *Rotationsgeschwindigkeit* kann

exakt nur bei Bedeckungsveränderlichen ermittelt werden; die sonst mögliche Abschätzung auf Grund der Verbreiterung der Spektrallinien ist naturgemäß sehr roh; immerhin scheinen Rotationsgeschwindigkeiten, die diejenige der Sonne (2 km/sec) um das 100fache übertreffen, vorzukommen.

Periodenänderungen bei Bedeckungsveränderlichen, dem Schatzkästlein der modernen Astrophysik, versetzen uns in vereinzelten Fällen in die Lage, Aussagen über eine ungemein wichtige Größe, die *Dichtekonzentration* im Innern der Sterne, zu machen (vgl. S. 62). Bei den gleichen Veränderlichen können wir Daten über die Abweichungen von der Kugelgestalt erhalten und schließlich noch Aussagen über gewisse Eigenschaften der Sternatmosphären, vor allem über die sog. Randverdunklung, welche die aus dem Spektrum gewonnenen chemischen und physikalischen Aufschlüsse ergänzen können.

Das sind die unserer Beobachtung zugänglichen Größen. Selbst wenn wir von den experimentellen und theoretischen Schwierigkeiten bei Ableitung der Zustandsgrößen absehen, kommen wir nicht um die Feststellung herum, daß diese im allgemeinen doch nur mehr oder weniger grobe Integralwerte sind, die über die inneren

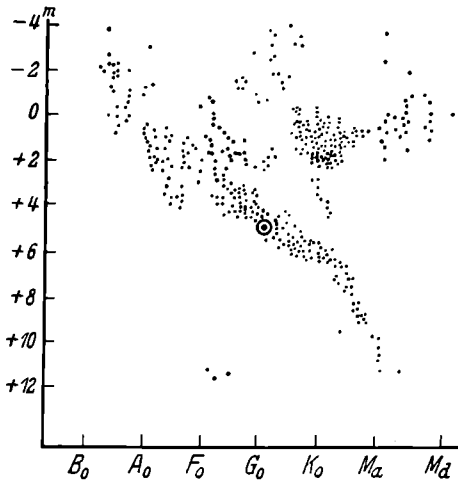


Fig. 5a.

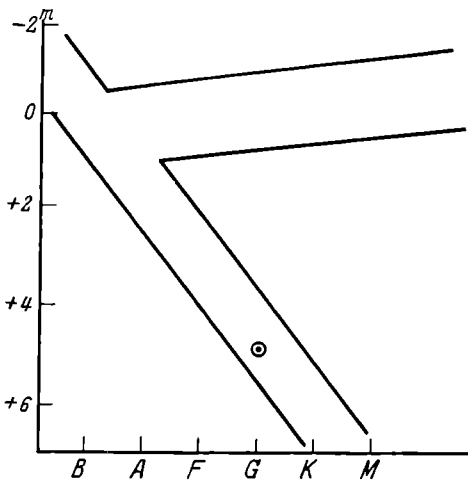


Fig. 5b.

Zustände in den Sternen keine weitergehenden Aussagen zulassen. Der nächste Schritt ist nun der, nach etwaigen empirischen Zusammenhängen zwischen den voneinander unabhängigen Zustandsgrößen zu suchen.

Für eine verhältnismäßig große Zahl von Sternen ist der Zusammenhang zwischen absoluter Leuchtkraft und einem Temperaturäquivalent (meist Spektrum oder Farbenindex) untersucht worden. Trägt man als Abszisse das Spektrum, als Ordinate die Leuchtkraft auf, so erhält man das in Fig. 5 a–d veranschaulichte Bild, das sog. Russell-Diagramm. In Fig. 5 a ist dieser Zusammenhang für Sterne unserer näheren Umgebung sichtbar, in 5 b sind die sich daraus ergebenden Hauptlinien des Diagrammes, der Zwerg- oder Hauptast und der Riesenast, rein schematisch gezeichnet.

Aber damit können wir noch nichts anfangen, denn bei unserer rein zufälligen Auswahl werden wir die absolut hellen Sterne stark bevorzugen,

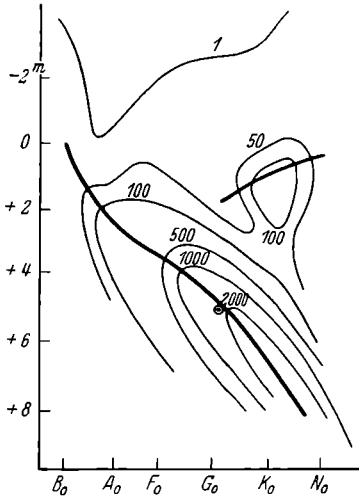


Fig. 5 c.

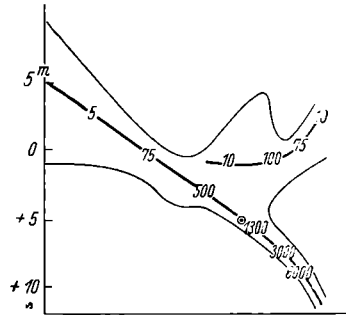


Fig. 5 d.

Fig. 5 a–d. Das Zustandsdiagramm.

und das Diagramm bedarf noch einer eingehenden Bearbeitung, um daraus die wahre zahlenmäßige Zustandsverteilung zu bekommen. In Fig. 5 c ist diese Verteilung nach van Rijn gegeben; die beiden Äste sind dick ausgezogen, und schließlich gibt 5 d die Häufigkeitsverteilung auf den Ästen. Wir erkennen als Auffälligstes ein starkes zahlenmäßiges Überwiegen des Zwergastes bzw. eine Zunahme nach geringen Leuchtkräften hin, fernereine deutliche Lücke zwischen Riesen- und Zwergast. Da das Hauptproblem für uns die Stellung der Sonne im Russell-Diagramm ist, habe ich sie, entsprechend ihrem Spektrum G_2 und ihrer absoluten Helligkeit $+4.85^m$, in allen 4 Fällen durch ihr Zeichen \odot eingetragen. Die in 5 a sichtbaren Punkte im unteren Teil des Diagramms sind die rätselhaften sog. *weißen Zwerge*, Sterne, bei denen wir mit Sicherheit auf Dichten von der Größenordnung 10^5 g/cm³ schließen

müssen¹⁾. Ich habe sie in 5c und d weggelassen, da wir bis heute über die wahre Häufigkeit keine sichtbaren Anhaltspunkte haben: zwar kennen wir erst etwa 20, doch da die Entdeckungswahrscheinlichkeit eine außerordentlich geringe ist, dürfen wir daraus keine Rückschlüsse auf wahre Seltenheit ziehen, wie es ja umgekehrt ebenso falsch gewesen wäre, auf Grund der großen Häufigkeit der Riesen in 5a auf entsprechende wahre Häufigkeit zu schließen.

Worauf es, wenn wir an Abschnitt 3 zurückdenken, für uns besonders ankommt, ist die Frage nach der *Stellung der Veränderlichen*²⁾ im Russell-Diagramm. Die Mehrzahl der bis heute bekannt gewordenen Typen veränderlicher Sterne zeigt eine ausgesprochene *Konzentration auf den Riesenast*. Hier finden wir eine große Anzahl von Sternen mit verhältnismäßig regelmäßigem periodischem Lichtwechsel eines der Typen der Mira-RV Tauri-, Delta Cephei- oder RR Lyrae-Sterne. Eine Veränderlichkeit eines dieser Typen ist bisher auf dem Zwergast nicht gefunden worden. *Ja, während auf dem Riesenast, besonders bei den roten Riesen, überhaupt ein großer Prozentsatz veränderlich zu sein scheint, ist auf dem Zwergast Konstanz anscheinend der Normalfall*. Nur eine besonders rätselhafte Gruppe von veränderlichen Sternen, die nach ihrem im Jahre 1858 entdeckten Vertreter *U Geminorum* Sterne genannt werden, sind *Zwerge*, da die Beobachtungen nur sehr geringe absolute Helligkeit ergeben haben³⁾. Die Tatsache, daß wir bis heute von diesen sowie den offenbar nahe verwandten Sternen vom Typus *Z Camelopardalis* nur einige Dutzend kennen, was verglichen mit der großen Zahl der überhaupt bekannten Veränderlichen — zur Zeit etwa 10000 — nur etwa $\frac{1}{2}\%$ ausmacht, darf jedoch, wie analog bei den weißen Zwergen, infolge der auch hier sehr geringen Entdeckungswahrscheinlichkeit nicht zum Rückschluß auf entsprechend geringe wahre Seltenheit benutzt werden. Wir werden auf diese Sterne noch in anderem Zusammenhange (S. 82) zurückzukommen haben.

¹⁾ Bei dem weißen Zwerg A. C. + 70°8247 glaubte man anfänglich auf eine Dichte von sogar 10^7 g/cm³ schließen zu müssen, doch haben spätere Untersuchungen keine Bestätigung dieser hohen Dichte gebracht.

²⁾ Die ausführlichste Darstellung hierzu hat Ludendorff [68] gegeben. Ferner ist von berufenster Seite kürzlich eine umfassende Monographie erschienen [69]; für die einzelnen im folgenden genannten Veränderlichen sei auf das große Werk „Geschichte und Literatur der Veränderlichen Sterne“ (letzter Band 1936) verwiesen.

³⁾ Ku karkin fand aus der Eigenbewegung für SS Cygni und U Geminorum als absolute Helligkeit + 10^m [70], aus der trigonometrischen Parallaxe nach van Maanen findet man aber + 6^m bzw. + 8^m für diese [71].

Noch interessanter ist jedoch, daß die offenbar rätselhaftesten Fixsterne, die sog. *neuen Sterne oder Novae*¹⁾ im Russell-Diagramm am häufigsten gerade dort vorkommen, wo unsere Sonne steht. Bei den Novae beobachtete man in allen bisher bekannt gewordenen Fällen einen äußerst raschen Anstieg (vgl. Fig. 6 a u. b mit den Lichtkurven zweier typischer Novae) zu einem Maximum, dessen Helligkeit bis zu dem Mehrhunderttausendfachen der ursprünglichen betragen kann; das ganze Phänomen

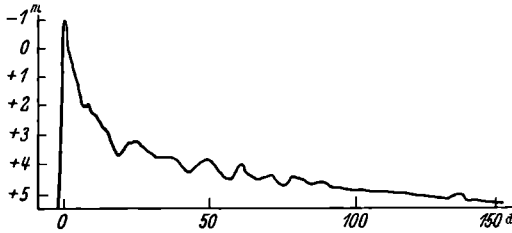


Fig. 6a. Nova Aquilae 1918.

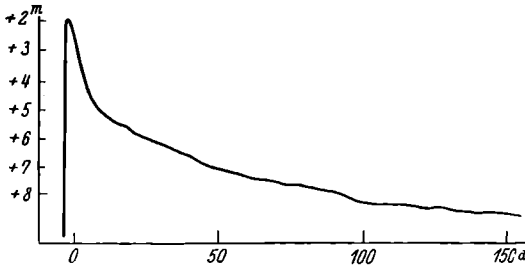


Fig. 6b. Nova Lacertae 1936.

Fig. 6a u. b. Die Lichtkurven zweier typischer Novae.

Die Abszissen bedeuten Tage, gezählt vom Maximum aus, die Ordinaten die beobachteten Helligkeiten in Größenklassen.

Man beachte den äußerst raschen Anstieg, sowie auch den vor allem anfänglich schnellen Wiederabstieg; in beiden Fällen betrug schon nach reichlich 1 Monat die Helligkeit nur noch 1% derjenigen des Maximums.

zeigen zunächst die Lichtkurven starke Ähnlichkeit untereinander. Noch bemerkenswerter war aber das Ergebnis, daß die absoluten Helligkeiten der Maxima nur eine verhältnismäßig geringe Streuung um die absolute Helligkeit -5^m bis -7^m zeigten. Man darf natürlich diese Gesetzmäßigkeiten nur im statistischen Sinne auffassen, denn Ausnahmen sind bekannt: was zunächst die Lichtkurven, d. h. also den Gesamtcharakter des Ausbruches betrifft, so zeigte die sehr interessante Nova Herkulis 1934

¹⁾ Vgl. die ausführlichste Darstellung hierüber bei Stratton [72]; für die einzelnen Novae sei analog wie bei den Veränderlichen auf die „Geschichte und Literatur“ verwiesen.

ein völlig anderes Verhalten. Und was die absolute Helligkeit betrifft, so war diejenige der berühmten Nova Aquilae 1918 bestimmt größer; nach verschiedenen Methoden gefundene Werte liegen bei -9^m bis -10^m [73], andererseits kann sie bei der Nova Sagittae 1913 kaum mehr als 0^m betragen haben [72] S. 674¹⁾.

Erst neuesten Datums ist die Erforschung einer offenbar besonders heftigen Novaart, vielfach als *Supernovae* bezeichnet, von denen erst kürzlich (Januar 1939) der Pionier dieses Gebietes, Zwicky, wieder ein Prachtexemplar entdeckte. Von ihnen wissen wir im Grunde genommen nur, daß, abgesehen von einer verglichen mit normalen Novae außerordentlichen Seltenheit, die Helligkeit ihres Maximums ganz erheblich über der normaler Novae liegt, im Mittel bei -14^m , die von Zwicky entdeckte Supernova in dem Spiralnebel IC4182 erreichte jedoch -16.6^m und war fast 100mal heller als der ganze Nebel mit seinen nach Milliarden zählenden Sternen. Was das heißt, mag der Leser daraus ermessen, daß dieses Wundergestirn in den paar Monaten seines Leuchtens die gleiche Größenordnung an Energie ausgestrahlt hat wie die Sonne in den letzten 40 Millionen Jahren! Leider wissen wir nur wenig darüber, was die Supernovae im Normalzustand sind. Im Milchstraßensystem ist mit Gewißheit nur Tycho's Nova aus dem Jahre 1572 eine Supernova gewesen, als die vielfach ein roter Riese, Spektrum M_3 , angesehen wird, doch ist diese Identifikation nur eine Vermutung. Eine Schlußfolgerung kann man aber daraus ziehen, nämlich die, daß die Amplitude mindestens 17^m betragen hat; wenn man diese Identifizierung anzweifelt [74], erhöht sich diese angesichts des Fehlens hellerer Sterne auf mindestens 20^m . Es ist ferner sehr wahrscheinlich, daß der sog. Krebsnebel seine Entstehung einer im Jahre 1054 aufgeleuchteten Supernova verdankt [75], deren Amplitude Lundmark zu fast 20^m und deren absolute Maximalhelligkeit er zu mindestens -14^m abschätzt. Die jetzige absolute Helligkeit ergibt sich zu $+5.7^m$. D. h. aber: *in dem einzigen Falle, in dem wir mit einiger Wahrscheinlichkeit eine Supernova im Normalzustand kennen, finden wir einen Stern wie unsere Sonne!* Ob das Supernovaphänomen nur graduell vom normalen Nova-

¹⁾ Der besonderen Wichtigkeit für die behandelten Probleme wegen sei auf eine nach Abschluß des Buches (August 1939) erschienene Arbeit von N. Richter: Über die absolute Helligkeit einiger Praenovae, A. N. 269 (1939) 105 hingewiesen. Aus einer sorgfältigen Diskussion der vorliegenden Entfernungsbestimmungen von 7 Novae findet er, daß die absoluten Helligkeiten der Maxima starke Streuung aufweisen; Mittelwert der 7 Novae $-2,9^m$. Es ist also nicht richtig, für die Maximalhelligkeit einer Nova einen Mindestwert von etwa -5^m anzusetzen, was besonders für die auf S. 86 besprochenen Probleme von allergrößter Wichtigkeit ist.

phänomen verschieden ist, oder ob es einer ganz anderen Ursache seine Entstehung verdankt, wissen wir heute noch nicht, ja nicht einmal, ob es, wenn auch relativ seltene, Bindeglieder gibt, oder ob diese völlig fehlen; legt man das Hauptgewicht z. B. auf die absolute Helligkeit, so steht die Nova Aquilae 1918 gerade in der Mitte zwischen normalen Novae und Supernovae; ihre Amplitude hingegen betrug nur 12^m , war also nicht größer als die normaler Novae. Größere Amplituden hingegen zeigten mit 14^m die Novae Herkulis 1934 und Lacertae 1936, doch die absolute Maximalhelligkeit war nicht größer als -8^m .

Aber nicht nur nach der Seite der größeren, sondern auch nach der der kleineren Aufleuchten hin scheint das Novaphänomen Verwandte zu

Fig. 7a u. b. Zwergveränderliche vom Typus *U Geminorum*, *Z Camelopardalis*.

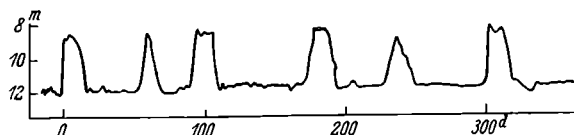


Fig. 7a. *SS Cygni*.

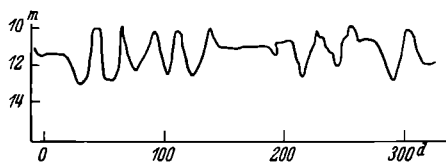


Fig. 7b. *Z Camelopardalis*.

Die Abszissen sind Tage, gezählt von einem beliebigen Anfang aus (ieh griff gerade das Jahr 1928 heraus), die Ordinaten sind die beobachteten Helligkeiten in Größenklassen.

besitzen, nämlich in den schon erwähnten Veränderlichen vom Typus *Z Camelopardalis-U Geminorum*; vgl. Fig. 7 a u. b. Sieht man sich z. B. ein Maximum von *SS Cygni* an, so erkennt man sofort eine gewisse Ähnlichkeit mit einem Novaausbruch: schneller, unvermittelt einsetzender Anstieg, darauffolgender langsamerer Abfall; der Hauptunterschied ist, abgesehen von dem geringeren Ausmaße des Aufleuchtens, nur die fortlaufende Wiederholung; bei *SS Cygni*, den man sehr regelmäßig verfolgt hat, zählte man bei seinem letzten Aufleuchten im Februar 1939 schon die Nr. 305 seit seiner Entdeckung im Jahre 1896. Was wir über die Spektre dieser Veränderlichen wissen, ist leider recht wenig, scheint aber jedenfalls die Annahme enger Verwandtschaft mit den Novae zu stützen; so zeigt das Spektrum von *SS Cygni* große Ähnlichkeit mit dem der Novae [76], und die Beobachtungen des Farbenindex [77] sprechen dafür, daß wir es bei dem Aufleuchten in der Hauptsache mit einem Expansionsvorgang zu tun haben, also ähnlich, wie wir es im großen bei den Novae finden. Zwischen diesen Veränderlichen und den Novae sind Bindeglieder jedenfalls vorhanden. Der Stern *T Pyxidis*, dessen Lichtkurve Fig. 8 gibt, leuchtete

so schon dreimal ganz ähnlich einer Nova auf, und das vierte Aufleuchten wird täglich erwartet, *RS Ophiuchi* leuchtete zweimal auf¹⁾; sein letztes Aufleuchten 1933 war sehr ähnlich einem normalen Novaausbruch. Ferner wurde eine statistische Beziehung gefunden [70], die das Intervall zwischen zwei Ausbrüchen mit der Amplitude verbindet; je stärker der Ausbruch *A*, desto länger das Intervall *I*:

$$A = 0.63 + 1.67 \log I.$$

Sie gilt von den *U Geminorum*-Sternen bis zu *T Pyxidis* und *RS Ophiuchi*. Fragt man sich nun, wie groß ein hypothetisches Intervall bei den typischen Novae mit Amplituden von 11 Größenklassen wäre, so kommt man mit unserer Beziehung zur Größenordnung einiger 100–1000 Jahre; also



Fig. 8a. *T Pyxidis*.

Die Abszissen sind Jahreszahlen, die Ordinaten die beobachteten Helligkeiten in Größenklassen. Man erkennt, daß die Lichtkurven charakteristische Ähnlichkeiten mit denen der Fig. 7a u. b zeigen; nur sind hier Intervalle von der Größenordnung von Jahrzehnten, dort hingegen solche von Monaten.

Fig. 8a u. b. Nova-ähnliche Veränderungen.



Fig. 8b. *Z Andromedae*.

selbst im Falle des Zutreffens dieser Möglichkeit wäre ein Warten auf einen zweiten Ausbruch hoffnungslos. Eine andere Möglichkeit bestünde darin, daß der typische Novaausbruch jeweils einmalig erfolgt, und zwar bei allen Sternen als normales Ereignis. Dann kann man aus der jetzt beobachteten Häufigkeit auf die Zeitdauer, in der alle Sterne einmal aufgeleuchtet wären, schließen. Lönnquist [78] gelangte so zu 4–500 Millionen Jahren. Er zitiert für den Andromedanebel eine Abschätzung

1) Gerade bei Absendung des Manuskriptes an den Verlag kann ich die den astronomischen Leser zweifellos interessierende Mitteilung machen, daß in den letzten Wochen (Juli 1939) auch der novaähnliche Stern *Z Andromedae* zum dritten Male aufgeleuchtet ist; aus diesem Anlaß habe ich seine Lichtkurve neben der von *T Pyxidis* in Fig. 8 seit seiner Entdeckung 1887 bis jetzt gegeben. Beim Lesen der zweiten Korrektur (Ende August 1939) kann ich weiter mitteilen, daß der Stern bereits die 8. Größe erreicht hat und somit die größte bisher beobachtete Helligkeit zeigt.

Lundmarks zu 400 und eine am gleichen Objekt durchgeführte von v. Zeipel zu 90 Millionen Jahren; doch findet man vielfach noch kleinere Werte angegeben, bis zu 50 Millionen Jahren. Diese Diskrepanzen liegen darin begründet, daß wir über die wahre Häufigkeit solcher Novae, die im Maximum nur geringe scheinbare Helligkeiten besitzen, nur sehr spärliche Kenntnisse besitzen. Wir können also sagen, daß in dem betrachteten Falle *alle Sterne mit Intervallen von etwa 1–200 Millionen aufleuchten würden.*

Eine für uns überaus wichtige Frage ist die Verteilung des allgemeinen Novaphänomens, worunter wir alle Typen von *U Geminorum* bis zu den Supernovae verstehen wollen, auf die Äste des Russell-Diagramms. Bis vor kurzem galt es als erwiesen, daß das Novaphänomen sowohl auf dem Zwerg- als auch auf dem Riesenast vorkäme. Insbesondere die in verschiedener Hinsicht bemerkenswerte Nova *T Coronae* 1866 schien dies zu stützen, da ihr Spektrum gM_3 ist. Einzelne spektroskopische Ergebnisse, vor allem aber an einem schwächeren Aufleuchten im Jahre 1938 gemachte Beobachtungen führten zu der Annahme, daß nicht der rote Riese, sondern ein kleiner, aber heißer Begleiter die Nova selbst ist; vgl. hierzu [79]. Seine visuelle Helligkeit ist schätzungsweise 3 Größenklassen geringer als die des Riesen, so daß dieser Zwerg 1866 ganz wie eine normale Nova um 11 Größenklassen aufgeleuchtet wäre und hier vielleicht ein zweites Analogon zu *RS Ophiuchi* vorliegt; ob die weiteren kleinen Aufleuchten, auf die ich in [79] hinwies, ebensolche Aufleuchten, oder nur Schwankungen des roten Riesen sind, ist noch nicht entschieden. Schließlich ist die Supernova 1572, wie schon erwähnt, nicht mit Sicherheit identifiziert [74], und die zwei Novae *Aquiliae* 1919 und 1936, die übrigens bemerkenswerterweise dicht am Himmel beisammen stehen, sind in vielem derart von der Norm abweichend, daß sie trotz roter Färbung kaum als repräsentativ für das Novaphänomen auf dem Riesenast gelten können.

Fassen wir also unsere Diskussion zusammen: auf dem Riesenast dominiert eine periodische Veränderlichkeit, auf dem Zwergast hingegen fehlt sie. *Das Novaphänomen, vielleicht sogar einschließlich der Supernovae, sowie alle damit verwandten ähnlichen Veränderlichen scheinen auf den Zwergast beschränkt zu sein; so viel steht jedenfalls fest, daß noch in keinem einzigen Falle ein solches Phänomen mit Sicherheit an einem typischen Riesen beobachtet wurde.*

Andere seltene Typen von Veränderlichkeit, so die unregelmäßigen Veränderlichen vom Typus *R Coronae* oder vom Typus μ *Cephei*, kommen für uns nicht in Betracht, da sie, soweit bekannt, auf Riesen bzw. Überriesen beschränkt sind.

Wir haben damit die Verteilung der normalen sowie der veränderlichen Sterne im Russell-Diagramm kennen gelernt; doch damit allein ist das Diagramm noch nicht restlos ausgewertet; vielmehr spielt, gerade auch für das Studium des möglichen Entwicklungsganges, die Feinstruktur des Diagramms eine wesentliche Rolle, m. a. W. das Problem, ob eine streng gleichmäßige Sternverteilung auf den Ästen herrscht, oder ob bevorzugte Gegenden existieren. Daß zwischen Riesen und Hauptast eine Lücke klafft, in der sich nur einige wenige Veränderliche und spektroskopische Doppelsterne befinden, ist ohne weiteres ersichtlich. Auf dem Hauptast hingegen glaubte man mit merklich kontinuierlicher Verteilung rechnen zu dürfen, bis Halm in einer Untersuchung an über 20000 Sternen zu einer ausgesprochen diskontinuierlichen Verteilung gelangte und Sticker [80] dies an weiterem Material an Hand strenger Methoden bestätigte, wogegen Kienle [81] die Realität dieser diskreten Werte bestritt. Öpik [82] kam dann, speziell unter Berücksichtigung der den Beobachtungen innewohnenden Ungenauigkeit, zu dem Ergebnis, daß zwar die Bevorzugung gewisser Werte allem Anschein nach reell ist, aber diese diskreten Werte bei weitem nicht so stark ausgeprägt erscheinen, wie Halm es glaubte, und Zwischenzustände durchaus möglich sind, vgl. auch [83] S. 261ff. Gerade für kosmogonische Probleme ist die Erforschung von in der Natur selten verwirklichten Zuständen wichtig, denn wenn das sich uns heute anbietende Bild das einer Entwicklung ist — und bis zu einem gewissen Grade wird es das immer sein —, so brauchen diese seltenen Zustände keineswegs Ausnahmefälle darzustellen, sondern können ebensogut ganz normale Entwicklungsstadien sein, die eben nur relativ schnell durchlaufen werden. Nun sahen wir bereits, daß die Riesensterne, verglichen mit den Zwergen, sehr selten sind und nur 1% von diesen ausmachen. Nicht nur diese zahlenmäßige Unterlegenheit, sondern auch die Tatsache, daß bei den Riesen eine große Zahl Ausnahmestände vorkommen, lassen eigentlich einen Vergleich des Riesenastes mit dem Hauptast gar nicht mehr zu. Denn neben den normalen Riesen lernte man noch Sterne kennen, die, wie z. B. Rigel im Orion, mit einer durchschnittlich 100mal größeren Leuchtkraft strahlen als die gewöhnlichen Riesen und die man *Überriesen* nennt. Kosmogonisch vielleicht noch bedeutungsvoller war der Nachweis von Sternen, die offenbar in dem Gebiet zwischen Riesen- und Hauptast stehen, den sog. *Unterriesen*, die in ihrer Leuchtkraft und Dichte den Riesen, ihrer Masse nach aber den Zwergen näherstehen.

Man wird also heute das Russell-Diagramm besser so charakterisieren, daß die überwiegende Mehrzahl der Sterne sich längs einer gewissen Linie, eben des Hauptastes, gruppieren und daß zu beiden

Seiten Ausnahmen vorkommen, die aber zahlenmäßig weit seltener zu sein scheinen.

Für kosmogonische Probleme geradezu fundamental ist die sich hieran anschließende Frage, welche Streuung nun die Zustände auf dem Hauptast selbst aufweisen, d. h. ob sich die Sterne wie eine Perlschnur aneinanderreihen oder aber, ob eine größere kosmische Streuung vorliegt. An dem Sternhaufen Präsepe durchgeführte sehr genaue Untersuchungen [84] ergaben tatsächlich eine Anordnung der Sterne in einer genauen Linie, ähnlich auch frühere Beobachtungen an den Plejaden. Zur Beantwortung gerade dieser Frage sind Sternhaufen deshalb geeignet, da hier alle Sterne in praktisch der gleichen Entfernung von uns liegen; beim allgemeinen Sternsystem müßten wir hierzu die individuellen Entfernungen der Sterne sehr genau kennen, was nur für relativ wenige Sterne behauptet werden kann. Soweit sich eine Antwort heute überhaupt schon geben läßt, dürfte die Streuung im Sternsystem merklich größer sein als bei den Sternhaufen [85].

Bisher betrachteten wir die Beziehungen zwischen den beiden Zustandsgrößen Leuchtkraft und Temperatur, beides Größen, die, wenn auch zum Teil weniger genau, für eine relativ große Anzahl von Sternen bestimmt worden sind, und deren Beziehungen wohl schon auf Feinheiten hin untersucht werden können. Unsere Kenntnisse über die Beziehungen zu der zweifellos wichtigsten Zustandsgröße der Sterne, der *Masse*, sind hingegen viel weniger gesichert, da, wie bereits gesagt, nur für sehr wenige Sterne zuverlässige Bestimmungen vorliegen. Das allgemein als sicher angesehene Hauptergebnis ist eine starke Abhängigkeit der absoluten Leuchtkraft von der Masse, erfahrungsgemäß mit guter Annäherung $L = \text{const} \cdot M^3$. *Im Russell-Diagramm nimmt die Masse längs des Hauptastes ab, bei den normalen Riesen scheint sie ungefähr konstant zu sein.* Andererseits zeigen die Überriesen, die Unterriesen, und vor allem die weißen Zwerge, hinsichtlich der Abhängigkeit der Leuchtkraft von der Masse stark abweichendes Verhalten; z. B. strahlt der weiße Zwerg Sirius B trotz nahezu gleicher Sonnenmasse nur knapp 1 % der Energie der Sonne aus; einige Unterriesen hingegen strahlen, obgleich ihre Masse ebenfalls nur von der Größenordnung der Sonnenmasse ist, das 5–10fache der Sonne aus, so daß also auch im stationären Zustand bei gleicher Masse Leuchtkraftdifferenzen von der Größenordnung 1000 vorkommen. Sehr bemerkenswert ist fernerhin, daß sich die bis heute bekannt gewordenen Sternmassen in zahlenmäßig weit engeren Grenzen halten als die anderen Zustandsgrößen. Während z. B. die mittleren Dichten zwischen 10^{-6} g/cm³ und 10^5 g/cm³, also um das 10^{11} fache, variieren, sind sicher ermittelte Massen von > 50 und $< 1/10$ Sonnenmasse nicht bekannt, ja Massen $> 10 M_{\odot}$ schon außerordentlich selten.

5. Der innere Aufbau der Sterne.

Wir haben also von den zunächst als ganz unabhängig voneinander betrachteten Parametern Masse, Leuchtkraft und Temperatur gesehen, daß zwischen ihnen gewisse Korrelationen bestehen, d. h. daß in der Natur ganz bestimmte Kombinationen bevorzugt sind. Die Frage jedoch nach der Begründung der offenbar wirksamen Auswahlprinzipien könnte nur dann Aussicht auf Erfolg haben, wenn wir den inneren Aufbau bzw. die Entwicklung der Sterne erforschen könnten. Nun ist aber infolge des hohen Absorptionsvermögens der Sternmaterie nur eine einige 10 km dicke Schicht unserer Beobachtung zugänglich. Wir sind also bei der Erforschung des Sterninneren im allgemeinen auf die „analytische Bormaschine“ (Eddington) angewiesen, d. h. wir müssen unter Anwendung der letztthin in irdischen Laboratorien gewonnenen Gesetze die Zustände im Innern zu erfassen suchen, was allerdings im allgemeinen nicht ohne weitgehende Extrapolation möglich ist. Daß aber der Astrophysiker hier nicht, wie es dem Außenstehenden scheinen könnte, ganz im Dunkeln tappt, sondern sich eine Reihe brauchbarer Ergebnisse schon auf Grund relativ einfacher Überlegungen ergeben, sei im folgenden, insoweit wir es noch öfters benötigen, ganz kurz skizziert¹⁾.

Wir müssen unsern Ausgang nehmen von einem möglichst einfachen, d. h. einem nicht rotierenden und keinen äußeren Kräften unterworfenen Stern. Da die Sterne, wie unsere Beobachtungen zeigen, sich im stationären Zustand befinden, so können wir ohne weiteres aussagen, daß an jeder Stelle des Sterninneren das Gewicht der darüberliegenden Schichten durch einen Gegendruck ausbalanciert werden muß, wobei sich dieser innere Druck aus Gasdruck und Strahlungsdruck zusammensetzt:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{d(p+q)}{dr} = -g \cdot \varrho, \quad (I)$$

wo P der Gesamtdruck, p der Gasdruck und q der Strahlungsdruck, g die Schwerebeschleunigung und ϱ die Dichte im Abstand r vom Sternenzentrum bedeuten. Der Strahlungsdruck q ist bekanntlich $q = \frac{aT^4}{3}$, wo a den Koeffizienten des Stefanschen Gesetzes, T die Temperatur bedeuten. Die Gleichung I ist die Bedingung des mechanischen Gleichgewichtes. Den Gasdruck p erhalten wir aus einem zweiten uns zur Verfügung stehenden

¹⁾ Von einer ausführlichen Behandlung dieses Problems muß im Rahmen dieses Buches natürlich abgesehen werden; es sei auf eine Reihe diesbezüglicher Darlegungen hingewiesen, zunächst auf das klassisch gewordene Buch Eddingtons [86], ferner auf Vogt [87], [88] und B. Strömrgren [89], (in dieser Arbeit auch vollständige Literatur).

Grundprinzip, daß die Sternmaterie eine Zustandsgleichung befolgen muß von der Form

$$p = f(T, \rho; \mu), \quad (\text{II})$$

wo μ das Molekulargewicht bedeutet; die einfachste Zustandsgleichung, deren Gültigkeit sich auch für das Sterninnere im allgemeinen als ausreichend erwiesen hat, ist die sog. ideale Gasgleichung

$$p = \frac{\Re \cdot \rho \cdot T}{\mu}, \quad (\text{IIa})$$

wo \Re die Gaskonstante bedeutet. In besonders erforderlichen Fällen kann an ihre Stelle z. B. die Zustandsgleichung entarteter Materie treten.

Da diese beiden Prinzipien selbst bei bekanntem Molekulargewicht im allgemeinen noch nicht genügen, um den inneren Zustand zu bestimmen, muß noch eine weitere unabhängige Beziehung hinzukommen. Eddington hat das Verdienst, im Jahre 1916 die großen diesbezüglichen Ungewißheiten älterer Hypothesen durch Anwendung des Gedankens des *Strahlungsgleichgewichtes* auf das Sterninnere behoben zu haben. Zufolge diesem Prinzip muß der Nettostrom an Energie, der durch eine beliebige Kugelfläche im Abstand r durch Strahlung nach außen fließt, gleich der im Innern dieser Kugelfläche irgendwie erzeugten Energie sein.

$$L_r = M_r \cdot Q = -4\pi r^2 \sigma \frac{dT}{dr}. \quad (\text{III})$$

Hierbei ist L_r die Leuchtkraft einer Kugelfläche im Abstände r vom Sternzentrum, M die Masse und Q die durchschnittliche Energieerzeugung dieser Kugel und σ ganz allgemein der Leitungskoeffizient, wobei zunächst an alle möglichen Arten des Energietransportes, z. B. Leitung oder Konvektion, gedacht werden kann; bei, wie wir annehmen, einem wesentlich durch Strahlung erfolgenden Transport der Energie, hat σ den Wert

$$\sigma = \frac{4\pi a c T^3}{3k\rho}, \text{ so daß III geschrieben werden kann: } L_r = -\frac{4\pi^2 a c r^2}{3k\rho} \frac{dT^4}{dr}.$$

Hierin bedeutet schließlich noch c die Lichtgeschwindigkeit und k den Absorptionskoeffizienten. Berücksichtigt man noch, daß, wenn G die Gravitationskonstante bedeutet, $g = \frac{GM_r}{r^2}$ ist, so erhält man durch Kombination von Gl. (III) und Gl. (I) schließlich

$$\frac{dP}{dT} = 4\pi g \rho \frac{\sigma}{Q}$$

und wenn auch hier wieder für σ sein obiger Wert eingesetzt wird

$$dP = \frac{4\pi a c G}{3kQ} dT^4. \quad (\text{IIIa})$$

Aus diesen drei Beziehungen, die, um es noch einmal zu wiederholen, das mechanische Gleichgewicht, die Zustandsgleichung der Sternmaterie und das Strahlungsgleichgewicht ausdrücken, läßt sich der innere Aufbau eines Sternes bestimmen; man erkennt ferner aus Gl. (IIIa), daß dazu das eine maßgebende Rolle spielende Produkt $k \cdot Q$ in seiner Abhängigkeit von dem inneren Zustand bekannt sein muß. Eddington hat hier plausibel zu machen versucht, daß die einfachste Annahme „ $k \cdot Q = \text{const}$ “ eine brauchbare Annäherung darstellt, wodurch Gl. (IIIa) sofort integriert werden kann zu

$$P = \frac{4\pi a c G}{3 k Q} d T^4$$

und hieraus für das Verhältnis vom Strahlungsdruck q zum Gesamtdruck P

$$\frac{q}{P} = 1 - \beta = \frac{k Q}{4\pi c G} \text{ folgt.}$$

$1 - \beta = \frac{q}{P}$ und $\beta = \frac{p}{P}$ sind die allgemein eingeführten Bezeichnungen für das Verhältnis vom Strahlungsdruck bzw. Gasdruck zum Gesamtdruck. Man kommt also in diesem Falle zu dem Resultat, daß $1 - \beta$ für das ganze Innere des Sternes eine Konstante wäre. Nach einigen Umformungen (vgl. dazu [88]) gelangt man schließlich zu den Gleichungen

$$L = \frac{4\pi c G (1 - \beta)}{k} M \quad (\text{IV})$$

$$\frac{1 - \beta}{\beta^4} = \text{const} \cdot M^2 \mu^4. \quad (\text{V})$$

Um von Gl. (IV) aus einen Vergleich zwischen berechneter und beobachteter Leuchtkraft L durchzuführen, muß man sowohl das Molekulargewicht als auch den Absorptionskoeffizienten kennen. Ersteres kann man in ziemlich engen Grenzen dadurch abschätzen, daß bei den hohen Temperaturen im Sterninnern eine nahezu vollständige Ionisation vorliegen wird, d. h. daß fast alle Elektronen abgesprengt sein werden. Ist A das Atomgewicht, N die Ordnungszahl eines Elements, so ist dann $A/N + 1$ für alle Elemente ungefähr $= 2$; ausgenommen sind jedoch Wasserstoff und Helium, für welche die Werte $1/2$ und $4/3$ gelten. Unter der anfänglich allgemein gemachten Annahme, daß der Wasserstoffgehalt des Sterninnern nicht wesentlich sei, kommt man so zu einem wahrscheinlichsten μ von etwa $2 \cdot 1 - 2 \cdot 3$; vgl. dazu [86], Kap. X. Heute aber erscheint die Berechtigung der Annahme eines vernachlässigbaren Wasserstoffgehaltes sehr fraglich, und die Ermittlung des wahrscheinlich merklichen Anteiles Wasserstoff muß aus verschiedenen Gründen als eines der Hauptprobleme der Astrophysik betrachtet werden. Eine beobachtungsmäßige Abschätzung des Wasserstoffgehaltes wäre an und für sich auf zweifache Art möglich, stößt aber auf große praktische Schwierigkeiten. Zunächst einmal führte

der Vergleich zwischen der aus Gl. (VIII) berechneten mit der beobachteten Leuchtkraft zu einem systematischen Unterschied um einen Faktor 10, woraus schon Eddington schließlich als einfachsten Ausweg die Annahme merklichen Wasserstoffgehaltes erkannte. Man kann aber allgemein aus dem Vergleich zwischen beobachteter und berechneter Leuchtkraft mit Sicherheit nur so viel sagen, daß der Wasserstoffgehalt mindestens $1/3$ sein wird, genauer nicht; vgl. [90]; und dann kommen noch die Schwierigkeiten bezüglich des Helium hinzu (S. 75). Die Abschätzung des Wasserstoffgehaltes aus der beobachteten Häufigkeit in den Sternatmosphären würde voraussetzen, daß die Zusammensetzung im Innern gleich derjenigen der Atmosphäre ist, was nicht ohne weiteres vorausgesetzt werden darf. Ist nun X dieser unbekannte Wasserstoffanteil, so findet man das effektive Molekulargewicht aus

$$\mu = \frac{2,2}{3x+1}. \quad (\text{VI})$$

Da heute, wie schon gesagt, mit einem Wasserstoffgehalt von mindestens $1/3$ zu rechnen ist, wird ein daraus aus Gl. (VI) folgender Wert $\mu \sim 1$ als der zur Zeit wahrscheinlichste angesehen.

Um nun noch die letzte erforderliche Größe, den Massenabsorptionskoeffizienten, zu bestimmen, hat Eddington [86] Kap. IX sehr eingehende Untersuchungen über den Absorptionsmechanismus im Sterninnern angestellt und kam so unter Zuhilfenahme der Kramerschen Absorptionstheorie für Röntgenstrahlung zu der Beziehung

$$k = \text{const} \cdot \frac{\rho}{\mu T^{3/2}}. \quad (\text{VII})$$

Führt man diesen Wert von k in Gl. (IV) ein, so erhält man schließlich die berühmt gewordene Masse — Leuchtkraftbeziehung

$$L = \text{const} \cdot M^{7/3} (1 - \beta)^{3/2} \mu^{4/3} T_e^{4/3}. \quad (\text{VIII})$$

wo T_e noch die effektive Temperatur bedeutet. Eddington hat diese Gleichung an 45 Sternen, deren Masse und Leuchtkraft hinreichend bekannt waren und die in einem ziemlich großen Bereich variierten, geprüft und, abgesehen von dem erwähnten Zahlenfaktor, eine gute Übereinstimmung gefunden.

In ganz analoger Weise erhält man auch die Mittelpunktswerte für Druck, Dichte und Temperatur (vgl. dazu [87] S. 10), von denen für uns vor allem die beiden letzteren noch wichtig sein werden.

$$\text{Es ist: } \rho_c = 77 \frac{M}{R^3} \text{ g/cm}^3, \quad (\text{IX})$$

$$T_c = 2 \cdot 10^7 \frac{\beta M \mu}{R} \text{ Grad}, \quad (\text{X})$$

wo M und R in Einheiten der Sonnenmasse bzw. = radius auszudrücken sind. Die Mittelpunktswichte ist demnach gleich dem 54fachen der mittleren Dichte; für die Mittelpunktstemperatur findet man für die Sonne also rund 20 Millionen Grad.

Sehr bemerkenswert ist nun, daß das Produkt $\frac{\beta M}{R}$ längs der Hauptreihe ungefähr konstant ist. Da man keinen Grund hat, anzunehmen, daß der chemische Aufbau längs der Hauptreihe stark variiert, kann man folgern, daß die Mittelpunktstemperatur auf dem Hauptast ungefähr konstant, d. h. also bei allen Sternen des Zwergastes rund 20 Millionen Grad ist. Bei den Riesen, bei denen bekanntlich R sehr groß ist, ist die Mittelpunktstemperatur sehr viel niedriger, z. B. bei der sehr genau bekannten Capella nur etwa 4–5 Millionen Grad.

Der weitere Ausbau der Theorie des Sternaufbaues setzte von verschiedenen Seiten her ein. Einerseits wurden wesentlich allgemeinere Modelle als das Eddingtonsche durchgearbeitet. So diskutierte Milne [91] neben anderen vor allem das für uns bedeutungsvolle sog. *Kernmodell*. Nach diesem Modell wäre ein Stern aufgebaut aus einem überdichten Kern sehr stark entarteter Materie, umgeben von einer ausgedehnten Atmosphäre. Die Existenz der weißen Zwerge könnte vielleicht als empirische Stütze dieser Auffassung gelten; diese würden sich dann von den normalen Sternen nur durch Fehlen einer Atmosphäre unterscheiden und könnten aus diesen irgendwie, vielleicht durch einen Novaausbruch, entstehen.

Vogt [88] hat dann gezeigt, daß man unter sehr viel allgemeineren Voraussetzungen, als sie dem Eddingtonschen Modell entsprechen, eine Masse–Leuchtkraftbeziehung ableiten kann. Unter der sehr allgemeinen Annahme, daß die Sterne homolog aufgebaut seien, d. h. daß die relative Dichteverteilung der Sterne die gleiche sei, gelangte er so zu den Gleichungen:

$$L = 4 \pi c G (1 - \beta) M \left[1 + \psi(\tau) \frac{\beta}{4 - 3\beta} \right] \quad (\text{IVa})$$

$$\frac{1 - \beta}{\beta^4} = \varphi(\tau) M^2 \mu^4. \quad (\text{Va})$$

Die hier auftretenden Funktionen $\psi(\tau)$ und $\varphi(\tau)$ sind Funktionen des normierten Abstandes vom Sternzentrum $\tau = \frac{r}{R}$ und haben für homolog aufgebaute Sterne den gleichen Wert. Für den von Eddington angenommenen Fall $k \cdot Q = \text{const}$ wird $\psi = 0$ und $\varphi = \text{const}$, so daß die Eddingtonschen Gleichungen eigentlich nur einen Spezialfall der allgemeineren Gleichungen (IVa) und (Va) darstellen.

Aus unseren Überlegungen können einige wichtige Folgerungen gezogen werden. Aus Gl. (V) oder Gl. (Va) ersieht man nämlich, daß mit zunehmender Masse der Strahlungsdruck prozentual immer mehr anwächst. So gibt Tabelle 3 für die Werte $\mu = 2.2$ bzw. $\mu = 1$ einige Werte.

Tabelle 3. Einige Werte von $1 - \beta$ für $\mu = 1$ bzw. 2.2 .

M/M_{\odot}	$1 - \beta$	
	$\mu = 1$	$\mu = 2.2$
$1/4$	0.000	0.004
$1/2$	0.001	0.017
1	0.003	0.057
8	0.11	0.45
16	0.19	0.58
64	0.54	0.77
100	0.78	1.00

Anfänglich machte man dieses Ansteigen von $1 - \beta$ dafür verantwortlich, daß Sterne großer Masse so selten vorkommen (S. 55), da, wie man glaubte, schon kleine Zusatzkräfte, z. B. durch Rotation oder Gezeitenwirkung, den Stern instabil machen würden. Nun kommt es jedoch (vgl. [87], S. 12) nicht darauf an, wie P zusammengesetzt ist, d. h. ob nun $1 - \beta$ oder β das Wesentliche ausmachen. Vielmehr haben die neueren Untersuchungen über Stabilität der Sterne ergeben, daß bei zunehmender Sternmasse der Bereich, innerhalb dessen die Abhängigkeit der Energiequellen von Temperatur und Dichte variieren kann, ohne einen Aufbau unmöglich zu machen, immer mehr eingeengt wird. Sterne großer Masse können daher im Verlaufe ihrer Entwicklung öfters hart an die Grenze der Instabilität kommen, was sich zunächst in Pulsationen äußern wird. Nun sahen wir aber auf S. 48, daß gerade bei Sternen großer Masse, d. h. auf dem Riesenast, periodische Veränderliche vorkommen, deren Lichtwechsel am wahrscheinlichsten durch Pulsationen erklärt werden kann; das völlige Fehlen solcher Pulsationen auf dem Zwergast, d. h. *die für uns besonders wichtige Feststellung auf S. 82, daß für die Sonne Pulsationsvariabilität nicht in Frage kommt, wird somit auch theoretisch stark gestützt.*

Zusammenfassend läßt sich über die Untersuchung spezieller Aufbaumöglichkeiten sagen, daß die Masse-Leuchtkraftbeziehung gegenüber verschiedenen Modellen, die wir uns vom Sternaufbau machen, relativ unempfindlich ist oder, wie wir schon auf S. 46 sahen, die wenigen unserer Beobachtung zugänglichen Integralwerte zu so weit ins einzelne gehenden Aussagen über das Sterninnere nicht ausreichen. Nun ist ohne weiteres ersichtlich, daß die Errechnung des physikalischen Zustandes des Stern-

innern eine wesentlich einfachere Sache wäre, wenn wir aus den Beobachtungen Aussagen über die *Dichtezunahme* im Innern machen könnten. Wie wir schon auf S. 46 sahen, ist dies bei besonders dazu geeigneten Bedeckungsveränderlichen möglich, und zwar auf Grund folgender Überlegung: durch die gegenseitige Anziehung der beiden Komponenten entsteht eine Abweichung von der Kugelgestalt, die sich, wie sich theoretisch zeigen läßt, in einer Drehung der Apsidenlinie äußern muß; dies um so stärker, je geringer die Dichtezunahme nach innen ist, da hier die Abweichung von der Kugelgestalt sich nicht nur in der äußeren Konfiguration, sondern auch in der Masse äußern muß. Wäre nun, wie bei dem erwähnten Modell von Milne, fast alle Masse in einem sehr dichten Kern vereinigt, so könnten die äußeren Schichten beliebige Formänderung erleiden; für die mechanische Wirkung der Apsidendrehung wäre das belanglos, umgekehrt bei homogener Dichteverteilung, wo der Effekt sein Maximum erreichen würde. Kennt man nun umgekehrt die Größe der Periode der Apsidendrehung, so kann man daraus Rückschlüsse auf die innere Dichtekonzentration ziehen, wie dies im Jahre 1928 Russell erstmalig an dem Algolstern *Y Cygni* versuchte. Diese Methode wurde seither von Walter und Kopal (vgl. die zusammenfassende Darstellung [92]) stark ausgebaut. Das Ergebnis war in allen Fällen eine *überraschend schwache Dichtekonzentration*, eine noch erheblich geringere als beim Eddington-Modell und erst recht natürlich als beim Kernmodell. Allerdings gehen in all diesen Untersuchungen Annahmen über die Art des Rotationsgesetzes (S. 63) ein, so daß die Ergebnisse dadurch an Beweiskraft einbüßen [93]. Die Annahme, daß wir es im Sterninneren mit Dichten von der Größenordnung $10-100 \text{ g/cm}^3$ und nicht 10^5-10^6 g/cm^3 zu tun haben, erfährt dadurch jedoch eine sehr starke Stütze; für uns von besonderer Wichtigkeit ist die daraus zu ziehende Schlußfolgerung, daß auch die Mittelpunktstemperaturen nur von der Größenordnung 10^7 und nicht 10^9-10^{10} Grad sind (S. 60).

Nun hatten wir schon an verschiedenen Stellen auf die maßgebende Rolle des Produktes $k \cdot Q$ für den Sternaufbau hingewiesen. Das sind beides Größen, zu deren Erforschung vor allem die Erkenntnisse der modernen Physik zu verwerthen sind. Was zunächst k betrifft, so wurden nach den Eddingtonschen Untersuchungen für den Fall des nicht entarteten Zustandes diese auch für den entarteten Zustand durchgeführt (vgl. [94]). Für uns ist die Tatsache von größter Wichtigkeit, daß bei einsetzender Entartung der Absorptionskoeffizient sehr schnell und sehr stark abnimmt, was wir auf S. 93 verwenden werden.

Was wir schließlich über Q allein auf Grund der Untersuchungen dieses Paragraphen sagen können, ist wenig. Denn die Masse-Leucht-

kraftbeziehung erweist sich gegenüber der in den verschiedenen Modellen zugrunde gelegten Verteilung der Energiequellen ziemlich unempfindlich; d. h. aus den unserer Beobachtung zugänglichen Integralwerten können wir darüber, wie und wo die Energie erzeugt wird, nichts Bestimmtes aussagen. Aber selbst bei genauer Kenntnis der Verteilung der Energiequellen könnten wir noch nichts über deren wahre Natur aussagen, da hierzu die Kenntnis der Zeiträume, während der die Energiequellen wirksam sein sollen, unerlässlich ist: eine Sonne aus reinem Radium würde heller leuchten als der hellste Riese, aber dies nur für ein paar Jahrtausende. Erst wenn wir also die Zeitspanne, während der die Sterne ihre Strahlung aufrecht erhalten, kennen, ist es möglich, die Natur der Energiequellen zu erforschen.

Wir können aber diesen Abschnitt nicht abschließen, ohne einer Einschränkung zu gedenken, die wir auf S. 56 machten: daß die Sterne, deren Aufbau wir untersuchen wollten, sich in Ruhe befinden sollten, d. h., daß sie ohne Rotation und keinen Gezeitenkräften unterworfen waren. Nun werden gerade diese Phänomene für uns in Kapitel III eine große Rolle spielen, und es ist daher wichtig, zu wissen, welche Einflüsse sie vor allem auf die Leuchtkraft eines Sternes haben können (vgl. [88] S. 570). Das Ergebnis, zunächst für Rotation, ist, daß unsere Gl. (IV a) noch mit einem Faktor $[1 - F(\omega)]$ (wo $F(\omega)$ eine Funktion von ω ist) multipliziert werden muß. $F(\omega)$ hängt ab von der Art des Rotationsgesetzes; für den naheliegenden, aber in der Natur kaum verwirklichten Fall gleichförmiger Rotation, d. h. für $\omega = \text{const}$, geht sie über in $F(\omega) = \frac{\omega^2}{2\pi G \rho}$, so daß also hier die Helligkeit mit zunehmender Rotation abnehmen würde (sog. Theorem von v. Zeipel). Nun werden wir aber, vor allem durch Berücksichtigung der Bremswirkung des im Inneren sehr intensiven Strahlungsstromes, der bei den hohen Temperaturen merkliche Masse besitzt und daher wie ein materieller Konvektionsstrom wirken muß, zu der Annahme geführt, daß die *Rotation im Innern schneller erfolgt* als in den äußeren Schichten (vgl. [95]). Die Zunahme wird, wie die Theorie ergibt, am wahrscheinlichsten so erfolgen, daß $\omega \cdot d = \text{const}$ iss, wo d den Abstand von der Rotationsachse bedeutet. Eine für unsere Probleme außerordentlich wichtige Schlußfolgerung daraus ist die, daß sich der größte Teil der Sonnenmasse in erheblich schnellerer Rotation befinden wird als die unserer Beobachtung zugänglichen oberflächennahen Schichten (vgl. S. 116).

Von großer Bedeutung ist ferner das Ergebnis, daß in rotierenden Sternen mehr oder weniger starke Konvektionsströmungen zu erwarten

sind. Die theoretischen Untersuchungen (vgl. dazu [150]) ergaben nämlich, daß ein rotierender Stern sich nur dann im vollkommenen inneren Gleichgewichtszustande befinden kann, wenn die Energieerzeugung ganz bestimmte Bedingungen erfüllt. Solchen Bedingungen wird jedoch die Energieerzeugung im allgemeinen nicht vollkommen genügen, d. h. der Stern wird sich nicht im inneren Gleichgewicht befinden, es müssen *Konvektionsströmungen* auftreten.

Für unsere Probleme hat die Existenz von Konvektionsströmen weitgehende Bedeutung. Zunächst einmal, wenn wir das Zusammenwirken von Rotation und Gezeitenkräften untersuchen, wie wir es bei den Doppelsternen in der Tat verwirklicht sehen. Die Gezeitenreibung der einen Komponente wird die Tendenz haben, die Konvektionsströmungen der anderen zu verstärken; sie wird dadurch lebhafteren Massenaustausch hervorrufen, was sich in einer *Helligkeitssteigerung* auswirken müßte. Tatsächlich kam Walter [96] durch eine sorgfältige Untersuchung an ausgewählten Bedeckungsveränderlichen zu dem Ergebnis, daß durch die Gezeitenwirkung erhebliche Helligkeitssteigerungen vorkommen; er findet, daß schon der relativ geringfügigen Deformation des Sternes $b/a = 0.97$ (b die kleinste, a die größte Halbachse des Sternes) eine Helligkeitssteigerung um eine Größenklasse (d. h. also um das 2.5fache) entspricht! Ein solches Ergebnis kann, falls es sich weiterhin bestätigen sollte, nicht ohne weitgehende Konsequenzen bleiben. Denn einerseits darf dann die gewöhnliche Annahme, daß die Ergebnisse an Doppelsternen ohne weiteres auf einzelne Sterne übertragen werden können, nicht mehr vorbehaltlos gemacht werden; andererseits muß man bedenken, daß der Lebenslauf der Doppelsterne von dem der einzelnen Sterne abweichen wird, da erstere ihren inneren Energievorrat (Abschnitt 6) erheblich rascher aufbrauchen werden.

Eine ganz andere und gerade für uns besonders wichtige Verbindung könnte sich von hier aus ergeben zu einem der interessantesten Probleme der modernen Naturwissenschaft, nämlich dem der Sonnenflecken bzw. des Sonnenfleckenzyklus. Die für eine Erklärung des Phänomens offenbar wesentlichen Beobachtungsergebnisse sind in der Hauptsache folgende:

1. Die Hauptperiode der Sonnenflecken stimmt sehr nahe mit der Umlaufzeit des Jupiter überein.

2. Die Beobachtungen am Phänomen selbst sprechen unbedingt gegen jegliche direkte äußere Beeinflussung. Denn vor allem das völlige Fehlen aufwärts gerichteter Strömungen im Fleck sowie der Nachweis der Existenz von Strahlungsgleichgewicht im Fleck sind mit der Annahme äußerer Beeinflussung (z. B. durch Meteoriten oder gar Eiskörper) nicht vereinbar.

3. Das Phänomen ist, wie geologische Untersuchungen (S. 33) ergaben, offenbar kein vorübergehendes, sondern ein dauerhaftes, mit dem wir während der ganzen Erdgeschichte zu rechnen haben.

Punkt 1 und 3 sprechen unbedingt zugunsten der Beeinflussung des Phänomens durch die Planeten, dagegen spricht aber Punkt 2. Auch das Fallenlassen der Annahme einer direkten Beeinflussung und die Zuhilfenahme von direkten Gezeitenwirkungen stieße auf die Schwierigkeit, wie denn diese minimalen Gezeiten der Planeten derart auffällige Phänomene auf der Sonnenoberfläche hervorrufen könnten. Die eben erwähnte Möglichkeit einer *indirekten* Einwirkung der Gezeitenreibung auf dem Umweg über eine Beeinflussung der Konvektionsströmungen im Sonneninnern hat mehr für sich. Der Sonnenfleckenzyklus könnte durch die Planeten erzwungen sein, aber dieser Zwang ist kein strenger Befehl, sondern mehr eine Anregung, welche die Sonne in sehr autonomer Weise berücksichtigen wird. Wenn schon eine so kleine Gasmasse, wie sie die Erdatmosphäre doch ist, gegenüber äußeren Einflüssen durchaus ihren eignen Willen kundtut, wie viel mehr wird man das von einer derart gewaltigen Gasmasse wie der Sonne erwarten dürfen! Das ist nicht zu vergessen bei der Beurteilung der Möglichkeit einer *Prognose* der Sonnenflecken — und, wenn wir an die weitverzweigten Beziehungen zu irdischen Geschehnissen denken (es sei nochmals auf die schönen Aufsätze [54] verwiesen), bis zu einem gewissen Grade auch des Menschheitsschicksales!

6. Alter, Energieerzeugung und Entwicklung der Sterne.

Die Ausführungen dieses Absatzes tragen einen in vieler Hinsicht stärker hypothetischen Charakter als die des vorhergehenden, denn bei aller Unsicherheit in den Beobachtungen hatten wir doch stets mehr oder weniger direkte Prüfungsmöglichkeiten an der Hand; es handelte sich nämlich hier um die Erforschung des augenblicklichen Zustandes, und nach dem, was wir in Absatz 1 über das Erdalter sahen, können auch jahrhundertelange Beobachtungen an der Tatsache dieses Augenblicksbildes nicht viel ändern.

Zuverlässige Aufschlüsse über die Größenordnung des kosmischen Zeitmaßes liefern uns die Daten des Absatzes 1. Daß unsere Sonne mindestens gleichen Alters wie die Erde, d. h. sicher nicht jünger ist, kann als Gewißheit gelten (S. 99), d. h. sie ist also mindestens 2–3 Milliarden Jahre alt, und die meist interstellaren, d. h. nicht dem Sonnensystem angehörenden Meteoriten bezeugen, daß nicht nur das Alter der Erde und Sonne, sondern das kosmischer Materie überhaupt, mindestens nach Jahrmilliarden bemessen werden muß. Aber das Erdalter liefert

nur eine *untere* Grenze für kosmische Zeitmaße, sagt hingegen noch nichts über eine *obere* Grenze aus. Wüßten wir etwas darüber, ob Sonne und Erde gleichaltrig sind, so hätten wir damit auch das Alter der Sonne, aber wir besitzen bis heute leider noch keine genügend gesicherte Theorie der Entstehung des Planetensystems (Kap. III), um einen so weittragenden Schluß zu ziehen. Schließlich könnte man, da uns ja die Spektralanalyse Aufschlüsse über die chemischen Elemente der Sonne gibt, versuchen, eine ähnliche Altersbestimmung wie in Absatz 1 für die Erde, auch für die Sonne durchzuführen. Unter der Annahme, daß auf der Sonne Uran nicht dauernd nachgebildet wird, hat St. Meyer [97] eine solche Altersbestimmung vorgetragen, die 5 Milliarden Jahre als Höchstalter der Sonne ergibt; aber ob diese Annahme wirklich zutrifft, wissen wir nicht; Uran könnte, wie wir noch sehen werden, durch Abbau noch höherer, stark radioaktiver Elemente, oder auch durch Aufbau von unten her, nachgeliefert werden.

Versuchen wir daher wenigstens die Frage zu beantworten, wie *alt denn ein selbstleuchtender Stern überhaupt werden kann*. Daß eine solche obere Grenze bestehen muß, folgern wir lediglich aus der Tatsache, daß die Sterne dauernd gewaltige Energiemengen in den Weltenraum ausstrahlen, für deren Deckung ein innerer Energievorrat sich schließlich erschöpfen muß. „Innerer“ Energievorrat soll heißen, daß von außen her kein Nachschub erfolgt, wobei nicht so sehr an die alte Robert Mayersche Meteoritenhypothese als vielmehr an ein mögliches Gleichgewicht zwischen Weltenraum- und Sternstrahlung zu denken wäre. Da diese Hypothese jedoch die an den Sternen beobachteten Tatsachen nur durch reichlich gekünstelte Zusatzannahmen verstehen ließe, hat sie bei den Astrophysikern keinen Anklang gefunden. Die zur Verfügung stehenden inneren Energiequellen können also in der Tat eine obere Grenze für das Sternalter liefern. Die größtmögliche Energiemenge ist nun nach den Erkenntnissen der modernen Physik nichts anderes als *die Masse selbst*, wenn diese nach der bekannten Äquivalenz zwischen Masse und Energie umgesetzt wird:

$$E = Mc^2. \quad (\text{XI})$$

Mit der Sonnenmasse $M = 2 \cdot 10^{33}$ g ergibt sich somit mit ihrer heutigen jährlichen Ausstrahlung von $1.2 \cdot 10^{41}$ erg eine mögliche obere Altersgrenze für die Sonne von 10^{13} Jahren. In diesen beiden Grenzen muß das Sonnenalter also liegen, d. h. es muß mindestens $2 \cdot 10^9$, kann höchstens 10^{13} Jahre betragen. Diese beiden Altersgrenzen ließen sich ohne nähere Annahmen über den Lebenslauf der Sterne geben. Dagegen kann eine

Aussage über das *relative* Alter, d. h. eine Beantwortung der Frage, ob z. B. die kleinen, oder die großen Sterne die älteren sind, oder ob gar alle Sterne gleichaltrig sind, erst nach Erforschung des Entwicklungsganges der Sterne gemacht werden. Nun lernten wir in Absatz 4 die Zustandsverteilung im Russell-Diagramm kennen, und es liegt die Annahme nahe, daß der *Lebensweg* eines Sternes durch die *Mittellinien der beiden Äste* oder wenigstens des Hauptastes, vorgezeichnet ist. Aber selbst wenn diese Annahme wirklich zutrifft, wissen wir noch nichts über die Richtung des Weges, d. h. nichts darüber, ob der Stern die Hauptreihe auf- oder abwärts durchläuft. Hierüber könnten wir Aussagen machen, wenn wir etwas über die Größe oder auch nur die häufigste Größe der Sterne bei deren Entstehung wüßten. Daß wir eine solche Entstehung eines Sternes aus diffuser Nebelmaterie bei den für unsere Zeitmaße in jedem Falle sehr langsamen Vorgängen nicht verfolgen können, selbst wenn sie dauernd im Kosmos vor sich gingen, liegt auf der Hand; man muß also versuchen, theoretisch etwas darüber abzuleiten. Jeans hat den Versuch gemacht, durch Untersuchungen über *Gravitationsinstabilitäten* die Bildung eines Sterns aus einem Nebel theoretisch zu erfassen [98] S. 350. Die Masse der aus dem Nebel entstehenden Sterne findet er zu

$$M = 1.3 \cdot 10^{11} v^3 \rho^{-1/2}, \quad (\text{XII})$$

wo v die mittlere Molekulargeschwindigkeit, ρ die Dichte ist. Wegen ρ brauchte man sich keine Sorge zu machen; man kann Anhaltspunkte dafür gewinnen, wenn man die im Milchstraßensystem in den Sternen zusammengeballte Materie gleichmäßig verteilt denkt, und erhält hier die Größenordnung $\rho \sim 10^{-23} \text{ g/cm}^3$; es kann auch eine Zehnerpotenz oder noch mehr größer sein wegen der eventuellen Expansion des Weltalls (S. 70), aber es beeinflußt die Rechnung nicht allzu stark; v hingegen geht mit der dritten Potenz ein, und unglücklicherweise haben wir dafür keine genaueren Anhaltspunkte; es dürfte schätzungsweise zwischen 10^4 bzw. 10^5 cm/sec liegen. Mit $\rho = 10^{-22} \text{ g/cm}^3$ und $v = 10^4$ bzw. 10^5 cm/sec erhalten wir $M \sim 10^{34}$ bzw. 10^{37} g , also *jedenfalls massigere Sterne als die Sonne*; doch sind, wie gesagt, diese Ergebnisse nicht streng gesichert. Hat sich unsere Hoffnung, bereits aus dem Anfangszustand etwas aussagen zu können, nicht voll erfüllt, so bleibt uns nur noch die Möglichkeit, den Weg selbst näher zu betrachten. Nun sahen wir ja schon auf S. 55, daß längs des Hauptastes des Russell-Diagramms die Masse abnimmt, d. h. also, ein Stern kann diesen nach aufwärts nur dann durchlaufen, wenn die Masse zunimmt, abwärts nur, wenn sie abnimmt. Die *vor* jeglicher Diskussion des Entwicklungsganges zu erledigende Frage ist also die, *ob*

überhaupt eine Möglichkeit von Massenänderungen bei Sternen besteht. Vom Standpunkt des Aktualismus müßte man sich dabei zunächst fragen, ob denn heute an den Sternen, in erster Linie natürlich der Sonne, Massenänderungen stattfinden. In der Tat: die auf die Sonne fallenden Meteore vergrößern ihre Masse dauernd, ebenso kosmische Gas- und Staubmassen, die sie durchschreitet (s. S. 9). Da aber die Erde in geologischer Zeit keinen nennenswerten kosmischen Massenzustrom erhalten hat, kann er auch auf der Sonne nicht wesentlich gewesen sein. Andererseits kennen wir auch direkte Massenverluste der Sonne; dauernd werden Atome durch Strahlungsdruck in den Weltenraum gestoßen und größere Massenverluste können bei den Protuberanzen auftreten. So plausibel dies auch rein qualitativ erscheinen mag, so kommt man doch selbst mit der oberen Grenze für die Dauer der Sternentwicklung keineswegs aus, da man, wie z. B. Eddington [86] S. 391 abschätzt, auf diese Weise erst in Zeiträumen von der Größenordnung 10^{17} – 10^{20} Jahren zu nennenswerten Massenänderungen kommt. Außerdem werden sich diese minimalen Verluste und Gewinne zum Teil kompensieren.

Massenverluste ganz anderer Größenordnung treffen wir hingegen beim Novaphänomen an (S. 49). Da nun eine Masse und folglich auch deren Änderung exakt nur bei Doppelsternen bestimmbar ist, wissen wir über die Größe des Massenverlustes nichts Genaues. Man ist hierbei auf spezielle Hypothesen angewiesen, um, wie z. B. in [99] näher ausgeführt, auf spektroskopischer Grundlage eine Massenabschätzung zu versuchen, die zur Größenordnung $10^{-6} M_{\odot}$ führte. Man muß dabei aber, wie Mc. Crea [100] ausführt, bedenken, daß nur der Druck der Absorptionslinien abgeschätzt werden kann, derjenige des Kontinuums hingegen, der jedenfalls wesentlich größer ist, nicht ohne näheres Eingehen auf spezielle atmosphärische Modelle angebbar ist. In der Tat wird die Annahme des geringen Massenverlustes meist damit begründet, daß in den äußersten Schichten eines Sternes nicht viel Masse enthalten sein könne; diese Annahme ist jedoch schon nach dem, was wir über die Dichtekonzentration sahen, durchaus nicht so selbstverständlich. Wir können vielleicht abschätzen, daß bei normalen Novae der Massenverlust von der Größenordnung 1‰ bis 1% der Sternmasse sein wird. Mit Sicherheit können wir daher nur sagen, daß unter der Voraussetzung *wiederholten Auftretens des Novaphänomen im Leben eines Sternes als massenreduzierender Faktor ausreichen kann.* Denn selbst, wenn dieses nur 10^{10} Jahre währte, würden bei einer Novaperiode von der Größenordnung $1\text{--}2 \cdot 10^8$ Jahre (S. 53) 50 bis 100 Ausbrüche jedenfalls eine merkliche Massenverminderung mit sich bringen. Wenn, so überzeugend das auch erscheint, trotzdem die Annahme,

daß das Novaphänomen diese massenreduzierende Rolle spielt, nicht die zu erwartende Zustimmung fand, dann in erster Linie auf Grund des angenommenen Fehlens von Anzeichen eines Novausbruches unserer Sonne in geologischer Zeit.

Es stünde dann nur noch die in Gl. (XI) gegebene Massenverminderung durch Umsatz von Masse in Energie zur Verfügung. In der Tat hat diese Annahme noch vor wenigen Jahren seitens der Astrophysiker viel Zustimmung gefunden, und doch gibt es kaum einen einzigen Punkt, der nicht angreifbar wäre. Zunächst trägt Gl. (XI) nur den Charakter einer Äquivalenz; ob diese praktisch in solchem Maße ausgewertet werden kann, wissen wir nicht. Ja, der Gedanke, daß Elektronen und Protonen sich gegenseitig vernichten könnten, hat seit der Entdeckung des Positrons im Jahre 1932 eigentlich keine Berechtigung mehr, da das Positron der wahre Partner des Elektrons ist, und nicht das 2000mal schwerere Proton. Aber selbst ungeachtet dieser Bedenken könnte im Sterninnern Massenvernichtung kaum stattfinden, denn es läßt sich leicht berechnen, daß die zur Massenvernichtung erforderliche Temperatur von der Größenordnung 10^{12} Grad sein müßte, was aus verschiedenen Gründen im Sterninnern unmöglich ist.

Zu diesen physikalischen Schwierigkeiten kommen aber noch astronomische hinzu, die mindestens ebenso beweiskräftig sind. Das Alter der Sonne ergäbe sich nach diesem Entwicklungsprozeß zu 10^{13} Jahren, das der roten Zwerge zu 10^{15} Jahren. Die geologische Zeit mit ihren 10^9 Jahren wäre, bemessen am Leben der Sonne, nur eine kurze Episode, gerade so viel wie eine Stunde im Leben des Menschen. Sind derartige Zeiträume aber wirklich annehmbar? Man hatte anfänglich geglaubt, diese Frage bejahen zu dürfen, und zwar glaubte man 1. in den verschiedenen Typen der Sternhaufen eine Altersfolge erblicken zu können, 2. die mit abnehmender Masse mehr und mehr dem Werte 1 sich nähernden Massenverhältnisse der Doppelsterne schienen für diese Entwicklung zu sprechen, 3. die behauptete Gleichverteilung der Bewegungsenergie der Sterne sowie schließlich 4. verschiedene Daten bei Doppelsternbahnen, das alles schien zunächst für jene Entwicklungshypothese mit ihren langen Zeiten, die man allgemein als „lange“ oder „große kosmogonische Zeitskala“ bezeichnet, zu plädieren. Aber sämtliche Argumente wurden als nicht stichhaltig erkannt. Gerade Argument 1., das der Sternhaufen, ist heute das schwerwiegende Argument *gegen* die lange Skala. Denn nicht nur die Sternhaufen selbst, sondern auch die zahlreichen Sternströme, d. h. Sterngruppen mit gemeinsamer Bewegungsrichtung, bezeugen, daß das Argument 3. überhaupt falsch ist, d. h. wir haben gar

keine Gleichverteilung der Bewegungsenergie. Unsere Beobachtungen haben nun ferner ergeben, daß das Milchstraßensystem rotiert; die Sonne braucht zu einem solchen Umlauf um das galaktische Zentrum etwas über 200 Millionen Jahre. Nun läßt sich aber zeigen, daß bei solchen Umläufen schon in 10^{10} – 10^{11} Jahren, geschweige denn in 10^{13} , jegliche Inhomogenitäten zugunsten einer völligen Ausgleichung aller Bewegungsunterschiede verschwunden wären. Wir kommen so zu dem unausweichlichen Resultat, daß in diesem Falle kein einziger Sternhaufen oder Sternstrom mehr existieren würde. Da sie nun aber in großer Zahl vorhanden sind, können wir mit Gewißheit schließen, daß das *Alter des Milchstraßensystems die Größenordnung 10, allerhöchstens 20 Milliarden Jahre nicht überschritten haben kann*. Schließlich lassen sich Argument 2. und 4. in zwangloser Weise aus der Berücksichtigung der bei den Beobachtungen gültigen Auswahleffekte ableiten (vgl. [101] S. 58).

Beobachtungen ganz anderer Art sprechen ebenfalls für ein geringeres Alter des Milchstraßensystems: die vielfach als sog. Expansion der Welt gedeutete *Rotverschiebung bei den Spiralnebeln* (zusammenfassende Darstellung darüber in [102]). Die Erkenntnisse der wahren Natur der Spiralnebel ist eigentlich erst jüngsten Datums; noch in den beiden ersten Jahrzehnten unseres Jahrhunderts sah man in ihnen nur Nebelgebilde, die, wie gelegentlich geschehen, als in Entwicklung begriffene Planetensysteme usw. angesehen wurden. Viele Phänomene, so insbesondere das Aufleuchten von Novae in ihnen, verhalfen der heute allgemein angenommenen *Weltinseltheorie* zum Siege, welche die Spiralnebel als unserem Milchstraßensystem vergleichbare Sternsysteme ansieht, deren Massen zwischen den Größenordnungen 10^9 und $10^{11} M_{\odot}$ liegen. Das Milchstraßensystem ist jedenfalls eines der größten dieser Sternsysteme. In diesen Systemen ist die ganze Masse des Universums konzentriert; die Zwischenräume sind praktisch leer, wie schon das Fehlen einer merklichen Absorption beweist. Die bei weitem rätselhafteste Beobachtungstatsache war nun der Nachweis einer proportional der Entfernung zunehmenden Rotverschiebung der Spektrallinien dieser Nebel. Wenn man, wie üblich, diese Rotverschiebung als Doppler-Effekt auffaßt, so ergeben sich proportional der Entfernung zunehmende Geschwindigkeiten, zahlenmäßig:

$$v = D/1790,$$

wo v die Geschwindigkeit in km und D die Entfernung in parsec ist; bis zu 40 000 km/sec entsprechende Rotverschiebungen sind beobachtet worden. Es erhebt sich bei derartigen Größenordnungen natürlich die Frage, ob die Rotverschiebungen in diesem Falle wirklich als Geschwindigkeiten

interpretiert werden dürfen. Diese Frage ist grundsätzlich aus Beobachtungen entscheidbar [102] S. 178ff., und es war interessant, daß der erfolgreichste Pionier dieses Gebietes, Hubble [103], durch diesbezügliche Beobachtungen zu dem Resultat kam, daß die Rotverschiebungen *nicht* als Wirkungen von Geschwindigkeiten interpretiert werden dürfen. Eddington [104] hat dann aber diesbezüglich gezeigt, daß die die Beobachtungen beeinflussenden Fehlerquellen noch zu groß sind, als daß dieses Resultat als definitiv angesehen werden könnte (vgl. [105]). Die letzte Entscheidung wird hier wohl erst der im Jahre 1941 betriebsfertige amerikanische 200-Zöller fällen können.

Obwohl hier nicht der Ort sein kann, auf die einzelnen mit, oder ohne Expansion arbeitenden Theorien näher einzugehen, sei doch so viel gesagt, daß sich vom theoretischen Standpunkt die Interpretation der Rotverschiebung als reeller Geschwindigkeit leichter verstehen ließe, als ohne die Annahme einer Ausdehnung auskommende Erklärungsversuche, die noch stärker hypothetisch sind (vgl. S. 77). Sieht man mit der Mehrzahl der Astrophysiker die Expansion als reell an, dann hätten sich in $1.3 \cdot 10^9$ Jahren alle Abstände gerade verdoppelt, seit 4 Milliarden Jahren verzehnfacht. Trotz aller Schwierigkeiten, die einer solchen Extrapolation auf so lange Zeitspannen notwendigerweise anhaften, hat man vielfach versucht, die Rotverschiebung mit der *Entstehung des Universums* in Verbindung zu bringen. Alle Materie, die heute in den Spiralnebeln zusammengeballt ist, wäre danach vor einigen Jahrmilliarden in einer ungeheuren Gasmasse angesammelt gewesen, deren Dichte den mehr als 1000fachen Betrag der heutigen Dichte des Universums gehabt hätte. Dieses anfängliche Universum sei irgendwie, vielleicht durch eine ungeheure Katastrophe (Explosion), in die heutigen Spiralnebel zerfallen. Aus einem dieser Nebel hätte sich das Milchstraßensystem entwickelt, und in diesem wieder die Sterne.

Versuchen wir, diese sehr verschiedene Gebiete berührenden Ausführungen zusammenzufassen, so kommen wir etwa zu folgendem Ergebnis: da Massenvernichtung weder physikalisch noch hinsichtlich der sehr langen Zeiträume ernstlich in Betracht kommt, andererseits die verschiedensten Befunde mehr oder weniger deutlich auf Zeiträume von der Größenordnung von 10^{10} Jahren für das Alter des Milchstraßensystems und der Sterne hinweisen, sind wir zu dem wichtigen Schluß berechtigt, *daß das Alter der Erde zweifellos einen merklichen Bruchteil des Alters auch der Sonne ausmacht*. Daran schließt sich aber sofort folgende Frage an: wenn Materievernichtung im Sterninnern nicht stattfindet, welches sind dann die Energiequellen bzw. reichen diese auch aus, um dem Stern eine Lebensdauer von der Größenordnung von 10^{10} Jahren zu ermöglichen.

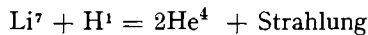
Von den älteren Versuchen hat nur noch die Zurückführung der Strahlungsenergie auf *Kontraktion* Bedeutung, wie es schon Helmholtz 1854 getan hatte. Das Ergebnis war, daß bei der Kontraktion einer Gaskugel von einem Zustand großer (theoretisch unendlicher) Ausdehnung zum Radius R die freiwerdende Arbeit A gegeben ist durch:

$$A = \alpha G \frac{M^2}{R}. \quad (\text{XIII})$$

Hierbei ist α ein Faktor, der vom Sternmodell abhängt, z. B. ist bei homogener Dichte $\alpha = 3/5$, beim Eddington-Modell (Gaskugel im Strahlungsgleichgewicht) $\alpha = 3/2$. Auf die Sonne angewandt, ergibt sich damit $A = 5.4 \cdot 10^{48}$ erg. Davon kommt aber nur ein Teil, im günstigsten Fall die Hälfte, zur Ausstrahlung, ein anderer wird zur Erhöhung der inneren Temperatur verwendet. Es kann also in diesem günstigsten Falle $2.7 \cdot 10^{48}$ erg zur Ausstrahlung gelangen, was bei einer jährlichen Ausstrahlung von $1.2 \cdot 10^{41}$ erg nur 23 Millionen Jahre ausgereicht hätte. Da man vor Anwendung der radioaktiven Methode das Erdalter ebenfalls zur Größenordnung von 10^7 – 10^8 Jahren annahm, wurde diese Energiequelle lange Zeit als ausreichend angesehen. Heute wird daraus hingegen gewöhnlich der Schluß gezogen, daß Kontraktionsenergie überhaupt nicht wesentlich in Frage käme. Wo nun aber bei Sternen Dichten von der Größenordnung 10^5 g/cm³ tatsächlich *beobachtet* wurden und wir keine unmittelbaren Belege gegen das Vorkommen solcher Dichten in den überdichten Kernen normaler Sterne haben, können wir größere, vielleicht 10–100mal größere, α -Werte ins Auge fassen, und es könnte in diesem Falle die Kontraktionsenergie auch für Zeiträume von der Größenordnung mehrerer 10^8 Jahre die Ausstrahlung decken. Wenn wir gar an die grundsätzliche Möglichkeit von Neutronenkernen mit Dichten von der Größenordnung 10^{12} g/cm³ denken, so könnte auch für Zeiträume von der Größenordnung 10^{10} – 10^{11} Jahren die Kontraktionsenergie die Ausstrahlung decken; allerdings müßte bekannt sein, ob eine solche Verdichtung kontinuierlich erfolgen kann, oder ob sie, wie z. B. Zwicky [106] annimmt, beim Übergang von einem normalen Stern in einen Neutronenstern ein Supernovaausbruch erfolgt. Wenn so nach etwaigem Versagen aller übrigen Möglichkeiten die Kontraktionsenergie als letzte Zuflucht bliebe, müssen wir doch nachsehen, ob nicht noch besser übersehbare, vor allem nachweisbar kontinuierlich wirksame Energiequellen existieren. Hier stehen uns grundsätzlich 2 ganz verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, 1. die Radioaktivität, 2. der Aufbau höherer Elemente aus niedern. Jede dieser beiden Annahmen hat Vorzüge und Nachteile. Wenden wir uns zunächst zur Radioaktivität, so läßt sich leicht feststellen, daß diese nicht ausreichen kann: ein Gramm Uran liefert

1·2 erg/sec, 1 Gramm Sonnenmasse hingegen 1·9 erg/sec. Selbst wenn die ganze Sonne aus Uran bestünde, könnte sie ihre heutige Strahlung nicht aufrechterhalten. Das käme höchstens für Sterne mit sehr kleiner Masse in Betracht, bei denen die Energieerzeugung pro Gramm und Sekunde nur Bruchteile eines erg ist; bei massigen Sternen jedoch, wo dieser Betrag die Größenordnung 100 erg und mehr erreicht, wäre die Diskrepanz noch viel größer als bei der Sonne. Nun wissen wir, daß radioaktive Elemente natürlich auch wesentlich stärker wirken können, dafür aber während viel geringerer Zeit. Man müßte also, wie dies z. B. Jeans sowie auch Nernst getan hat, bei den Sternen, speziell in deren Jugendstadien, seine Zuflucht zu hypothetischen stark radioaktiven Elementen *höherer Ordnungszahl als Uran* nehmen. Damit diese Elemente auch bei Riesen eine ausreichende Energiequelle darstellen, müssen wir wohl für sie die Energieerzeugung von der Größenordnung 100 erg pro Gramm und Sekunde annehmen.

Dagegen läßt sich der zweite Prozeß, der des Aufbaues von Elementen, dank der neueren Erkenntnisse vor allem auf dem Gebiet der Kernphysik besser übersehen, und, was für uns das Ausschlaggebende ist, er ist auch bedeutend ergiebiger. Die Grundlage ist einfach: wenn sich 4 Wasserstoffkerne vom Atomgewicht 1·008 zu einem Heliumkern vom Atomgewicht 4·00 zusammenschließen, so tritt ein Massendefekt auf, der nach Gl. (XII) als Energie ausgestrahlt werden könnte! Dieser Defekt beträgt 0·8 % der Masse, und falls kein anderer Energieerzeugungsprozeß wirksam wäre, würde also für 0·8 % der großen Zeitskala, d. h. für die Größenordnung 10^{11} Jahre, die Strahlungsenergie gedeckt sein, vorausgesetzt, daß ein reiner Wasserstoffstern in einen Heliumstern überführt würde. Was nun diesen Aufbauprozeß im einzelnen betrifft, so wird man in der Wirklichkeit nicht mit dem einfachen Zusammenschluß von 4 Wasserstoffkernen rechnen dürfen, vielmehr wird zuerst ein Aufbau von Lithium, das nach der Gleichung



wieder zerfällt, als wahrscheinlichste Form dieses Aufbaues betrachtet. Durch weitere Anlagerung von Neutronen könnten dann sukzessiv die schwereren und schwersten Kerne aufgebaut werden. Die hierbei noch freiwerdende Energie beträgt aber noch nicht 10 % der bei dem Heliumaufbau freiwerdenden. Nun stehen aber dieser sog. Aufbauhypothese eine ganze Reihe Schwierigkeiten gegenüber. Zwar reichen Temperaturen von der Größenordnung 10^7 Grad, wie wir sie im Innern der Sterne der Hauptreihe sicher annehmen dürfen, zur Einleitung des Aufbauprozesses gerade aus, aber andererseits weisen unsere physikalischen Kenntnisse mit Wahr-

scheinlichkeit darauf hin, daß der Aufbauprozeß sehr stark mit der Temperatur zunehmen müßte, während wir vom astronomischen Standpunkt aus Stabilitätsgründen zwar nicht gerade völlige Unabhängigkeit, aber doch nur eine sehr schwache Abhängigkeit zugeben können; auch müßte man annehmen, daß die Energieerzeugung kurzperiodischen Schwankungen von Temperatur und Dichte, wie sie z. B. bei Pulsationen auftreten, nicht folgen würde, da sonst der Stern seine Stabilität verlöre. Eine weitere Schwierigkeit ergäbe sich bei den roten Riesensternen, bei denen wir nur Zentraltemperaturen von der Größenordnung 10^6 Grad finden (S. 60) und hier also der Aufbauprozeß eben erst einsetzen sollte: im krassen Gegensatz dazu strahlen aber die roten Riesen ungeheure Energiemengen in den Weltenraum hinaus. Man wird dieser Schwierigkeit sowohl astronomisch wie auch physikalisch dadurch vielleicht am ehesten Herr, daß man, wie es auch einer der führenden Vertreter der Aufbauhypothese, Atkinson, in einer neueren Arbeit [107] tut, annimmt, den Riesen stünden andere, ergiebigere Energiequellen zur Verfügung, als welche die gerade besprochenen, hochradioaktiven Elemente vielleicht in Frage kämen.

Trotz dieser Schwierigkeiten hat die Aufbauhypothese solche Vorzüge, daß sie heute die Mehrzahl der Astrophysiker als ausbaufähigste Grundlage zur Erklärung der Energieerzeugung betrachten. Machen wir uns zunächst in der allgemeinsten Form ein Bild von der Entwicklung eines Sternes nach der Aufbauhypothese (vgl. dazu die erste Arbeit v. Weizsäckers [108]). Ein Stern entsteht irgendwann, z. B. bei oder kurz nach der Entstehung des Milchstraßensystems als roter Wasserstoffball und wird dann verhältnismäßig schnell durch Kontraktion an irgendeiner seiner Masse entsprechenden Stelle in die Hauptreihe einmünden. Dann wird durch Aufbau von Wasserstoff Helium erzeugt, das seinerseits wieder durch weitere Neutronenanlagerung höhere Elemente aufbaut. Es wird also erst einmal gebildetes Helium seinerseits den Aufbauprozeß fördern (Autokatalyse), so daß die Wasserstoffaufzehrung um so schneller erfolgt, je mehr Helium aus Wasserstoff gebildet wird. Eine sehr wichtige Folgerung für die Leuchtkraft ersehen wir sofort aus Gl. (V): da das Molekulargewicht zunehmen würde, müßte auch die Leuchtkraft eines Sternes dauernd zunehmen. Zahlenmäßig entspricht eine Größenklasse Leuchtkraftgewinn ungefähr 10 % Wasserstoffaufbau, so daß ein Stern, der 60 % Wasserstoff aufgebaut hätte, dann an einer etwa 3 Größenklassen tieferen Stelle auf dem Hauptast gestartet wäre. Wenn schließlich der gesamte Wasserstoffvorrat aufgezehrt ist, würden dem Stern weitere Energiequellen fehlen und der Übergang in einen Zustand kleinster Energieausstrahlung wäre hier denkbar, wengleich natürlich über die Art des Überganges,

z. B. ob durch allmähliche Kontraktion bei abnehmendem Wasserstoffgehalt, oder durch plötzlichen Zusammenbruch, der sich etwa in einem Novausbruch äußern könnte, noch keine Aussage gemacht ist. Somit könnte also ein direkter Weg von beliebigen Stellen des Hauptastes zu den weißen Zwergen führen.

So sehr plausibel dieser Gedankengang auch erscheinen mag, er ist, zumindest in dieser allgemeinen Fassung, zahlreichen weiteren Einwänden ausgesetzt, so daß Weizsäcker in seiner zweiten Arbeit [109] einen wesentlichen Teil seiner früheren Annahmen wieder zurückgezogen hat. Um das Hauptresultat vorwegzunehmen: der Kern der Aufbauhypothese, der Aufbau von Wasserstoff zu Helium als Hauptquelle der Sternenergie, bleibt; alles Weitere muß ganz oder z. T. gestrichen werden. Nehmen wir einmal an, die heutigen Sterne wären wirklich aus ursprünglich reinen Wasserstoffbällen zu ihrem jetzigen Zustand umgewandelt worden! Dann läßt sich abschätzen, welchen Prozentsatz das Helium, verglichen mit höheren Elementen, ausmachen müßte, und man findet einen außerordentlich hohen Heliumgehalt. B. Strömgren [111] hat zwar im Anschluß an Weizsäckers erste Arbeit versucht, ganz analog dem Vorgehen auf S. 59 einen solch hohen Heliumgehalt durch Vergleich zwischen beobachteter und berechneter Leuchtkraft zu prüfen, und findet auch keinen wesentlichen Widerspruch, womit natürlich der positive Nachweis noch nicht erbracht ist. Unverständlich muß aber, wie Weizsäcker feststellt, die Tatsache bleiben, daß in den Sternatmosphären bei weitem kein derart hoher Heliumgehalt nachweisbar ist und daß es ausgeschlossen ist, daß im Innern ein höherer Heliumgehalt als in den äußeren Schichten ist; ja, das gerade Gegenteil wäre eher zu erwarten. Noch bedenklicher aber ist, wie Weizsäcker findet, daß zum Aufbau der schwersten Elemente, vor allem von Uran und Thor, sehr hohe Temperaturen (er errechnet $2 \cdot 3 \cdot 10^{11}$ Grad), erforderlich wären. 10^{11} Grad sind aber im Sterninnern ebenso schwer vorstellbar wie 10^{12} (S. 69), womit sich die Aufbauhypothese als zum Aufbau der schwereren Elemente unzureichend erweist. Werden aber Uran und Thor nicht in der Sonne nachgebildet, bzw. sind diese selbst Zerfallsprodukte der hypothetischen höheren Elemente, die ja auf der Erde nicht mehr vorkommen, so kann die auf S. 66 erwähnte Meyersche Altersbestimmung als anwendbar gelten, der zufolge die Sonne nicht über 5 Milliarden Jahre alt ist. Fällt der Aufbau höherer Elemente über Helium fort, so haben wir auch keine Autokatalyse, d. h. auch keine Beschleunigung des Wasserstoffverbrauches bei wachsendem Heliumgehalt. Zu weiteren Bedenken veranlaßt uns der Umstand, daß wir sehr wahrscheinlich kein höheres Alter des Milchstraßensystems als 10^{10} Jahre anzunehmen

haben. Da nun die Zeit, um einen Wasserstoffstern zu höheren Elementen aufzubauen, $3 \cdot 10^{11}$ Jahre beträgt, so erkennen wir, daß der Kosmos wahrscheinlich noch zu jung ist, als daß mehr als ein sehr geringer Prozentsatz Wasserstoff aufgebaut wäre, und wir also die Sterne noch in praktisch derselben chemischen Zusammensetzung antreffen, die sie von Anfang an hatten. Für diese Fassung der Aufbauhypothese bedeutet die relativ geringe Heliummenge ebensowenig eine Schwierigkeit wie die relativ niedrigen Temperaturen von 10^7 Grad.

Ob und wie die höheren Elemente vor Entstehung der Sterne entstanden sind, kann heute nur ganz spekulativ beantwortet werden. Eines ist sicher: wenn man nicht zu immer höheren hypothetischen Elementen seine Zuflucht nehmen will — und das hilft ja letzten Endes auch nicht viel — muß man annehmen, daß Uran und Thor vor nicht mehr als etwa 10^{10} Jahren entstanden sind. Weizsäcker verfolgt nun folgenden Gedanken: wenn *jetzt* im Kosmos Temperaturen von 10^{11} Grad nicht vorkommen, so können sie *früher*, als der Kosmos noch jünger war, vielleicht einmal vorhanden gewesen sein. Möglicherweise war dies der Fall zu der Zeit, als die ganze Materie des Universums viel dichter zusammen war als heute, und diese Urmasse dann durch die infolge Einsetzens der Kernreaktionen freiwerdende Energie explodierte. Die zur Expansion des Universums notwendige Energie wäre demnach die beim Aufbau eines Teiles des ursprünglich allein vorhandenen Wasserstoffs freigewordene Kernenergie.

Versuchen wir also das gegenwärtige Bild der Astrophysik über die Entwicklung der Sterne zusammenzufassen: daß Sterne aus Nebelmaterie entstehen und uranfänglich rote Gasbälle sind, wird als allgemeiner Ausgangspunkt kaum umgehbar sein. Ob aber nur, wie man ursprünglich glaubte, Sterne oberhalb einer gewissen Masse, etwa $3.5 M_{\odot}$ entstehen können, muß heute, vor allem nach der Entdeckung der Unterriesen, bezweifelt werden. An einer seiner Masse und seiner chemischen Zusammensetzung entsprechenden Stelle mündet der Stern dann in die Hauptreihe ein, wo er lange Zeit mit konstanter bzw. bei der Aufbauhypothese zunächst zunehmender Helligkeit verharrt, um schließlich nach Erschöpfung der Energiequellen als weißer Zwerg zu enden. Man sieht, der ebenso schöne wie gewaltige Gedanke eines kosmischen Kreislaufes ist hier verschwunden zugunsten eines bloßen Ablaufs der Geschehnisse. Worin liegt nun der Kernpunkt dieses gewaltigen Umschwunges unserer Vorstellungen? Es liegt an nichts weiter als an dem Begriff der Veränderlichkeit der Sternmasse, die heute, bei der Unwahrscheinlichkeit wesentlichen Massenverlustes durch Strahlung, im allgemeinen als praktisch konstant angesehen wird.

Sicher ist dieses Bild keine ideale Lösung; ohne eine Reihe mehr oder weniger gekünstelter Annahmen kommt man nicht durch, und dann werden wir in Kap. III verschiedene Argumente zugunsten der Annahme eines wesentlichen Massenverlustes der Sonne aufzeigen. Die Frage ist also: ist nach Ablehnung des Novaphänomens (S. 68) wirklich keine andere Form des Massenverlustes als durch Strahlung annehmbar?

Einen zweifellos kühnen Versuch in dieser Richtung hat Nernst [110] gemacht. Seine Vorstellungen bezüglich Energieerzeugung sind in vieler Hinsicht den soeben vorgetragenen ähnlich; der Hauptunterschied ist nur der, daß Nernst in großzügigem Zusammenhange im Verlaufe der Entwicklung einen starken Massenschwund, der in der gleichen Zeit den mehr als 1000fachen Betrag des nach Gl. (XI) berechneten beträgt, postuliert. Dieser Massenschwund sei nichts anderes als eine Wechselwirkung zwischen Materie und jenem ungeheuren Energiereservoir, dem Nernst den Namen Nullpunktenergie beilegt. Die Sternmasse ginge, ohne zur Ausstrahlung verbraucht zu werden, in diese Nullpunktenergie über, aus der sich an anderen Stellen des Weltraums wieder Materie bilden würde, und zwar jene hochradioaktiven, energiereichen Ultrakorpuskeln, die, wie wir schon auf S. 72 sahen, den Energieverbrauch der Ausstrahlung zum mindesten in den Jugendstadien der Sterne zu decken imstande wären. Eine weitere Möglichkeit dieser Hypothese wäre eine ungezwungene Erklärung der Rotverschiebung der Spiralnebel ohne Zuhilfenahme jener gigantischen Geschwindigkeiten: denn auch die Strahlungsenergie des Universums altert, die Lichtwellen fließen langsam unter Energieabnahme in die Nullpunktenergie zurück, was sich in der Tat in einer mit der Entfernung zunehmenden Rotverschiebung äußern müßte. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß Nernsts Weltbild einen geschlossenen kosmischen Kreislauf ergibt und viele Schwierigkeiten zweifellos elegant löst. Und daß die Vorgänge z. T. ad hoc postuliert sind, kann nicht unmittelbar als Gegenbeweis vorgebracht werden — was heute noch hypothetisch erscheint, kann morgen schon selbstverständlich sein. Aber der Empiriker muß fragen: gibt es keine Beobachtungsbelege für, oder gegen diese Gedankengänge? In der Tat gibt es deren einige. Abermals können wir auf jene Sterne, denen der Astrophysiker so manches verdankt, die Bedeckungsveränderlichen, zurückgreifen. Unter diesen kennen wir verschiedene Systeme mit sehr großen Massensummen, wie z. B. β Lyrae und Y Cygni mit über 30 Sonnenmassen. Entsprechend dem zur Darstellung des Russell-Diagramms als Entwicklungsdiagramm empirisch erforderlichen Massenverlust:

$$\frac{dM}{dt} \sim M^3 \quad (\text{XIV})$$

muß auch der Massenschwund bei diesen sehr groß sein. Da, wenn M die Masse und a die große Halbachse der Bahn bedeuten, die Beziehung gilt:

$$M \cdot a = \text{const}, \quad (\text{XV})$$

so muß in unserem Falle die große Halbachse bzw. nach dem dritten Keplerschen Gesetz die Periode dauernd zunehmen. Um auszurechnen, wie groß diese Zunahme sein müsse, muß man in Gl. (XIV) noch eine kosmogonische Zeitskala einführen. Diese erhalten wir in ziemlich engen Grenzen dadurch, daß einerseits das Alter der Sonne mindestens 2 Milliarden Jahre betragen muß, andererseits die roten Zwerge mit $< \frac{1}{2} M_{\odot}$ nicht älter als 20 Milliarden Jahre sein dürfen, da man sonst mit der Struktur des Milchstraßensystems in Widerspruch gerät (S. 70). Beide Werte passen gerade zueinander, d. h. mit einem Alter der Sonne von mindestens 2 Milliarden Jahren kommt man für die roten Zwerge ungefähr zu 20 Milliarden. Für die Entwicklung bei den Riesen kommt man zu viel kleineren Werten, z. B. bei solchen von 50–5 Sonnenmassen zu nur 20 Millionen Jahren. Bei γ Cygni mit $17.6 + 17.4 M_{\odot}$ errechnet sich, daß die Periode in den rund 50 Jahren seit seiner Entdeckung um 2.5 Sekunden zugenommen hätte; in den 50 Jahren müßten daher die Minima eine Verspätung von ungefähr 2 Stunden zeigen. Sie zeigen nun zwar einen großen periodischen Term, der, wie schon auf S. 62 erklärt, durch die Abweichung der Sterne von der Kugelgestalt verursacht wird; von einer systematischen Verspätung wurde aber weder bei diesem noch bei anderen Bedeckungsveränderlichen etwas festgestellt.

Anders bei den Cepheiden. Hier hat man zwischen der Periode P und der Dichte ρ die Beziehung:

$$P\sqrt{\rho} = \text{const}$$

gefunden. Nimmt die Masse dieser durchwegs sehr massigen Sterne ab, so wäre auch eine Dichteänderung, sehr wahrscheinlich eine Dichtezunahme, zu erwarten und P müßte im Gegensatz zu vorhin abnehmen. Zwar läßt sich der zu erwartende Betrag nicht so exakt ausrechnen wie bei den Bedeckungsveränderlichen, aber die Größenordnung wäre mindestens dieselbe; es wurde aber bisher nichts Diesbezügliches, vor allem kein systematischer Effekt, in den Perioden der Cepheiden nachgewiesen.

Wieder anders im Sonnensystem. Zwar sollte zufolge dieser Hypothese auch die Sonne Masse verlieren, aber relativ langsam, z. B. 10000mal langsamer als γ Cygni. Mit unseren Daten errechnet sich, daß die große Halbachse der Erde jährlich um 30 m zunehmen müßte, was einer Zunahme der Länge des Jahres um $1/200$ sec entspräche. Daß dies aber nicht der

Fall ist, bezeugen insbesondere die Überlieferungen antiker Finsternisse, und wenn diese, wie z. B. die genau überlieferten babylonischen Finsternisse der Jahre 423 und 321 v. Chr., gerade bei Sonnenuntergang stattfanden, haben wir hier eine genaue Angabe der Tageszeit. Die rechnerische Nachprüfung hat diese Zeitpunkte glänzend bestätigt [112]. Träfe nun die Nernstsche Hypothese zu, so wäre vor über 2000 Jahren das Jahr 11 Sek. länger gewesen, und daraus errechnet sich eine systematische Verschiebung von über 3 Stunden gegenüber der Zurückrechnung mit konstanter Jahreslänge. Nun sind die Finsternisse von kurzer Dauer, und in diesen Fällen auf etwa 10 Minuten zeitlich sicher. Wenn man nun mit der konstanten Zeitrechnung zu völliger Übereinstimmung gelangt, so ist das ein Beweis, daß sich diese eben nicht oder zumindest lange nicht so stark geändert hat, wie diese Hypothese es fordert. Zusammenfassend läßt sich also sagen, daß die *Beobachtungen an verschiedenen Objekten einen merklichen kontinuierlichen Massenverlust in Zeiträumen von der Größenordnung von 10^9 Jahren nicht befürworten.*

Damit wären die heutzutage als einigermaßen diskussionsfähig betrachteten Auffassungen über den Lebenslauf der Sterne dargestellt. Der Leser wird wohl erkannt haben, daß auch in wesentlichen Punkten die Meinungen noch stark auseinandergehen; auf der anderen Seite haben wir aber wenigstens einen Hoffnungsschimmer, nämlich das ziemlich sichere Resultat, daß die durch Geologie und Paläoklimatologie einigermaßen erforschten Zeiträume der Erdgeschichte einen merklichen Bruchteil auch des Alters der Sonne ausmachen, und nicht nur eine kurze Episode in deren Leben, während der alles und nichts passiert sein kann. Diese Erkenntnis berechtigt uns zu stärkerem Vertrauen, von hier aus den Faden, den die Geologie allein nicht weiterspinnen konnte (S. 44), wieder aufzunehmen und von der anderen Seite her eine Verbindung zu suchen. Und sicher wird die Paläoklimatologie ihrerseits der Astrophysik die Auswahl erleichtern können. Sehen wir also einmal nach, wie die einzelnen Theorien des Lebensweges der Sterne sich in der paläoklimatischen Praxis ausmachen. Bei der auf S. 69 beschriebenen Massenerstrahlungshypothese müßte für den Zeitraum vom 10^9 Jahren die Sonnenstrahlung als konstant betrachtet werden, da in dieser Zeit nur 10^{-4} der gesamten Masse in Strahlung umgesetzt worden wäre.

Zu ganz und gar neuen Gesichtspunkten gelangen wir aber durch die Aufbauhypothese, derzufolge im Laufe der geologischen Zeit eine dauernde *Zunahme* der Leuchtkraft der Sonne stattgefunden hätte. Daß die Strahlung der Sonne immer mehr an Kraft verlöre, daß unsere gute Mutter Erde immer mehr erkaltet und daß schließlich der sprichwörtlich gewordene

Wärmetod das unabwendbare Schicksal des altersmüden Kosmos ist, das alles paßte nur zu harmonisch in eine „après nous le déluge-Stimmung“ vergangener Jahrzehnte hinein. Das Eindringen in die Welt des Atoms, der größte wissenschaftliche Erfolg aller Zeiten, hat hier deutlich vor Augen geführt, daß man in diesen Grenzfragen die Natur ganz andere Wege zu gehen imstande ist, als wir ihr glaubten vorwegnehmen zu müssen!

Es ist nun sehr begrüßenswert, daß Öpik in einer ausführlichen Darstellung der Aufbauhypothese auch nicht den Versuch vergessen hat, diese Hypothese an der Paläoklimatologie zu prüfen [113]. Nach Öpik begann die Sonne vor $3 \cdot 10^9$ Jahren ihren Lebensweg mit 40 % Wasserstoffgehalt. Von da bis jetzt seien 3% durch den Aufbauprozeß aufgezehrt. Diese Verminderung des Wasserstoffgehaltes hat die Sonnenstrahlung um einen Beitrag erhöht, dessen Wirkung auf die Erde Öpik zu 1 Grad Erhöhung der mittleren Erdtemperatur in 150 Millionen Jahren abschätzt. In $4 \cdot 10^9$ Jahren würde die Erdtemperatur so hoch sein, daß Leben nicht mehr existieren könne, und gar nach 10 Milliarden Jahren soll 600°C , also die Grenze der Rotglut, erreicht sein. Dann soll die Sonne in einen weißen Zwerg zusammenbrechen, und die minimale Strahlung soll nur ausreichen, die Erde auf -150°C zu halten. Dabei ist allerdings die Beschleunigung des Aufbauprozesses durch erst gebildetes Helium vorausgesetzt, was, wie wir auf S. 75 sahen, wahrscheinlich nicht der Fall sein wird. Diese Folgerungen werden dem Paläoklimatologen jedoch kaum einleuchten, bezeugen doch sämtliche Klimazeugen, daß eher alles andere als eine gleichmäßige Zunahme der Erdtemperatur angenommen werden darf; zum allermindesten wäre zur Erklärung der Eiszeiten noch eine Zusatzhypothese erforderlich. Öpik sieht diese Schwierigkeiten ein und glaubt sie zu beheben durch die Hypothese einer zeitweisen Expansion der äußeren Schichten der Sonne, wobei die zur Arbeitsleistung dieser Expansion erforderliche Energie der Strahlung entzogen worden wäre. Diese Annahme ist gewiß ad hoc konstruiert; aber auch die übrigen Teile der Erdgeschichte sprechen nicht zwingend für diesen Gang, denn wir haben keinen Grund, wie Öpik will, anzunehmen, daß es früher in einer gewissen Zeitspanne mehr Eiszeiten gegeben habe als heute, und die diluviale Eiszeit war, wie ihre weltweite Verbreitung bezeugt, kaum wesentlich geringeren Ausmaßes als die früheren. Andererseits muß man einwenden, daß der von Öpik angenommene Aufbau von 3% Wasserstoff wahrscheinlich noch zu groß ist, denn bei einer maximalen Zeitdauer von $3 \cdot 10^{11}$ Jahren kommen wir ohne Autokatalyse in $2 \cdot 10^9$ Jahren zu einem Aufbau von knapp 1%, so daß für die letzten 10^9 Jahre die mittlere Erdtemperatur nur um höchstens 3 Grad zugenommen hätte. Ferner ist stillschweigend vorausgesetzt, daß

eine Zunahme der Sonnenstrahlung eine entsprechende Erhöhung der Erdtemperatur mit sich bringt, was durchaus nicht so selbstverständlich ist (S. 42). Sobald es sich aber um eine innerhalb langer Zeiträume gleichmäßige Zunahme der Strahlungsintensität und nicht etwa um eine Erhöhung der solaren Aktivität mit anderweitiger Beeinflussung der Erdatmosphäre handelt, wird das wohl zutreffen. Alles in allem genommen darf man wohl sagen, daß die Aufbauhypothese zwar der Paläoklimatologie nicht völlig widerspricht, ihr aber andererseits auch nicht viel zu geben vermag.

Das Gegenteil ergäbe sich bei der Nernstschen Hypothese. Bis zu einem gewissen Grade wäre hier eine Ähnlichkeit mit einer älteren, schon von Dubois [114] vorgetragene solaren Hypothese vorhanden, derzufolge, kurz gesagt, die Klimate der geologischen Vorzeit nichts anderes als ein Abbild des Lebensweges der Sonne vom weißen zum roten Fixstern wären, nur daß der Helligkeitsabfall bei Nernst nicht so schnell erfolgte. Für die Sonne, die heute ein G_2 -Zwerg ist, errechnet sich bei seiner Hypothese für das Algonkium etwa ein F_6 -Zwerg mit nahezu der doppelten Strahlung wie heute. Daraus errechnet sich nach dem Stefanschen Gesetz eine um etwa 40°C höhere Erdtemperatur, was bei Berücksichtigung einer bei solcher Strahlung erheblich verstärkten atmosphärischen Zirkulation wohl weniger wäre, aber immer noch bei weitem zu viel, um die ausgedehnten algonkischen Vergletscherungen ohne Zusatzhypothese verstehen zu können; und dann wäre die Sonnenmasse um etwa 20% größer gewesen, woraus sich nach Gl. (XV) und dem Stefanschen Gesetz eine weitere Temperaturzunahme von allermindestens 10°C errechnet. Eines ist in allen drei Fällen sicher: das wirkliche Klima ergibt sich aus ihnen nur durch reichlich gekünstelte Zusatzannahmen, durch die man, je nach Belieben, entweder die Eiszeiten, oder aber die eisfreien Perioden zusätzlich erklären müßte. Und eines erkennen wir immer klarer: das Gesamtbild, das uns die Paläoklimatologie entwirft, spricht überhaupt gegen jede einseitig gerichtete kontinuierliche Entwicklung; bei der Nernstschen Hypothese kommen wir mit den älteren, bei der Aufbauhypothese mit der diluvialen Eiszeit schwer zurecht. Aber selbst dann, wenn man die Eiszeiten als irgendwie zu erklärende Ausnahmereischeinungen betrachtet, die sich dem angenommenen Entwicklungsgang überlagert hätten, so sprechen die zwischen den Eiszeiten liegenden Perioden, also speziell Trias-Tertiär, nicht zugunsten stärkerer systematischer Strahlungsänderungen. Sowohl im Lias wie auch als speziell in der oberen Kreide treffen wir zeitweise Temperaturerniedrigung an; ob aber das Alttertiär wärmer oder kälter war als die Trias, ist schwer zu entscheiden. Ein Lebenslauf der Sonne, wie ihn der Paläoklimatologe sich wünscht, müßte ganz anders aussehen. Der

Verlauf der Sonnenstrahlung scheint mit den paläoklimatologischen Ergebnissen nur dann befriedigend zu harmonieren, wenn wir nach verhältnismäßig langen Zeiträumen praktisch konstanter, eventuell verglichen mit heute etwas intensiverer Strahlung, zu gewissen Zeiten, die sich in der Größenordnung nach gleichen Zeiträumen wiederholen, eine veränderte, irgendwie gestörte Sonnentätigkeit annehmen. Nach dem Charakter der Feinstruktur der Eiszeiten wird sich der Paläoklimatologe aber auch hier nicht mit einer bloßen Strahlungsverminderung zufrieden geben können; es würde vielmehr eine unruhigere, wenn auch im Mittel nicht notwendig schwächere, Sonnenstrahlung eher befriedigen.

So weit waren wir aber bereits am Schluß des Absatzes 3 und hatten, um der Gefahr zu entgehen, ad hoc konstruierte Hypothesen mit wirklichen Erklärungen zu verwechseln, uns an die Kosmogonie gewandt, in der Hoffnung, von ihr einen passenden Lebenslauf der Sonne vorgelegt zu bekommen. Da die zur Auswahl vorgelegten Lebensläufe aber nicht restlos befriedigten, müssen wir nun unsere Frage schärfer präzisieren: kann die Kosmogonie anderweitige, sagen wir ganz vorsichtig, gelegentliche Störungen einer im allgemeinen gleichmäßigen Sonnentätigkeit irgendwie plausibel machen? Wir wollen uns daher die Frage vorlegen, ob an anderen, unserer Sonne ähnlichen Fixsternen Phänomene beobachtbar sind, die, falls sie einmal bei der Sonne eintreten, zu Eiszeiten führen könnten. Eine Feststellung dürfen wir aber treffen: ob wir mit der Aufbauhypothese, mit der von Nernst oder irgendeiner anderen rechnen, in der uns interessierenden Jahrmilliarde hat die Sonne bestimmt immer auf dem Zwergast gestanden, ja nach allem, was wir heute wissen, sicher innerhalb ± 1 Größenklasse von ihrem jetzigen Standort. Nur Phänomene also, die sich auch auf dem Hauptast vorfinden, können für uns in Betracht kommen. Nun sahen wir aber auf S. 53, daß auf dem Zwergast nur das allgemeine Novaphänomen, von den Novae bis zur Veränderlichkeit der Typen *U Gem.*-*Z Camel.* vorkommt; die Pulsationsveränderlichkeit kommt für die Sonne nicht in Betracht. Die Frage ist nun: könnte eines dieser Phänomene bei der Sonne jemals eintreten und welches wären die mutmaßlichen Konsequenzen? Was die *U Gem.*-Veränderlichkeit anbelangt, so glaubte man zumeist, es handle sich um ein sehr seltenes Phänomen, was aber, wie schon auf S. 48 gesagt, durchaus unbewiesen, ja, angesichts der zunehmenden Entdeckungen solcher Veränderlicher nicht einmal wahrscheinlich ist. Die weitere und für uns besonders wichtige Frage ist nun die, ob die Sterne, die eine solche Veränderlichkeit zeigen, während ihres ganzen Lebensweges mit ihr behaftet sind, oder ob sie nur gelegentlich davon betroffen werden. Eine definitive Antwort können wir heute hierauf noch

nicht geben, sind es doch noch nicht einmal 100 Jahre her, daß *U Gem.* entdeckt wurde. Vom theoretischen Standpunkt aus würden die Schwierigkeiten einer Erklärung größer, wenn wir eine dauernde Behaftung einzelner Sterne mit dieser Variabilität annehmen wollten; es ist hier viel eher plausibel, daß eine mehr oder weniger große Anzahl gelegentlich für kürzere oder längere Zeit durch ein solches Stadium hindurchgeht. So viel ist jedenfalls sicher: der Annahme, daß auch die Sonne im Laufe ihres Lebensweges gelegentlich eine solche Variabilität zeigte, stehen vom astrophysikalischen Standpunkt aus keine Schwierigkeiten entgegen. Welches wären nun etwa die klimatologischen Konsequenzen? Diese Frage habe ich bereits in anderem Zusammenhang kurz gestreift [17], und es ergab sich zweifellos eine starke Klimaverschlechterung. Sehen wir uns also hier den Vorgang einmal näher an. Da die Beobachtungen eine sehr geringe absolute Helligkeit im Minimum ergaben, dürften wir bei diesem Zustand der Sonne natürlich nicht ohne weiteres die jetzige absolute Helligkeit $+ 5^m$ als Helligkeit im Minimum ansehen, viel eher als mittlere Helligkeit. Nehmen wir eine Schwankung von 3–4 Größenklassen an, so ergibt sich dann etwa $+ 7^m$ als Minimalhelligkeit, was übrigens gerade in der Mitte zwischen *SS Cygni* und *U Gem.* liegt (S. 48). Um die terrestrischen Folgen eines solchen Variabilitätsstadiums abzuschätzen, müssen wir wissen, wie oft pro Jahr ein solches Aufleuchten von etwa 3–4 Größenklassen Amplitude erfolgen würde. Als Mittel aus 7 derartigen länger bekannten Veränderlichen nehme ich ein Intervall von 45 Tagen an, was auch aus der statistischen Beziehung auf S. 52 für eine solche Amplitude folgen würde. Wir hätten also mit etwa 8 Aufleuchten jährlich zu rechnen. Zweifellos wären die meteorologischen Folgen eines solchen Aufleuchtens im Sommer ganz anders als im Winter. Viermal im Sommerhalbjahr würde die Sonne von einer Helligkeit, die leicht unregelmäßig schwankend nur etwa $\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{5}$ der jetzigen betrüge, zu dem 3–5fachen ihrer jetzigen Helligkeit innerhalb 2–3 Tagen aufleuchten. Es ist selbstverständlich, daß so bei jedem Aufleuchten anfänglich eine starke Temperaturdifferenz zwischen Wasser und Land entstände, der regelmäßig ein Einbruch feuchtkühler Meeresluft in die erhitzte Luft über dem Lande folgen würde, was aber, wie stets bei derartigen Kälterückfällen, eine sehr starke Vermehrung der Niederschläge mit sich brächte. Im Winter hingegen, wo eine stärker negative Temperaturdifferenz zwischen Land und Meer besteht, müßte die Niederschlagsvermehrung nicht notwendig der des Sommers gleichkommen. Wie wir aber auf S. 43 sahen, ist gerade die sommerliche Niederschlagsvermehrung bzw. Abkühlung die Grundbedingung zu Gletschervorstößen. Dies in höheren Breiten! Die Folge in tropischen Gebieten wäre wahrschein-

lich eine allgemeine Temperaturniedrigung, da hier die intensive Einstrahlung zu den Maxima in hohem Maße durch die Schutzwirkung der Atmosphäre abgebremst würde. Hinzu kommt noch eine Wirkung, deren Betrag zwar nur schwer abschätzbar ist, über deren Charakter aber kein Zweifel bestehen kann: die materielle Einwirkung. Denn, wie schon auf S. 51 gesagt, haben wir es bei diesem Phänomen mit einer novaartigen Expansion im kleinen zu tun, bei der, sei es durch die allgemeine Expansion, sei es durch entsprechende solare Aktivität, jedesmal merkliche Mengen solarer Materie abgestoßen und dadurch z. T. in die Erdatmosphäre eindringen würden. Hier würden sie eine erhebliche Vermehrung der Kondensationskerne und somit ihrerseits eine weitere Niederschlagsvermehrung bewirken. Man wird also Zeiten von der Größenordnung von 10^3 – 10^4 Jahre als voll ausreichend ansehen dürfen, um einen großen Eisvorstoß zu erzeugen. Nehmen wir, entsprechend den 4–6 Hauptvorstößen einer Eiszeitperiode, ein jeweiliges Eintreten des oben beschriebenen Variabilitätsstadiums an, so kommen wir bei jedesmal 10^3 – 10^4 Jahren zu einer Größenordnung für die die Eiszeit erzeugenden Zeiten ähnlich der bei der astronomischen Theorie (S. 37). Es kann wohl kein Zweifel darüber bestehen, daß dieses Variabilitätsstadium unverhältnismäßig schnellere Gletschervorstöße verursachen könnte als eine zudem noch ganz allmählich einsetzende Unterschreitung eines gewissen Wertes der Sommerwärme. Obwohl die permokarbene Eiszeit viel länger war, finden wir auch bei ihr nicht mehr als 6 Hauptvorstöße, so daß auch hier ein Variabilitätsstadium von insgesamt 50 000 Jahren, nur mit entsprechend größeren Intervallen, ausreichen dürfte.

Das Resultat wäre also eine in verschiedener Hinsicht sehr befriedigende Erklärungsmöglichkeit der Eiszeiten im Verein mit unseren heutigen Vorstellungen von Veränderlichen. Kritisch betrachtet ließen sich in der Tat weder gegen die Annahme der Variabilität selbst noch gegen die daraus folgende Klimaverschlechterung auf der Erde wesentliche Einwände vorbringen, wobei jedoch nicht übersehen werden darf, daß das mindestens vorläufig unbeweisbare Postulat eines mehrmals wiederholten Einsetzens des Variabilitätsstadiums erforderlich ist. Aber, vielleicht abgesehen von der astronomischen Theorie, werden fast alle Eiszeithypothesen gerade von einem diesem ähnlichen Einwand getroffen.

Die andere Form von Variabilität auf dem Zwergstern, das typische Nova-Phänomen, hat insbesondere für kosmogonische Probleme insofern einen Vorteil, als hier, wie auf S. 68 besprochen, mehr oder weniger große Massenverluste direkt beobachtet werden. Wir haben ja schon gesehen und werden neue Argumente dafür in Kap. III finden, daß die Möglichkeit wesentlichen

Massenverlustes manche Probleme in ein neues Licht rücken würde. Wie erinnerlich, mußten wir ja den Massenverlust durch Strahlung nicht wegen des Massenverlustes als solchem, sondern in erster Linie wegen der zu langen Zeiträume ablehnen. Die von Nernst postulierte kontinuierliche Massenabnahme vertrug sich wieder nicht mit verschiedenen Daten an Veränderlichen und im Sonnensystem. Es bleibt also nur noch ein einziger Ausweg: die Annahme einer *diskontinuierlichen Massenreduktion*. Diese Annahme brauchen wir aber nicht ad hoc zu postulieren, sie wird uns vielmehr von der Natur im Novaphänomen direkt vor Augen geführt. Daß trotzdem dem Novaphänomen nicht allgemein diese Rolle zugeschrieben wurde, liegt im wesentlichen daran, daß man seit der Existenz einer Lebewelt auf Erden ein Novaaufleuchten der Sonne nicht glaubte annehmen zu dürfen. Nun existiert eine Lebewelt auf dem Land, für die sich ein solcher Ausbruch ganz besonders katastrophal auswirken müßte, seit der Silurzeit, so daß angesichts des Fehlens einer Unterbrechung in der Entwicklung der Lebewelt mindestens seit dieser Zeit, also seit $4 \cdot 10^8$ Jahren, ein Novaausbruch der Sonne ausgeschlossen wäre. Wie wir aber auf S. 53 sahen, führt die Abschätzung der Novaperiode zu kleineren Werten, so daß an der Art des Auftretens des Novaphänomens in dieser Form, d. h. eines jeweils einmaligen, gezweifelt werden mußte. Da man nun bei Sternen, wie *T Pyxidis*, mehrere novaähnliche Aufleuchten hintereinander beobachtet hat, so brächte die Annahme, daß auch bei den typischen Novae die Aufleuchten sich wiederholen, nichts Ungewöhnliches mit sich. Wie wir sahen, ergäbe sich aus der Gleichung auf S. 52 hierfür die Größenordnung 10^2 – 10^3 Jahre. Macht nun ein Stern zu einem gewissen Zeitpunkt eine Reihe derartiger Aufleuchten durch, so wird seine Masse stark abnehmen müssen. In kosmogonisch gesprochen sehr kurzer Zeit könnten so starke Massenverluste eintreten, die, wie wir aus Gl. (IV) ersehen, die Helligkeit merklich reduzieren müßten. Verschiedene, allen kosmogonischen Theorien Schwierigkeiten bereitende Phänomene könnten so eine mögliche Erklärung finden. Denn die Tatsache, daß in Sternhaufen neben den Riesen auch Sterne geringerer Leuchtkraft vorkommen, sowie die, daß wir bei einer relativ großen Zahl von Doppelsternen sehr verschiedene Komponenten vorfinden, bereiten jeder Hypothese mit kontinuierlichem Massenverlust Schwierigkeiten. Ferner würde die auf S. 54 erwähnte Feinstruktur des Russell-Diagramms, die deutlich Gegenden mehr oder weniger dichter Besetzung aufweist, hiermit gut erklärbar sein.

Die zweifellos radikalere Lösung wäre die, daß, entgegen üblicher Auffassung, das Novaphänomen doch mit der Geologie vereinbar sei. In diesem Falle müßten Schutzwirkungen glaubhaft gemacht werden, die der

Lebewelt das Überdauern einer solchen Katastrophe ermöglicht hätten. Diese Schutzwirkungen könnten kaum anderswo als in dem Verhalten der Erdatmosphäre gesucht werden. Rechnet man aber, wie Jung [115] in seiner Kritik näher ausführt, mit einem nicht einmal übermäßig großen Aufleuchten von nur 10 Größenklassen, so erhält man zur Zeit des Maximums eine Zustrahlung der Sonne von im Mittel über die ganze Erde $= 5000 \text{ cal/cm}^2$. Nun erfordert bekanntlich die Verdampfung eines cm^3 Wasser von 15°C , wie die Ausgangstemperatur anzusetzen ist, $529 + 85 \text{ cal}$, und es müßten somit über jedem cm^2 minutlich 8 cm^3 Wasser als Dampf in die Atmosphäre transportiert werden. Schon nach einem Tage würde das zu einem Luftdruck von 11 Atmosphären und einer Mindesttemperatur von 150°C führen. Daraus folgt selbstverständlich, daß seit Bestehen des Lebens auf Erden die Sonne keine Nova gewesen sein kann. Hierbei werden jedoch folgende beiden Tatsachen übersehen: 1. Es ist nicht ohne weiteres zulässig, die an der *Grenze der Erdatmosphäre* eintreffende Strahlung zur Berechnung der Verhältnisse an der *Erdoberfläche* einzusetzen! Denn eine bei dem solaren Anstieg einsetzende Erwärmung des Landes wird zu rasch aufsteigender Luftbewegung und Kondensation des Wasserdampfes zu Wolken Anlaß geben. Hiergegen könnte eingewandt werden, daß bei so starker Einstrahlung Wolkenbildung sich gar nicht einstellen würde bzw. einmal gebildete Wolken sofort wieder aufgelöst würden. Ist aber die Temperatur an der Erdoberfläche höher als heute, so wird sich dies lediglich in einer Expansion der Troposphäre äußern, die ja auch heute am Äquator wesentlich höher reicht wie an den Polen. Wirkt also die entsprechend stärkere Wolkendecke einerseits strahlungsabschirmend, so reflektiert sie andererseits einen wesentlichen Teil der Strahlung; nach den Messungen über die Albedo der Wolken hat man 70–80% für den zurückgestrahlten Betrag anzusetzen. Damit soll freilich nicht behauptet werden, daß die Erdoberfläche sich auf die Dauer gegen eine solche Einstrahlung auf Temperaturen merklich unter 100°C , wie es die Erhaltung der Lebewelt erfordert, halten könne. Ins Auge zu fassen ist lediglich die Möglichkeit, daß infolge des stark verzögerten Temperaturanstiegs die verhältnismäßig kurze strahlungsstarke Zeit von einigen Tagen bis Wochen Dauer, wie wir sie bei den Novae antreffen, in einer für die Lebewelt erträglichen Grenze überstanden werden könnte. Auf die mögliche Schutzwirkung einer ausgedehnten Wolkenschicht hat bereits 1933 Zinner [116] hingewiesen. Zu dieser Schutzwirkung hinzu kommt noch 2. die Schutzwirkung des Novanebels. Unter der allgemeinen Annahme kugelsymmetrischer Abstoßung (vgl. dazu auch S. 115) läßt sich die von diesem Nebel mit der Erde zusammentreffende Masse ausrechnen. Unter

der Annahme eines Massenverlustes der Sonne von der Größenordnung 10^{-10} – 10^{-9} % (S. 68) ergibt sich, daß eine Masse Nebel von ungefähr 10–100 % der Masse der Erdatmosphäre mit dieser zusammentrifft und dies gerade in den Tagen um das Novamaximum. Denn mit den bei den Novae beobachteten Expansionsgeschwindigkeiten von im Mittel 1000 km/sec findet man, daß der Nebel in knapp zwei Tagen nach dem Ausbruch bei der Erde einträte. Nun dauert die Zeit vom Ausbruch bis zum Maximum im allgemeinen einige 3–5 Tage, so daß die Schutzwirkung des Nebels noch vor dem Maximum einsetzt. Der Nebel besteht nun in der Hauptsache aus Wasserstoff, der in den äußeren Schichten der Sonne dominiert und der sich, in die Erdatmosphäre hineingetrieben, mit dem Sauerstoff zu Wasserdampf verbinden wird, dessen Kondensation zu Wolken durch die als Kondensationskerne wirkenden restlichen Elemente des Nebels beschleunigt wird. Demnach dürfen wir wohl sagen, daß dank dieser Schutzwirkungen das Novaphänomen bei seinem etwaigen Auftreten in geologischer Zeit den Fortbestand der Lebewelt nicht in Frage zu stellen brauchte. Nun trägt jedoch diese Fragestellung so lange den Charakter einer mehr oder weniger interessanten Diskussion, als man nicht dazu übergeht, dem Novaphänomen einen bestimmten Platz in der Erdgeschichte zuzuweisen. Einen solchen Versuch habe ich im Jahre 1937 gemacht [117]. Ich gelangte zu ihm nicht etwa durch den Gedanken, das Novaphänomen irgendwie in der Erdgeschichte unterzubringen, sondern gerade von der entgegengesetzten Seite her, nämlich von Simpsons Eiszeittheorie (S. 42). Auf der einen Seite erschien mir der Gedanke solarer Anregung sehr aussichtsreich, auf der anderen Seite aber hielt ich es für lohnend, angesichts der guten empirischen Erfolge der astronomischen Theorie nach Ereignissen zu suchen, die eine Vereinigung der Auswirkungen der astronomischen Elemente mit der kosmischen Hauptursache ermöglichen. Es zeigte sich, daß das Novaphänomen hierzu besonders gut geeignet ist. Die besonderen Erklärungsmöglichkeiten dieser Hypothese sind kurz folgende:

1. Die Novaperiode von $1-2 \cdot 10^8$ Jahren stimmt in der Größenordnung gut mit der Eiszeitperiode überein. Das Auftreten von 4 großen Eiszeiten in der Erdgeschichte ergibt sich also bei dieser Kombination in zwangloser Weise.

2. Es besteht die Möglichkeit einer Vereinigung der astronomischen Gliederung mit der Wirkung der kosmischen Hauptursache: wie wir nämlich bei sämtlichen Exnovae beobachten, zeigt die Helligkeit schwache unregelmäßige Schwankungen, die in unserem Falle die Vorbedingung für die Existenz glazialen Polarklimas und somit für die Auswirkungen der astronomischen Schwankungen sind; lassen sie nach bzw. hören sie schließlich ganz auf, wird sich der eisfreie Zustand wieder einstellen können.

3. Die zeitlich ausgedehnteren, eisfreien Perioden sind ebenso folgerichtig verständlich wie die Eiszeiten selbst.

Ebenso wichtig ist jedoch die Frage, welchen Einwänden die Hypothese außer den bereits diskutierten biologischen Schwierigkeiten noch begegnet. Zunächst ergäbe sich nach ihr, daß die Eiszeit ungefähr gleichzeitig auf der ganzen Erde hereingebrochen sein müßte, während sie vielfach als Folge einer ganz allmählichen Klimaverschlechterung betrachtet wird. Wie wir aber auf S. 20 sahen, ist ein solches auf der ganzen Erde ungefähr gleichzeitiges Einsetzen der Eiszeit durchaus nicht unvereinbar mit den geologischen Betrachtungen, ja hat sogar die etwas größere Wahrscheinlichkeit für sich. Der dritte Einwand trifft nicht nur diese, sondern sämtliche kosmischen Hypothesen: die Tatsache, daß zumindest die beiden einigermaßen übersehbaren Eiszeiten auf die großen Orogenesen folgten, sei zu auffällig, um eine davon doch völlig unabhängige kosmische Ursache als wahrscheinlich gelten zu lassen. Dazu habe ich mich schon auf S. 21 geäußert, und es scheint mir gerade dieser scheinbare Widerspruch vielleicht auf einen zukünftigen Ausweg hinzuweisen: ob nicht jenes kosmische Ereignis, das wir als Ursache der Eiszeit ansprachen, überhaupt öfters eingetreten sei und eben nur dann große Eiszeiten hervorrufen konnte, als das Erdrelief stärkere Kontraste zeigte. In der oberen Kreide z. B. beobachten wir zweifellos zeitweise stärker differenzierte Klimate, die zwar noch keiner Eiszeit entsprechen, aber doch in den Befunden deutlich zum Ausdruck kommen. Noch von einer ganz anderen Seite her finden wir einen vielleicht ausbaufähigen Ansatz, nämlich von der *Paläobiologie* aus. Zu gewissen Zeiten beobachten wir hier ein Aufblühen, dort ein Absterben bestimmter Gattungen, das zu universellen Charakter trägt, um ohne eine ebensolche Ursache erklärbar zu sein. Wilser [118] hatte nun die bemerkenswerte Idee, daß diese Schwankungen der Lebewelt am leichtesten durch besondere solare Einflüsse erklärlich seien, und zwar nicht nur solche der Wärmestrahlung, sondern speziell derjenigen des kurzwelligen Spektrums. Ja, ganz allgemein scheint in der Erdgeschichte ein gewisser Zusammenhang zwischen den vermutlich kosmischen Ereignissen und der Entwicklung der Lebewelt angedeutet: am Ende der frühkambrischen Eiszeit finden wir ein rasches Aufblühen der vorher kümmerlichen Lebewelt, und vielleicht fällt die Entstehung des Lebens in die Zeit nach der ersten algonkischen Eiszeit. Auch im Zusammenhang mit der permokarbonischen Eiszeit finden wir einen durchgreifenden Wechsel der Lebewelt, und es darf wohl als mehr als eine bloße Vermutung bezeichnet werden, daß auch die Entwicklung des Menschengeschlechts irgendwie mit den Vorgängen der diluvialen Eiszeit zusammenhängt. Eine Brücke von den schönen Ideen Wil-

sers über die Paläoklimatologie zur Astrophysik erscheint so als ein großartiges Zukunftsprojekt naturwissenschaftlicher Zusammenarbeit.

Nun darf ganz allgemein erwartet werden, daß naturwissenschaftliche Theorien, speziell dann, wenn sie sich über mehrere Gebiete erstrecken, zu gewissen Problemstellungen führen, die an Hand von Beobachtungen Schlüsse auf die Richtigkeit der zugrunde gelegten Annahmen gestatten. So hatte ich z. B. gefolgert, daß durch den Ende Pliozän erfolgten Novausbruch die Exzentrizität der Erdbahn vergrößert wurde, diese also vorher kreisförmiger war. Da bei rein gravitativen Einflüssen erhebliche Exzentrizitätsänderungen wenig wahrscheinlich sind, so kann man daraus den Schluß ziehen, daß die Erdbahn überhaupt seit dem vorhergehenden Ausbruch im Karbon kreisförmiger war als heute. Die Frage, ob sich das geologisch irgendwie nachweisen ließe, habe ich kürzlich behandelt [35]. Es ergab sich, daß die Dauer der Schwankungen der permokarbonen Eiszeit in der Tat nur dann mit der astronomischen Theorie vereinbar ist, wenn die Erdbahn zu dieser Zeit im Mittel kreisförmiger war; lehnt man diese Folgerung ab, so muß man auch für das Quartär die astronomische Theorie ablehnen.

Auf eine ganz andere Verbindung weisen vielleicht die auf S. 10 erwähnten Tektite hin [17]. Es kann hier an eine Beziehung zu einem der beiden besprochenen Typen der Zwergvariabilität, also sowohl zu einem solaren Nova- als auch zu einem *U*-Geminorumstadium gedacht werden. Die Hauptschwierigkeit liegt in der noch nicht endgültig geklärten Frage, ob die Tektite wirklich gleichzeitig, oder zu etwas verschiedenen Zeiten entstanden bzw. auf die Erde gefallen sind. Im Falle der *U*-Geminorumvariabilität ließe sich bei dem mindestens doppelten Zyklus auf 2 Hauptfallzeiten schließen, eine im Pliozän-Frühquartär, die andere etwa im Mittelquartär. Eine bemerkenswerte Folgerung daraus wäre die, daß bei der Richtigkeit dieser Kombination Tektite auch in älteren Schichten, und hier vor allem im Oberkarbon, zu erwarten wären.

Eine weitere Verbindung ergibt sich von hier aus zu dem auf S. 12 über den irdischen Sauerstoff Gesagten: die Novaausbrüche sowie auch etwaige *U*-Geminorumvariabilität brächten jedesmal beträchtliche Mengen solarer Materie in die Erdatmosphäre hinein. Nun hatten wir gesehen, daß nach der Abkühlung der Erde freier Sauerstoff nicht vorhanden gewesen sein kann. Auf der Sonne ist Sauerstoff von der Größenordnung nach gleichem Anteil wie auf der Erde vorhanden (S. 104), so daß hier durch die so abgestoßene Sonnenmaterie auch merkliche Mengen freien Sauerstoffs in die Erdatmosphäre gelangen können. Nimmt man an, daß Sauerstoff in der abgestoßenen Sonnenmaterie nur 10% Gewichtsanteil¹⁾ hätte, so ergäbe

¹⁾ Die derzeitigen Abschätzungen gehen auf ungefähr 30%.

sich, daß bei den betrachteten Vorgängen 1–10 % der Masse der Erdatmosphäre an freiem Sauerstoff in diese gelangte, was für den Anfang, d. h. zur Entstehung einer Lebewelt, vielleicht genügte. Ganz allgemein darf man aber sagen, daß eine solche materielle Einwirkung der Sonnenphänomene auf die Erdatmosphäre nachhaltige klimatologische und vor allem auch biologische Konsequenzen nach sich ziehen könnte. Dies ist ein weiterer Beitrag sowohl zu den Problemen des Absatzes 2 als auch zu jenen Gedankengängen, die wir auf S. 88 angeschnitten hatten.

Eine letzte Verbindung könnte sich von hier aus zu einem der interessantesten Teile der Erdgeschichte, der Frühgeschichte des Menschen, ergeben. Der eigentliche Werdegang des Menschengeschlechtes und die daran anknüpfenden Probleme sind bekanntlich auch heute noch lange nicht geklärt, ebensowenig wie die oben erwähnte Entstehung des Lebens auf der Erde. So viel scheint aber sicher zu sein, daß der Mensch mindestens das Quartär miterlebt hat und folglich auch nicht nur die Vergletscherungen als solche, sondern auch jene Ereignisse, welche letzte Ursache des Eiszeitalters selbst waren. Nun muß ein Novaausbruch, selbst wenn die Schutzwirkungen in der oben geschilderten Weise den Fortbestand des Lebens sicherten, eine Naturkatastrophe unvorstellbaren Ausmaßes gewesen sein. Aber auch bei einem *U-Geminorum*stadium der Sonne würden meteorologische Extreme von heute nicht bekanntem Ausmaß auf der ganzen Erde stattfinden. Wenn der Mensch Zeuge solcher Naturereignisse war, ließe sich erwarten, daß jene ihn in Furcht und Schrecken versetzende Phänomene sich irgendwie in Sagen, Mythen usw. widerspiegeln werden. Nun ist ja bekannt, daß es in der Tat eine Art von Sagen gibt, die über die ganze Erde verbreitet sind: die Sintflutsagen. Ich hätte es nicht gewagt, hier ein den meisten Wissenschaftlern zu unsicher erscheinendes Land zu betreten, wenn nicht einer der verdienstvollsten Forscher auf diesem Gebiete, J. Riem [119], auf die überraschend gute Erklärung des Sintflutsagen-Problems nach der auf S. 85f. besprochenen Novahypothese hingewiesen hätte. Riem ist es gelungen, 830 Sintflutsagen zusammenzustellen, und er schreibt zum Schluß: „Eine Karte des Vorkommens dieser Sagen beweist die Universalität auf der ganzen Erde. Es ist die einzige Sage, die von den Sumerern bis in die Gegenwart durch die Kulturvölker und die Primitiven der ganzen Welt verfolgt worden ist“. Wie überall im menschlichen Leben, so auch in der Wissenschaft: es wird zu oft das Kind mit dem Bade ausgeschüttet! Wenn es noch so richtig ist, vielerlei Sagen in den Bereich der Fabel zu verweisen, bei einer so universell verbreiteten Sage wäre es eine unverzeihliche Voreiligkeit, sie einfach zu ignorieren. So viel kann man aus den Sintflutsagen jedenfalls entnehmen, daß sie eines von vielen

Argumenten gegen die primitiv aktualistische Erklärung der Geschehnisse der Vorzeit sind.

Bis jetzt sprachen wir nur ganz allgemein von der Wahrscheinlichkeit einer bedeutsamen Rolle, die das Novaphänomen in der Kosmogonie spielt. Zu einer an den Beobachtungen prüfbar kosmogonischen Theorie kann jedoch die Angabe, daß das Novaphänomen im Leben der Sterne wiederholt eintritt, allein noch nicht genügen. Wir brauchten hierzu vielmehr eine wirkliche Begründung für sein Auftreten, und zwar eine solche, die es uns gestatten würde, das Novaphänomen theoretisch zu deduzieren, d. h. die an ihm gemachten Beobachtungen vorauszusagen. Von einer solchen Lösung sind wir aber noch weit entfernt, und es verbleibt uns daher umgekehrt nur die Möglichkeit, an Hand des Beobachtungsmaterials auf Vorgänge zu schließen, denen das Novaphänomen seine Entstehung verdanken könnte.

Es gibt zwei große Gruppen von Theorien, die sich um die Erklärung jenes imposanten Phänomens bemühen, und zwar:

1. die Theorien, die dem Phänomen eine *äußere Ursache* (im allgemeinen eine Kollision mit anderen kosmischen Objekten),
2. diejenigen, die ihm eine *innere Ursache* zugrunde legen.

Heutzutage ist die erste Gruppe klar im Nachteil. Denn, einerseits die Beobachtungen des Vorganges selbst, andererseits die zweifellos bestehenden Gesetzmäßigkeiten, schließlich die beobachtete Häufigkeit, vor allem aber die deutlich ausgesprochene Verwandtschaft mit gewissen Gruppen von Veränderlichen, sie alle ließen sich mit den Theorien der Gruppe 1 nur durch reichlich gekünstelte Zusatzannahmen erklären. Man wird also mit einiger Wahrscheinlichkeit sagen dürfen, daß es sich beim Novaphänomen um eine *Ursache im Sterninnern* handelt. Um nähere Aufschlüsse über die Natur dieser Ursache zu erhalten, müssen wir die Eigenschaften jener Sterne, bei denen es besonders häufig auftritt, betrachten. Wären, um ein Beispiel vorwegzunehmen, die Novae bevorzugt Sterne sehr großer Masse, so würde uns eine Erklärung scheinbar nicht schwer fallen: sahen wir doch auf S. 61, daß sehr massige Sterne sich hinsichtlich ihres Aufbaues stets mehr oder weniger in der Zwangsjacke befinden, und es wäre nur zu verständlich, daß bei solchen Sternen bevorzugt Instabilität einträte. Vielleicht kommt eine solche Erklärung für die Supernovae wirklich in Frage ([117] S. 401); die normalen Novae hingegen, welche die Supernovae zahlenmäßig um das Mehrtausendfache übertreffen, meiden die Riesen geradezu und häufen sich auf dem Hauptast. Nun variieren die direkt beobachtbaren Größen wie Masse, Radius oder Oberflächentemperatur auf dem Hauptast in weitesten Grenzen, so daß es schwer wäre, eine

von ihnen mit dem Novaphänomen in Verbindung zu bringen. Auf S. 60 lernten wir nun aber eine charakteristische Eigenschaft der Hauptaststerne kennen: die konstante Mittelpunktstemperatur, die hier durchwegs höher als bei den Riesen liegt. Es ist daher naheliegend, anzunehmen, daß das Auftreten des Novaphänomens auf dem Hauptast mit jener Eigenschaft der Mittelpunktstemperatur irgendwie zusammenhängen könnte. Nun ist das Novaphänomen ein außerordentlich rasch einsetzender Vorgang, der darauf schließen läßt, daß er im Sterninnern durch eine ebenso plötzliche Zustandsänderung ausgelöst wurde. Die Möglichkeit derartiger Zustandsänderungen besteht nun in der Tat durch Übergang von dem nicht entarteten in den entarteten Zustand (vgl. dazu [89] S. 125 ff.). Bei einem solchen Übergang tritt sehr starke Verdichtung ein, und aus dem Verhalten der Materie im entarteten Zustand errechnet sich, daß diese wesentlich strahlungsdurchlässiger wird, der Absorptionskoeffizient k also, wie schon auf S. 62 gesagt, abnimmt. Nehmen wir also einmal an, im Innern eines Sternes der Hauptreihe würde die Materie in den entarteten Zustand übergehen. Zunächst würde das Zusammensinken der von der Entartung betroffenen Materie ein Nachsinken der darüberliegenden Schichten zur Folge haben, was aber nach Gl. (XIII) plötzlich freiwerdende Kontraktionsenergie erzeugt. Alsdann würde durch die Abnahme des Absorptionskoeffizienten die im Innern aufgespeicherte Strahlungsenergie plötzlich nach außen dringen. Diese beiden gleichgerichteten Effekte müßten eine starke Expansion bzw. Abstoßung der äußeren Schichten hervorrufen, ein Phänomen also, das nichts anderes als das Novaphänomen ist. Auf diese Möglichkeit der Entstehung einer Nova, welche die bis heute bekannt gewordenen Beobachtungstatsachen in ihrer Gesamtheit gut darzustellen vermag, hat Vogt [121] hingewiesen.

Wesentlich komplizierter wird aber das Problem, wenn wir uns nicht nur mit der Möglichkeit eines Novaaufleuchtens überhaupt befassen, sondern dem Novaphänomen eine kosmogonisch wichtige Rolle, speziell also die des massenreduzierenden Faktors, zuweisen wollen. Zwei Dinge können wir hierzu ohne weiteres feststellen:

1. Da der Massenverlust einer Nova sicher nicht größer als 1 % der Sternmasse ist, kann nur dann von einer nennenswerten Massenreduktion die Rede sein, wenn ein Novaaufleuchten im Leben eines Sternes wiederholt auftritt.

2. Die Häufigkeit der Novaaufleuchten läßt Rückschlüsse auf die Länge des Intervalles zwischen zwei Aufleuchten zu, falls man die Zahl der Sterne, die als Nova aufleuchten können, kennt. Ist das Novaphänomen ein normales Phänomen, kann man also annehmen, daß alle normalen

Sterne gelegentlich durch das Novastadium gehen, so kommt man zu dem Schlusse, daß in spätestens $3-5 \cdot 10^8$ Jahren alle Sterne einmal als Nova aufgeleuchtet sein müßten. Da allein die Daten des Absatzes 1 beweisen, daß das Sternalter mindestens von der Größenordnung des 10fachen dieses Wertes sein wird, kommen wir um den Schluß, daß das Novaphänomen jedenfalls bei Sternen wiederholt auftreten muß, nicht herum. Diese beiden Folgerungen waren mehr oder weniger unmittelbar aus den Beobachtungen abgeleitet. Versuchen wir nun, sie mit der oben vorgebrachten Erklärung zu kombinieren, so könnte dies nur so geschehen, daß das Novaphänomen mit einer diskontinuierlich fortschreitenden inneren Verdichtung bzw. Herausbildung eines überdichten Kernes parallelisiert wird.

Nun taucht aber in der praktischen Durchführung dieser Parallelierung eine ernste Schwierigkeit auf: nehmen wir einmal an, ein Stern beginne seinen Weg auf dem Hauptast z. B. als *A*-Stern und er werde durch eine größere Zahl Novaausbrüche schließlich ein *K*- oder *M*-Zwerg; ein später geborener *A*-Stern wird denselben Weg durchlaufen, und so werden es sehr viele Sterne tun. Das Bild, das sich uns so darbieten müßte, wäre eine zahlenmäßig ungefähr gleichmäßige Verteilung auf dem Hauptast; jedoch, wie wir auf S. 47 sahen, ist so ziemlich das Gegenteil der Fall: die Sternzahl nimmt nach schwächeren Helligkeiten hin rasch zu. Wie das letzten Endes zu deuten ist, wissen wir heute noch nicht. Grundsätzlich bestehen jedenfalls zwei Möglichkeiten:

1. Diese Zunahme der Sternhäufigkeit hängt mit der Größe der Sterne bei deren Entstehung zusammen.

2. Die Massenreduktion wird nach Sternen kleiner Masse hin immer langsamer; wie wir sahen, müßte sie dann $\sim M^3$ erfolgen. Diese letztere Annahme ist in der Tat von den meisten Hypothesen, die mit einer Massenreduktion rechnen, gemacht worden.

Über die Annahme 1. läßt sich, wie wir schon auf S. 67 sahen, nichts Bestimmtes aussagen. Versuchen wir, die Annahme 2. mit der Massenreduktion durch das Novaphänomen zu verbinden, so müßten wir erwarten, daß auch bei dieser diskontinuierlichen Massenabnahme ein bei großen Massen schnellerer Massenverlust eintritt. Auf S. 92 hatten wir nun das Novaphänomen durch Eintreten der Entartung im Sterninnern zu erklären versucht. Die beiden massenabstoßenden Kräfte waren der im Innern freiwerdende Strahlungsstrom und die bei diesem Vorgang erzeugte Kontraktionsenergie. Läßt sich nun, zum mindesten qualitativ, irgendwie plausibel machen, daß diese massenabstoßenden Kräfte bei massigen Sternen

stärker werden? Was die erstere Kraft anbetrifft, wird sich nichts Näheres sagen lassen; dagegen läßt sich bei der Kontraktionsenergie sehr wohl erwarten, daß ihre Wirkung bei massigen Sternen größer sein wird. Tritt nämlich infolge starker Verdichtung ein Nachsinken der äußeren Schichten ein, so wird dies bei sehr ausgedehnten Sternen eine erheblich stärkere prozentuale Zusammenziehung des Sternes hervorrufen als bei kleineren. Am einfachsten ist die Annahme, daß diese Kontraktion des Sternes umgekehrt proportional der mittleren Dichte ρ , also proportional $\frac{R^3}{M}$ (R wie früher der Sternradius, M die Sternmasse) ist. Soll nun Masse von der Oberfläche eines Sternes in den Weltenraum abgestoßen werden, so muß die Gravitation $\frac{M}{R^2}$ überwunden werden; die abgestoßene Masse wird also ferner proportional $\frac{R^2}{M}$ sein. Zusammen mit unserer obigen Beziehung zur Dichte wird somit die abgestoßene Masse ΔM proportional sein:

$$\Delta M \sim \frac{R^3}{M} \cdot \frac{R^2}{M} \sim \frac{R^5}{M^2}.$$

Nun hatten wir früher schon auf S. 59 bei der Bestimmung der Mittelpunktswinkel die Beziehung Gl. (X) kennen gelernt, in der R und M vorkamen. Wir können diese Beziehung auch schreiben: $M \sim \frac{RT_e}{\beta}$.

Nun ist in dem Gebiet des Hauptastes, wo Novae hauptsächlich vorkommen, d. h. bei nicht allzu großen Massen, etwa $M < 3M_\odot$, β nahezu = 1 (Tabelle 3, S. 61), ferner, wie öfters betont, ist auf dem Hauptast $T_e = \text{const}$, so daß wir genähert R und M gleichsetzen können und so erhalten: $\Delta M \sim M^3$. Bei der großen Einfachheit der zugrunde gelegten Annahme ist dies zweifellos eine überraschend gute Übereinstimmung. Jedenfalls läßt sich also mit den auf S. 92 vorgebrachten theoretischen Vorstellungen von der Art der Ursache des Novaphänomens sehr wohl begründen, daß bei massigen Sternen der Massenverlust entsprechend schneller vor sich geht.

Die Frage, ob auch empirisch Argumente für diese Gedankengänge vorgebracht werden können, ist nicht leicht zu beantworten. Denn auf der einen Seite haben wir, wie auf S. 68 geschildert, keine Möglichkeit, den Massenverlust einer Nova exakt zu bestimmen und somit Massenverluste bei verschiedenen Novae zu vergleichen. Auf der anderen Seite fehlt uns die mithin wichtigste Angabe über die Novae, nämlich das Verhalten, vor allem das spektroskopische, im *Ruhezustand vor dem Maximum*. Durch einen äußerst glücklichen Zufall kennen wir einen einzigen Ausnahmefall, bei dem das prämaximale Spektrum beobachtet wurde, nämlich

die bereits erwähnte Nova Aquilae 1918. Es war ein mittlerer *A*-Typ, und aus der gut bestimmten absoluten Normalhelligkeit $+2.5^m$ zeigte sich, daß die Praenova ein völlig normaler *A*-Stern war. Jedenfalls ist es eine Nova, die absolut merklich heller als die meisten Novae war. Ihrer Stellung im Russell-Diagramm nach ist zu erwarten, daß sie etwa die 5–6fache Masse der normalen Novae hat. Wenn die vorgetragene Hypothese richtig ist, läßt sich erwarten, daß diese Nova bei ihrem Ausbruch die mindestens 100fache Masse abgestoßen hätte als normale Novae. Daß die Beobachtungen in der Tat aufs stärkste hierfür sprechen, beweist die Tatsache, daß bei keiner Nova auch nur angenähert so deutlich und lange die Ausbildung einer mächtigen Nebelhülle verfolgt werden konnte; somit ist erwiesen, daß die Massenabstoßung hier erheblich stärker war als bei normalen Novae, wengleich auch exakte Zahlenwerte hierfür nicht gegeben werden können.

Welche Rolle in unseren kosmogonischen Vorstellungen die den Novae verwandten Typen von veränderlichen Sternen spielen, ist heute noch eine ganz offene Frage. Nehmen wir, wie auf S. 83 in anderem Zusammenhang besprochen, an, ein Stern ginge gelegentlich für die Größenordnung 10^4 – 10^5 Jahre durch ein solches Variabilitätsstadium hindurch, so würde er hier etwa 10^8 – 10^6 Aufleuchten durchmachen. Nun sahen wir, daß ein solches Aufleuchten einem Novaausbruch, wenn auch in kleinstem Ausmaße, ähnelt, und wenn wir die nicht unwahrscheinliche Annahme machen, daß ein Stern bei einer solchen Expansion nur 10^{-8} – 10^{-9} seiner Masse abstößt (was die Größenordnung der Masse eines großen Planetoiden ist), so käme insgesamt ein Massenverlust von der Größenordnung 1‰ – 1% heraus, d. h. wie bei einem einzigen normalen Novaausbruch. Es wäre also nicht undenkbar, daß ein gelegentliches *U*-Geminorumstadium kosmogonisch die gleiche Rolle als massenreduzierender Faktor spielt wie ein einmaliger Novaausbruch — mehr können wir heute noch nicht sagen.

Das Bild der Sternentwicklung, wie es sich nach Einbeziehung des Novaphänomens in die Kosmogonie darbietet, wäre somit zusammengefaßt etwa folgendes: ein Stern entsteht als roter Gasball. Seine Anfangsmasse kennen wir nicht, da die frühere Annahme, Sterne würden nur mit einer gewissen Mindestmasse, z. B. $M > 3.5_{\odot}$ entstehen, heute nicht mehr sicher ist. Durch Kontraktion gelangt er schließlich in der Größenordnung von 10^6 – 10^7 Jahren in einen Zustand, in dem die Mittelpunktstemperatur auf einen gewissen kritischen Wert gestiegen ist, der auf der Hauptreihe erreicht wird. Durch im Innern einsetzende Entartung tritt das Novaphänomen auf, das dann bei diskontinuierlich fortschreitender Herausbildung eines überdichten Kernes eine wesentliche Reduktion der Stern-

masse verursacht. Es wird somit ein wesentlicher Teil der irgendwann in Sternen zusammengeballten Massen wieder in den Weltenraum zurückgestoßen. Was übrig bleibt, ist vielleicht der in weißen Zwergen offene zutage tretende überdichte Kern, doch wissen wir über den weiteren Entwicklungsgang eines weißen Zwerges heute noch nichts. Der Gedanke eines kosmischen Kreislaufes der Materie, erstmalig von Immanuel Kant ausgesprochen, fände so wenigstens eine teilweise Verwirklichung, indem abgestoßene Materie sich später einmal wieder zu neuen Sternen zusammenballen könnte. Das hängt eng zusammen mit dem schwierigen Problem, ob die eigentliche Entstehung der Sterne ein längst abgeschlossener Prozeß ist, oder ob heute noch Sterne entstehen können. Es darf als wahrscheinlich bezeichnet werden, daß bei der Entstehung des Milchstraßensystems vor einigen Milliarden Jahren die überwiegende Zahl der Sterne durch Zerfall des Urnebels entstanden sind, doch könnten aus der bereits durch das Nova-Phänomen zurückgegebenen Masse sehr gut auch später noch Sterne entstehen. Vielleicht könnten die übriggebliebenen Kerne der bereits abgelebten Sterne als „Kondensationskerne“ hier Materie um sich sammeln. Vielleicht sind jene später entstandenen Sterne gerade die, die wir heute als rote Riesen am Himmel sehen! Wir kommen hier zu einer neuen Komplikation, und zwar zu der Frage, ob es wirklich gerechtfertigt ist, für alle Sterne ein gleiches Modell des inneren Aufbaus vorzusetzen. Ein weiterer Ausbau der auf S. 46 erwähnten Beobachtungen über die Dichtekonzentration bei Bedeckungsveränderlichen wird auch hier Licht in das Dunkel werfen können.

Die etwas weitschweifigen Erörterungen dieses Kapitels konnten für uns nur einem Zwecke dienen: *Aufschlüsse auch über den Lebensweg unserer Sonne als normalem Fixstern zu erhalten.* Nun ist dieses Wort „normal“ aber nur beschränkt zu verwenden, denn in einer Hinsicht ist die Sonne nicht ein beliebiger Fixstern: als Zentralgestirn unseres Planetensystems. Die zahlreichen, im folgenden Kapitel näher zu betrachtenden Gesetzmäßigkeiten dieses Systems lassen mit Gewißheit erkennen, daß es sich hier nicht um ein Zufallsprodukt, sondern vielmehr um ein einheitliches Ganzes handeln muß. Als vielleicht wichtigstes Resultat dieses Absatzes hatten wir ja gesehen, daß sehr wahrscheinlich *das Alter der Sonne nicht viel größer ist als das der Erde und somit des Planetensystems.* Wir dürfen daher weiterhin behaupten, daß auch die Lebensgeschichte von Sonne und Planetensystem viele gemeinsame Züge aufweisen wird, sich also der Entwicklungsweg der Sonne in dem des Planetensystems widerspiegelt.

Drittes Kapitel.

Die Entwicklungsgeschichte des Planetensystems.

Die Kosmogonie des Planetensystems ist verständlicherweise der älteste Teil kosmogonischer Forschung. Als aber die vorgebrachten Lösungsversuche schließlich nicht zum Ziele führten, hat sich die Forschung immer stärker der Fixsternkosmogonie, also dem in Kap. II auseinandergesetzten Teil dieser Wissenschaft, zugewandt. In der Tat sind sich alle maßgebenden Forscher heute darüber einig, daß *vor* einer erfolgreichen Rekonstruktion des Entwicklungsganges des Planetensystems der Lebensweg unserer Sonne als Fixstern erforscht sein muß; denn es kann gewiß nicht gleichgültig sein, ob man bei der Entstehung des Planetensystems mit einer Zwerg- oder einer Riesen Sonne zu rechnen hat!

Man wird zu Beginn dieses Kapitels mit Recht fragen dürfen, ob nicht das so fruchtbare Vergleichsprinzip der Fixsternkosmogonie mutatis mutandis auch auf die Kosmogonie des Planetensystems übertragen werden könnte, derart, daß man aus Betrachtung einer größeren Anzahl verschiedener Systeme eine Entwicklungsfolge zu rekonstruieren versucht. Aber, so viele Fixsterne wir auch kennen, von keinem einzigen fremden Planetensystem wissen wir etwas, ja, was noch schlimmer ist: selbst wenn jeder Fixstern ähnlich der Sonne sein Planetensystem besäße, würden wir davon keinerlei Kenntnis erhalten können, auch wäre das in absehbarer Zeit nicht zu erhoffen. Denn selbst der Riesenplanet Jupiter würde als Begleiter des nächsten Fixsternes α Centauri als Sternchen 23. Größe in nur 4 Bogensekunden Entfernung von diesem Stern 1. Größe leuchten. An einen Nachweis eines solch schwachen Begleiters kann weder mit direkten (visuell oder photographisch), noch mit indirekten Methoden (spektroskopisch oder photometrisch) auch nur im entferntesten gedacht werden. Ein Sternfreund, der mit einem Opernglas auszöge, um den Siriusbegleiter zu entdecken, hätte bei diesem Unternehmen immer noch weit mehr Aussicht als ein Astronom, der mit dem neuen amerikanischen 200-Zöller auf fremde Planetensysteme Jagd machte! Da uns also jede etwaige Vergleichsmöglichkeit fehlt, ist die Wahrscheinlichkeit einer sicheren Rekonstruktion des Entwicklungsganges von vorneherein eine sehr geringe. Wenn schon trotz vieltausendfacher Vergleichsmöglichkeit der Sonne mit anderen Fixsternen ein allgemein anerkannter Entwicklungsweg der Sonne nicht gefunden ist, um wieviel weniger darf man das bei dem Planetensystem erwarten, wo diese Vergleichsmöglichkeit nicht gegeben ist. Andererseits ist aber gerade die Frage nach dem Werdegang

des Planetensystems die geeignetste Brücke zu einer ganzen Reihe anderer Nachbargebiete, speziell der Geologie und Geophysik. In der Tat basieren geologische und geophysikalische Erdbilder zumeist auf ganz speziellen kosmogonischen Vorstellungen. Aber nicht nur diese und zahlreiche andere Probleme knüpfen daran an, sondern auch Fragen viel allgemeineren Charakters; nicht zuletzt kann die nach der relativen Bedeutung der irdischen Lebewelt im Universum einzig und allein von einer Planetenkosmogonie beantwortet werden. Daß nämlich heute in unserem Planetensystem eine der irdischen auch nur einigermaßen vergleichbare Lebewelt existieren könnte, darf als ziemlich ausgeschlossen gelten. Wenn also die Kosmogonie z. B. der Anschauung von Jeffreys zustimmen müßte „that systems of the type of the solar system are the exception and not the rule in the universe“, so ergäbe sich daraus eine bemerkenswerte Sonderstellung des irdischen Lebens im Kosmos. Das besondere Interesse, das dieser und zahlreichen anderen Fragen entgegengebracht wird, erklärt auch die Tatsache, daß gerade hier immer wieder die phantastischsten Spekulationen vorgetragen wurden und auch Anhänger fanden, während der ehrliche Forscher nur wenig befriedigende Antworten geben kann. Der Weg, der vielleicht zum Ziele führt, muß mit größter Vorsicht beschritten werden. Er besteht zweckmäßig aus zwei Etappen:

1. Wir müssen alle Beobachtungstatsachen, die für die Kosmogonie wesentlich sind, von solchen, deren Wert hierfür fraglich oder gar zweifelhaft erscheint, zu trennen versuchen.

2. Wir dürfen unter den kosmischen Vorgängen, denen das Planetensystem möglicherweise seine Entstehung verdanken könnte, in erster Linie nur solche ins Auge fassen, die mit einigermaßen glaubhaften bzw. gut übersehbaren Prozessen rechnen. Wenn, um gleich zwei Beispiele zu geben, einige Kosmogonien die Sonne zur Zeit der Entstehung des Planetensystems sich bis zur Neptunbahn ausdehnen lassen, andere wieder das Planetensystem in seiner Urform mit einem Spiralnebel vergleichen wollen, so wäre dies ein Anfangszustand, über dessen Möglichkeit wir nichts wissen. Wenn andere Hypothesen hingegen mit der nahen Begegnung zweier Fixsterne arbeiten, so ist zu bedenken, daß dies zwar an und für sich ein seltener Vorgang ist, der aber im Laufe einiger Jahrmilliarden mehrmals im Milchstraßensystem vorgekommen sein muß, und mit dem man somit durchaus rechnen darf.

7. Das Beobachtungsmaterial.

Der allgemeine Ausgangspunkt aller Betrachtungen ist der Zustand höchster Ordnung und Regelmäßigkeit, den das System heute zeigt, und

der die Möglichkeit eines Zufallsproduktes von vornherein ausschließt¹⁾. Im einzelnen muß auf folgende Punkte Wert gelegt werden:

1. Alle großen Planeten bewegen sich rechtläufig um die Sonne in Bahnen, die durchwegs eine kleine Exzentrizität aufweisen. Die Ebenen aller Planetenbahnen gruppieren sich in verhältnismäßig engen Grenzen ($\pm 1^\circ$) um die Jupiterbahn, zeigen dagegen gegen die Ebene des Sonnenäquators eine deutliche Abweichung von im Mittel 6° .

2. Die Masse des Planetensystems ist nur ein kleiner Bruchteil ($\frac{1}{700}$) derjenigen der Sonne. Denkt man sich die Gesamtmasse Sonne + Planeten sich bis zur Neptunbahn homogen erstreckend, und nimmt an, sie rotiere gleichmäßig mit der Winkelgeschwindigkeit Neptuns, so kann man das Trägheitsmoment dieser ganzen Kugel ausrechnen und mit dem jetzigen Gesamtmoment des Planetensystems vergleichen. Es ergibt sich, daß das jetzige Gesamtmoment nur $\frac{1}{600}$ des Momentes dieser homogenen Kugel beträgt. Noch merkwürdiger ist aber die Verteilung dieses heutigen Gesamtmomentes. Es entfallen von ihm auf die Planeten trotz ihrer verschwindend geringen Masse über 90%, und zwar je nach der Annahme über Aufbau und Rotationsgesetz der Sonne 94 bzw. 97%, wo ersterer Wert für nach innen zunehmende Rotationsgeschwindigkeit (S. 63), letzterer für eine homogene, gleichförmig rotierende Sonne gilt.

3. Mit einer einzigen Ausnahme weisen alle Planeten rechtläufige Achsendrehung auf um Achsen, die weniger als 30° gegen die Senkrechte der Bahnebene geneigt sind; diese Ausnahme bildet Uranus mit rückläufiger Rotation und Achsenneigung von 98° . Noch nicht genau festgelegt ist die Achsenlage bei Merkur und Venus. Die Rotationen sind im allgemeinen schnell; der mittlere, auf die Gesamtmasse der Planeten gleichmäßig verteilt gedachte Wert beträgt ungefähr 10^h ; langsamere Rotationen der inneren Planeten, speziell von Merkur und Venus²⁾, ergeben sich ohne weiteres aus der Wirkung der Gezeitenreibung, so daß wir jedenfalls *im Anfangszustand mit allgemein sehr schneller Rotation von $\sim 10^h$ zu rechnen haben*. Für die Kosmogonie ist sicher die Tatsache wichtig, daß bei den photo-

¹⁾ Nur wenn die Sonne von einem einzigen Planeten, also z. B. von der Erde, umkreist würde, könnte man schließlich annehmen, Sonne und Erde wären sich irgendwo im Weltall begegnet oder gar, die Sonne hätte die Erde gelegentlich einer nahen Passage aus einem ganz anderen System entführt.

²⁾ Es erscheint eigenartig, daß wir über die Rotation gerade des aller-nächsten Planeten nichts Sicheres wissen; sie ist jedoch sicher größer als 24^h , da dieser Wert nach Slipher mit den spektroskopischen Beobachtungen nicht vereinbar wäre.

metrisch festgestellten Rotationen der Planetoiden durchwegs kleine Werte von der Größenordnung $5-7^h$ herauskamen.

4. Daß Planeten von Satelliten und Satellitensystemen umgeben sind, dürfte als Normalfall anzusprechen sein; nur Merkur und Venus haben keinen Mond¹⁾. Die insgesamt 29 Monde zerfallen deutlich in zwei Gruppen:

a) Die sog. regulären Monde, die im Sinne der Rotation des Planeten in fast kreisförmigen Bahnen in dessen Äquatorebene laufen. Hierzu gehören die 7 inneren Jupitermonde²⁾, die 8 inneren Saturnmonde, alle 4 Uranusmonde sowie schließlich die beiden Marsmonde. Die Saturnringe dürfen wahrscheinlich als regulärer Mond betrachtet werden, da ihre Masse (entgegen dem Augenschein!) nur etwa 10^{-6} der Planetenmasse, also der eines kleinen Mondes, gleichkommt; innerhalb der sog. Rocheschen Grenze, wo die Saturnringe sich befinden, könnte ein Mond nicht selbständig bleiben.

b) Die sog. irregulären Monde, wie die beiden äußeren Jupitermonde VIII und IX, der Saturnmond Phöbe und der Neptunmond, die sich durch rückläufige Bewegung auszeichnen.

Die Stellung des *Erdmondes* bildet in verschiedener Hinsicht eine *Ausnahmestellung*, der wir angesichts ihrer großen Bedeutung für die behandelten Grenzgebiete ein Sonderkapitel widmen müssen.

Im Anschluß daran ergibt sich die wichtigste und aufschlußreichste Frage der Planetenkosmogonie: können wir die Mondsysteme als mit dem Planetensystem irgendwie vergleichbar betrachten, oder nicht? Daß die irregulären Monde a priori ausscheiden, ist klar. Unter den regulären Systemen können wir uns auf Jupiter, Saturn und Uranus beschränken. Hinsichtlich der Massenverhältnisse liegt die Analogie auf der Hand. Das größte Massenverhältnis ist 1:4000 bei Titan: Saturn, also noch vergleichbar Jupiter: Sonne mit 1:1000; die kleinsten Verhältnisse im Jupitersystem sind von der Größenordnung $10^{-6}-10^{-7}$, also vergleichbar Merkur: Sonne. Was ferner wichtig ist: auch die Massenunterschiede zwischen kleinsten und größten regulären Monden sind gerade von der Größenordnung derjenigen zwischen kleinsten und größten Planeten. Dagegen ist die

¹⁾ Pluto, dessen Stellung an sich sowie vor allem dessen physische Daten noch sehr unsicher sind, ist im allgemeinen unberücksichtigt geblieben.

²⁾ Auch die im Jahre 1938 neuentdeckten Jupitermonde X und XI werden zweifellos kosmogonisch interessante Fragen aufwerfen. Denn es muß auffallen, daß die Monde VI, VII und X in direkter Bewegung ungefähr in derselben Distanz umlaufen, und es wäre möglich, daß dort noch eine ganze Reihe kleinerer Mondkörper sich befände. Ebenso auffällig ist, daß die Monde VIII, IX und XI gemeinsam rückläufig in ungefähr derselben Entfernung umlaufen. Man kann tatsächlich von „den 3 Mondfamilien des Jupiter“ sprechen.

relative Ausdehnung bei beiden durchaus nicht die gleiche. Die Entfernung Merkurs beträgt 83, die Neptuns über 6000 Sonnenradien, während, in Einheiten der Planetenradien, diese Grenzen sind bei: Jupiter 2·5 bzw. 350, bei Saturn 3·1 bzw. 210 und bei Uranus 8 bzw. 240. Diese ganz verschiedene relative Ausdehnung kommt auch darin zum Ausdruck, daß bei den regulären Monden die Summe der Umlaufsmomente in krassem Gegensatz zum Planetensystem merklich kleiner als das Rotationsmoment des Zentralkörpers ist. Weiterhin schmiegen sich die Mondbahnen¹⁾ im allgemeinen stärker der Äquatorebene der Planeten an als im Planetensystem, wo eine deutliche Abweichung besteht. Das ungemein wichtige Ergebnis lautet: das Planetensystem unterscheidet sich von den 3 unter sich sehr ähnlichen Satellitensystemen in wesentlichen Punkten. Fragen wir uns, was im Planetensystem geändert werden müßte, damit es den Mondsystemen ähnlich würde, so kann die Antwort nur lauten: *beide würden dann weitgehend vergleichbar, wenn das Planetensystem seine lineare Ausdehnung mindestens 10mal verkleinert hätte.*

Das etwa wären die Tatsachen, die jede Kosmogonie unbedingt berücksichtigen muß, deren Außerachtlassung von vornherein einen starken Mangel mit sich brächte. Es gibt noch einige Daten, die möglicherweise Fingerzeige einer Lösung geben und deren überzeugende Darstellung aus irgendeiner Hypothese heraus umgekehrt diese bis zu einem gewissen Grade stützen könnte. Da fällt zunächst die deutliche Zweiteilung des Planetensystems auf, die durch die Existenz des beide Teile trennenden Planetoidengürtels noch unterstrichen wird. Ob auch nach außen hin ein solcher Planetoidenring, dessen größter Körper Pluto sein könnte, existiert, läßt sich heute noch nicht sagen. Die inneren Planeten zeigen mit zunehmender Masse ein ganz deutliches Dichtegesetz, im Gegensatz zu den äußeren, wie folgende Tabelle 4 (S. 102) zeigt. Dies wird noch deutlicher, wenn der Erdmond als innerer Planet mitgerechnet wird.

Diese Angaben sind mit Vorteil in kosmogonische Versuche hineinzunehmen. Es gibt aber auch eine Anzahl Phänomene, deren Heranziehung zur Kosmogonie fragwürdig, ja geradezu nachteilig werden kann.

Betrachten wir zunächst unsere Kenntnisse über Kometen. Zahlreiche Beobachtungstatsachen, auf die hier im einzelnen nicht eingegangen werden kann, haben zu der Erkenntnis geführt, daß Kometen relativ kurzlebige Gebilde sind, deren Alter höchstens nach Jahrmillionen, keinesfalls aber Jahr-

¹⁾ Einige Ausnahmen, so z. B. Saturnmond Japetus und die Jupitermonde VI, VII und X, die gegen den Äquator stärker geneigt sind und auch stärker exzentrische Bahnen haben, können wahrscheinlich durch Störungswirkungen erklärt werden.

milliarden bemessen werden darf [122]. Wir müssen daher annehmen, daß die Kometen nicht ursprüngliche, sondern erst relativ rezente Glieder des Sonnensystems sind; vgl. dazu [123], [124]. Es wäre daher ein Fehler, an Kometen gemachte Beobachtungen für die Kosmogonie des Planetensystems verwenden zu wollen.

Tabelle 4. Planetarisches Dichtegesetz.

Planet	Masse (Erde = 1)	Dichte (Wasser = 1)
Erdmond	0·013	3·34
Merkur . .	0·038	3·73
Mars . . .	0·11	3·92
Venus . . .	0·82	5·21
Erde . . .	1·00	5·52
Uranus . .	15	1·36
Neptun . .	17	1·32
Saturn . .	95	0·69
Jupiter . .	317	1·34

Ebenso, allerdings in anderer Hinsicht, ist Vorsicht geboten, die heutigen Verhältnisse des Planetoidengürtels kosmogonisch auszudeuten. Denn über den Ursprung dieses Gürtels, dessen Gesamtmasse übrigens kaum 1% der des Erdmondes beträgt, wissen wir nichts Sicheres. Daß sie zwar von Anfang an zum Planetensystem gehören, wird meistens angenommen, ob sie aber stets selbständig waren, oder erst später durch Zertrümmerung eines größeren Körpers (Zusammenstoß? Gezeitenaufbrechung durch Jupiter? innere Explosion?) entstanden sind, ist noch nicht geklärt. Sicher wird eine endgültige Kosmogonie auch ihrer markanten Stellung zwischen den beiden Teilen des Planetensystems Rechnung tragen müssen.

Noch größere Skepsis ist jedoch der Frage entgegenzubringen, ob im Planetensystem irgendein *Abstandsgesetz* existiert, das kosmogonische Rückschlüsse gestattet (vgl. dazu [125]). Erstmalig in der sog. Titius-Bodeschen Reihe aufgestellt, sind immer wieder Versuche gemacht worden, aus den Planetenentfernungen irgendein Gesetz herauszulesen, erst kürzlich wieder von Mohorovicic [126]. Meistens stimmen aber diese „Gesetze“ nur für einen Teil der Planeten einigermaßen oder es werden beliebige fehlende Glieder zugelassen, so daß das Problem vorläufig noch ganz offen ist. Nicht zuletzt müßte man bei kosmogonischer Anwendung von einem solchen Gesetz mindestens verlangen, daß es auch die Massen der Planeten berücksichtigt; denn, wenn es z. B. über irgendeine Gesetzmäßigkeit bei

der Entwicklung der hypothetischen Urmasse Aussagen machen soll, kann es kaum genügend sein, angesichts von Massenunterschieden $1:10^4$ nur von einem „großen Planeten“ zu sprechen. Auch ist es, wie eben festgestellt, ohne eine kosmogonische Hypothese nicht möglich, von einem früheren Planeten zwischen Jupiter und Mars zu sprechen, ganz abwegig aber, wie z. B. bei Mohorovicic, alle Monde, Planetoiden oder gar Kometen einer Zahl in dem „Gesetz“ zuordnen zu wollen.

Trotz dieser verhältnismäßig wenigen Anhaltspunkte haben wir doch den kleinen Vorteil, einen Körper dieses Systems, nämlich unsere Erde, in jeder Hinsicht besser als die anderen Himmelskörper zu kennen. Welche sind nun die Daten unserer Erde, die möglicherweise der Kosmogonie Fingerzeige geben könnten?

1. Der *Aufbau der Erde* selbst. Unserer direkten Untersuchung ist im allgemeinen nur eine die Erde umspannende Kugelschale von noch nicht 20 km zugänglich, also jedenfalls weniger als 1 % der Gesamtmasse. Für den wesentlichen Teil des Erdinnern sind wir auf die Ergebnisse der Geophysik, speziell die aus den Beobachtungen an Erdbebenwellen hergeleiteten, angewiesen. Das für uns wichtigste Resultat ist ein Aufbau der Erde aus durch Unstetigkeitsflächen bzw. rasche Übergänge getrennten Kugelschalen von sehr verschiedener Dichte bzw. chemischer Zusammensetzung. Die markanteste Trennungsfläche liegt in 2900 km Tiefe; sie trennt den vermutlich aus Nickeleisen bestehenden Kern mit einer Dichte 8–9 von der bis zu 1200 km Tiefe reichenden Erzschicht (Dichte 5–6). In 1200 km ist ein weiterer Übergang; hier beginnt der basische Gesteinsmantel (Dichte 3·0), der bei dem Boden des Pazifik bis zur Erdoberfläche reicht, bei den Kontinenten aber in 30–60 km Tiefe endet (vgl. S. 27). Möglicherweise existieren noch weitere solcher Unstetigkeitsflächen; sie sind aber bei weitem nicht so markant wie die erwähnten und für uns ohne Bedeutung. Diese Sonderung ist der Ausdruck einer *vollkommenen chemischen Differentiation*, die mit Gewißheit darauf schließen läßt, daß die Erde *uranfänglich durch und durch schmelzflüssig gewesen sein muß*. Die Trennung der ursprünglich gleichmäßigen Mischung erfolgte dadurch, daß bei Abkühlung die Schmelze sich in mehrere flüssige Phasen sondern mußte, die schwersten zu unterst, wie es die Erde heute zeigt, und wie wir es in der Analogie der Vorgänge im Hochofen experimentell bestätigt finden. Jedenfalls ist die Auffassung, die Erde sei von Anfang an fest gewesen und nie zu stärkerer Erwärmung gelangt, damit kaum vereinbar.

2. Man kann versuchen, einen *Vergleich der chemischen Zusammensetzung der Erde mit der anderer Himmelskörper*, z. B. der Meteoriten, dann der Sonne und Planeten durchzuführen. Was bei den Meteoriten auffällt,

ist zunächst das bemerkenswerte Vorkommen von Stein- und Eisenmeteoriten, d. h. auch hier das Vorkommen einer Sonderung, wie wir sie ähnlich im Erdball vorfinden. Man hat sogar oftmals, z. T. vielleicht zu optimistisch, die Verhältnisse des Erdkernes mit denen der Eisenmeteoriten weitgehend gleichgesetzt, z. B. auch hinsichtlich des vermuteten Fehlens radioaktiver Elemente im Erdinnern (S. 28). Wie aber schon betont, ist heute, wo es fraglich erscheint, ob die Meteoriten wirklich Trümmer eines früheren Planeten sind, bei solchen Vergleichen größte Vorsicht am Platze.

Ein Vergleich der relativen Häufigkeit der Elemente von Erde und Sonne ist mit großen prinzipiellen Schwierigkeiten behaftet, da uns in beiden Fällen nur die äußeren Schichten direkt zugänglich sind. Russell [127] S. 72ff., der sich auf diesem schwierigen Gebiete besondere Verdienste erworben hat, kommt so schließlich zu folgenden Resultaten: die relative Häufigkeit der Metalle ist bei Sonne und Erde ungefähr dieselbe. Bei den Nichtmetallen ist diese Übereinstimmung nur in wenigen Fällen, z. B. beim Silicium und beim Sauerstoff (vgl. S. 89) erfüllt; im allgemeinen läßt sich aber eine bedeutende relative Armut an leichteren Elementen, speziell an jenen, die zur Bildung einer Atmosphäre in Frage kommen, feststellen; Stickstoff z. B. ist auf der Sonne 10000mal häufiger als auf der Erde und Neon gar 100 Millionen mal. Diese Tatsachen lassen nach Russell keine andere Erklärung zu, als daß eben der Hauptteil dieser Elemente aus der *Erdatmosphäre entwichen ist*. Da aber bei der heutigen Temperatur diese Elemente nicht entweichen können, muß man schlußfolgern, daß die *Erde uranfänglich für kurze Zeit eine sehr hohe Temperatur besaß*. Die chemischen Ergebnisse zusammenfassend, kommt Russell zu folgendem kosmogonisch äußerst wichtigen Schluß (S. 80): „In fine, then, it appears that, if a mass of material, similar in composition to the Sun's surface, and containing enough heavy elements to make the Earth, could have been removed when very hot and allowed to cool rapidly, a body very similar in composition to our planet would have resulted; though the greater part of the original mass (mostly hydrogen) would have escaped during the process“.

In ähnlicher Weise kann man auch bei anderen Planeten vorgehen, wo uns freilich nur die Atmosphären spektroskopisch zugänglich sind. Alle Monde sowie wahrscheinlich auch der Planet Merkur scheinen keine merkliche Atmosphäre zu besitzen. Die Atmosphäre der Venus hat praktisch keinen Wasserdampf und keinen Sauerstoff, sie besteht anscheinend wesentlich aus Kohlendioxyd; eine Lebewelt im üblichen Sinne kann also hier schwerlich existieren. Am erdähnlichsten ist wohl der Mars, dessen Atmosphäre zwar höchstens 1/1000 der Sauerstoffmenge der Erde enthalten kann, bei dem aber die rote Farbe eine chemisch gebundene Sauerstoff-

menge größeren Ausmaßes möglich erscheinen läßt und somit den Gedanken an eine ehemals vorhandene Lebewelt nicht ausschließt. Die Atmosphären der äußeren Planeten sind uns erst durch die bedeutsame Entdeckung von Wildt näher erschlossen worden, der die unbekanntenen Banden in den Spektren als durch Ammoniak und Methan hervorgerufen nachwies. Hieraus können wir zwei Schlüsse ziehen: die Tatsache, daß von Jupiter bis Neptun Methan immer stärker hervortritt, umgekehrt Ammoniak abnimmt, ist einfach aus der abnehmenden Temperatur zu erklären. Aus der spektroskopisch abschätzbaren Menge der Gase in der Planetenatmosphäre lassen sich ferner genauere Schlüsse über ihre Temperatur ziehen und diese kann dann mit der berechneten Solartemperatur verglichen werden. Bei den 4 äußeren Planeten liegt die wahre Temperatur merklich über der berechneten. Dies könnte entweder durch restliche innere Wärme, oder einfacher noch durch die Treibhauswirkung der Atmosphäre erklärt werden. Doch läßt sich diese letztere Größe, die z. B. bei der Erde 15°C beträgt, schwer abschätzen. Ein in kosmogonischer Hinsicht noch wichtigerer Schluß läßt sich aber aus dem Vorkommen an sich dieser Wasserstoffverbindungen ziehen. Russell (S. 90) faßt dies zusammen: „In this case we can be quite sure that the planets have not been formed wholly by accretion of small bodies, for these would have lost the hydrogen and other light gases. *There must have been a massive nucleus from the very beginning*“¹⁾).

Nur mit Vorbehalt jedoch dürfen heute alle Untersuchungen über den mutmaßlichen inneren Aufbau der Planeten, speziell also diejenigen über die Dichtekonzentration, in kosmogonischen Versuchen verwertet werden. So läßt sich z. B. aus allgemeinen physikalischen Überlegungen, sicherer aber noch aus den Störungswirkungen der von der Kugelgestalt abweichenden Form der Planeten auf die Monde, schließen, daß *bei den äußeren Planeten die Dichtekonzentration relativ groß ist*; daß demnach bei allen Planeten die Mittelpunktsdichte von der gleichen Größe 9–10 ist, wie bei der Erde (vgl. z. B. [128]). Über den Aufbau der inneren Planeten hat Jeffreys [129] Untersuchungen angestellt; auffällig ist bei diesen vor allen das auf S. 102 erwähnte Dichtegesetz.

Von allergrößter Bedeutung für die Kosmogonie sind auch die Daten des Absatzes 2. Mindestens seit Existenz einer festen Erdkruste kann von einem merklichen Zufluß kosmischer Materie zur Erde nicht die Rede sein, ja nicht einmal in dem bescheidenen Maße unserer heutigen Meteoriten. Bis zu einem gewissen Grade, wenn auch weniger überzeugend, können

¹⁾ Von mir kursiv gedruckt. K. H.

auch paläoklimatologische Ergebnisse herangezogen werden: mindestens seit dem Kambrium, vielleicht schon vorher, ist eine erheblich größere Halbachse und Exzentrizität der Erdbahn nicht anzunehmen; Versuche, aus den Schwankungen der permokarbonen Eiszeit Rückschlüsse auf die damalige Exzentrizität zu ziehen, führten, wie auf S. 89 erwähnt, zu einer noch etwas kreisförmigeren Bahn als heute.

Versuchen wir nun, diese geophysikalischen, geochemischen, geologischen und paläoklimatologischen Ergebnisse zusammenfassend zu beurteilen:

Das Planetensystem muß bald nach seiner Entstehung „fertig“, d. h. entweder relativ schnell in den heute noch bestehenden Zustand höchster Ordnung gelangt oder in diesem überhaupt vom ersten Anfang an gewesen sein. Zahlreiche Evidenzen sprechen stark dafür, daß die Planeten uranfänglich für kurze Zeit hohe Temperaturen besaßen, aber ihre eigentliche Entstehung muß kosmogonisch gesprochen äußerst rasch erfolgt sein.

Damit haben wir das Problem an seinem einen Ende, dem heutigen Zustand, angefaßt; nun müssen wir es vom andern Ende her anpacken, nämlich dem der Suche nach einem einigermaßen übersehbaren kosmischen Prozeß, der den Anlaß zur Entstehung des Planetensystems gegeben haben könnte. Gewiß, gelegentlich wurde und wird heute noch die Meinung vertreten, dieser zweite Schritt sei gar nicht erforderlich, mit der Zurückverfolgung des jetzigen Zustandes ließe sich auch auskommen. *Aber hier wird man über den Zeitpunkt, wo die Planeten selbständige Gebilde sind, schwerlich hinauskommen.* Gerade das, was man von einer wirklichen Erklärung verlangt, nämlich die Zurückführung des komplizierten Zustandes — wie ihn das Planetensystem doch zweifellos darstellt — auf einen einfacheren, wird hier nicht erfüllt.

8. Entstehungsmöglichkeiten.

Schon auf S. 98 hatten wir für diesen zweiten Schritt die Einschränkung gemacht, nur einigermaßen wahrscheinliche und übersehbare Prozesse berücksichtigen zu wollen. Aber selbst diese Einschränkung bedarf noch einer Präzisierung: es muß auch ein dem jetzigen wenigstens einigermaßen ähnlicher Zustand im Milchstraßensystem geherrscht haben. Wenn nämlich vor den 2–3 Milliarden Jahren völlig andere Zustände geherrscht, z. B. diskrete Sterne im heutigen Sinne noch gar nicht existiert hätten, käme man mit der Betrachtung heute noch so gut bekannter kosmischer Vorgänge natürlich zu keinem Ergebnis. Dazu darf historisch bemerkt werden, daß die ersten beiden großen Versuche, der von Kant und der von Laplace, so grundverschieden sie auch sind, doch das gemeinsam hatten, aus einem mög-

lichst einfachen Grundprozeß heraus das Wesentliche ableiten zu wollen. Die meisten späteren Hypothesen machten immer kompliziertere Zusatzannahmen, ohne jedoch entscheidend vorwärts zu kommen. Dasselbe erlebten wir dann um die Jahrhundertwende mit der sog. Gezeitenhypothese; auch hier hat man, nachdem die einfache Grundannahme nicht erfolgreich war, zu immer komplizierteren Varianten Zuflucht genommen, mit demselben Mißerfolg. Ich habe aber den Eindruck, daß gerade in den letzten Jahren der Gipfel überschritten worden ist und sich die Erkenntnis durchzusetzen beginnt, daß man auch mit weiteren Komplikationen nicht mehr herausholen kann, als man a priori hineingesteckt hat. Ich führe hier z. B. Luyten [130] und Davidson [131] an, die sich beide dafür aussprachen, daß man zu *einfacheren Ansätzen zurückkehren müsse*. Wir können daher mit einiger Hoffnung auf Erfolg an unsere eigentliche Aufgabe herantreten.

Es kommen im wesentlichen drei Möglichkeiten in Betracht, die den Grundstock der heute bestehenden Hypothesen bilden:

I. Die Planeten haben eine von Anfang an selbständige Entwicklung durchlaufen.

II. Die Planeten sind durch Rotation von der Sonne abgetrennt worden.

III. Die Planeten entstanden durch Begegnung der Sonne mit einem fremden Fixstern.

Hypothese I geht auf Kant (1755) zurück, der sie in beträchtlicher Ausführlichkeit zu dem ersten vollständigen System der Kosmogonie ausgearbeitet hat, und viele Forscher haben auf ihr gefußt; Einzelheiten darüber siehe z. B. bei Nölke [132] S. 126. Die Diskussion hat nun mit Sicherheit ergeben, daß eine Herausbildung der Gesetzmäßigkeiten des Planetensystems aus einer kosmischen Meteoriten- oder Staubwolke nur dann denkbar ist, wenn dieser Wolke von vorneherein eine bestimmte Struktur vorgegeben wird. Eine solche Annahme wird heute hauptsächlich von Nölke vertreten [132] S. 207ff., der die Entstehung des Sonnensystems aus einem schwachgekrümmten, streifenförmigen Nebelarm ableitet, indem er alle Gesetzmäßigkeiten mit Ausnahme der kleinen Exzentrizitäten als schon vorhanden voraussetzt; die kleinen Exzentrizitäten hätten sich erst später durch Wechselwirkung von Strahlungsdruck und Gravitation herausgebildet.

Hypothese II ist von Laplace (1794) begründet worden (Darstellung [132] S. 150ff.) und seitdem mit mehr oder weniger glücklichen Zusatzannahmen wiederholt vorgetragen worden. Der bei den verschiedenen Modifikationen kaum sehr veränderte Grundgedanke ist die mehr oder

weniger diskontinuierliche Abschleuderung und nachfolgende Zusammenballung von Materie aus der ursprünglich bis über die Neptunbahn ausgedehnt gedachten Sonnenatmosphäre.

Für die Geschichte des naturwissenschaftlichen Fortschrittes interessant ist die Tatsache, daß auch die Hypothese III ungefähr um dieselbe Zeit wie die beiden anderen von Buffon in seiner *Histoire naturelle* (1745) durch die Annahme eines Zusammenstoßes der Sonne mit einem großen Kometen begründet wurde; sie wurde 1879 von Bickerton (Neuseeland) erneut aufgegriffen, doch erst um die Jahrhundertwende trat sie in den Vordergrund. Die Zahl der durchgearbeiteten Varianten ist hier besonders groß. Während Chamberlin und Moulton [133] dem vorbeiziehenden Stern nur eine indirekte Wirkung (Auslösung gewaltiger Eruptionen durch innere Sonnenkräfte) zuschreiben, betrachtet Jeans [98] S. 400 nur die durch Gezeitenwirkung direkt losgetrennten Massen der Sonne, nimmt Jeffreys [134], der sich anfänglich Jeans angeschlossen hatte, einen streifenden Zusammenstoß an, denkt Arrhenius [132] S. 195 an mehr oder weniger zentralen Zusammenstoß, und schließlich lassen Hörbiger-Fauth in ihrer Weltelehre den kleineren in den größeren Stern eindringen.

An Stelle einer ausführlichen Analyse der verschiedenen Möglichkeiten will ich hier einmal den Versuch machen, sie in Form einer übersichtlichen Tabelle den in Absatz 7 diskutierten Beobachtungsergebnissen gegenüberzustellen. Dabei habe ich von den drei Gruppen die mir jeweils aussichtsreichst erscheinende Hypothese ausgewählt, und zwar von I die von Nölke, von II die Laplacesche Hypothese in der ursprünglichen Form, in der ihr z. B. auch Poincaré [135] ein mathematisches Fundament zu geben suchte; bei III schien die Wahl weniger leicht; am besten erschien mir aus weiter unten ersichtlichen Gründen der Versuch von Jeffreys. Das Treffen einer solchen Auswahl ist wohl kaum bedenklich, da von den wesentlichen Einwänden gegen eine bestimmte Hypothese auch sämtliche Modifikationen betroffen werden.

Das Beobachtungsmaterial enthält 10 Spalten; die letzte ist nur zum Vergleich, da die von dem Planetensystem durchlaufene Entwicklung natürlich nicht dieselbe wie bei den Mondsystemen gewesen zu sein braucht. Die Bewertung der Übereinstimmung hat 5 Zeichen, und zwar bedeutet ++, daß der Beobachtungsbefund in überzeugender Weise aus der Grundannahme der Hypothese erklärt wird, +, daß die Erklärungsmöglichkeiten der Hypothese zwar in dieser Richtung liegen, aber nicht ohne weiteres gerade jener Befund resultieren muß, ~, daß der Befund mit der Hypothese zwar nicht in Widerspruch steht, aber aus ihr erst durch weitere Zusatzannahmen resultiert, –, daß Beobachtung und Hypothese nur durch

mehr oder weniger unwahrscheinliche Zusatzannahmen zur Übereinstimmung gebracht werden können, und schließlich, — —, daß zwischen Beobachtungen und Hypothese ein offener Widerspruch besteht. Zunächst sind nur die oberen Zeichen zu beachten, die unteren in Klammern werden später (S. 114) erklärt.

Nun zur Tabelle! Bei I finden wir viele \sim Zeichen; bei dieser Hypothese werden, wie schon gesagt, die meisten Gesetzmäßigkeiten als in dem Urnebel bereits embryonal vorgebildet angenommen. Nur die Herausbildung der kleinen Exzentrizitäten wird als Folge der Wechselwirkung von Gravitation und Strahlungsdruck gedeutet. In Spalte 8 sehen wir Minuszeichen; sie beziehen sich auf die Art der Entstehung der Körper des Sonnensystems aus einem Nebel. Welche Masse die so gebildeten Körper haben würden, ersieht man aus Gleichung (XII); sie hängt ab von Dichte und Molekulargeschwindigkeit. Sollen die entstehenden Körper klein sein, so müssen kleine c und große ρ vorausgesetzt werden. Für c können wir nicht gut einen Wert $< 10^4$ cm/sec wählen, z. B. entspräche $3 \cdot 10^3$ cm/sec der Molekulargeschwindigkeit von Eisendampf bei nur 3° abs; der wahrscheinlichste Wert dürfte zwischen 10^4 und 10^5 cm/sec liegen. Für ρ gibt Nölke als oberste Grenze 10^{-12} g/cm³ an (S. 242); das ist schon sehr groß: die Sonnenmasse homogen bis zur Neptunbahn ausgedehnt ergäbe nur eine Dichte von $5 \cdot 10^{-10}$ g/cm³; 10^{-10} g/cm³ ist also ein sehr großer Wert. Jedenfalls kommt dann ein Vergleich des Urnebels mit Nebelpartien der Milchstraße kaum in Frage, da deren Dichte die Größenordnung 10^{-25} g/cm³ hat und selbst bei starken Verdichtungen 10^{-20} g/cm³ kaum überschritten werden dürfte. Setzt man die Werte 10^4 cm/sec und 10^{-10} g/cm³ in Gl. (XII) ein, so ergibt sich eine Masse von der Größenordnung 10^{28} g, also eine immer noch größere als die Erdmasse; bei Merkur und Mars z. B. mit Massen von der Größenordnung 10^{26} – 10^{27} g kommt man zu Dichten von der Größenordnung 10^{-7} – 10^{-8} , also ganz unglaublich hoch. Die zweite und noch größere Schwierigkeit bildet das Problem, ob Körper von der Größenordnung der Erde überhaupt als Gaskugeln existenzfähig sind. Bei der Besprechung des Fixsternmodells als Gaskugel (S. 56) sahen wir nun, daß dem inneren Druck die Gravitation entgegenwirkt, die das Ganze zusammenhält, so daß bei stationären Sternen sich beide gerade ausbalancieren. Nun ist bei so winzigen Weltkörpern wie der Erde die Gravitation sehr klein, und damit in einer solchen Gaskugel Gleichgewicht bestehe, muß auch der innere Gasdruck sehr klein sein. Da nun dieser Gasdruck durch die Temperatur bestimmt wird, kann man ausrechnen, wie hoch diese sein dürfte, damit der Gasball zusammenhält (ausführlich bei Schwinner [9] S. 42 ff.). Man

Tabelle 5. Entstehungsmöglich-

	1. Rechtläufige Bahnen in gemeinsamer Ebene	2. Kleine Exzentri- zitäten	3. Abweichung des Sonnen- äquators von der unveränder- lichen Ebene	4. Umlauf- momente der Planeten und Rotations- moment der Sonne
Hypothese I	~	+	~	~
Selbständige Entstehung (Nölke)	(~)	(+)	(~)	(~)
Hypothese II	++	++	--	--
Rotationshypothese (Laplace)	(++)	(++)	(~)	(~)
Hypothese III	++	--	++	-
Begegnungshypothese (Jeffreys)	(++)	(~)	(++)	(+)

findet, daß schon eine sehr geringe Erwärmung über den absoluten Nullpunkt den kleinen Gasball auseinandertreiben müßte; eine Erwärmung, wie sie die Gaskugelerde durch die Sonnenstrahlung erführe, würde sie in kürzester Frist in alle Winde zerstäuben! Auch hier kommen wir zu dem nicht umgeharen Schluß, daß *von Anfang an ein dichter Kern vorhanden sein muß*. Daß bei solchen Verhältnissen der Strahlungsdruck die Gravitation z. T. aufheben könnte, ist völlig ausgeschlossen, somit also auch die von Nölke erwogene Abrundung der Planetenbahn durch Wechselwirkung zwischen Strahlungsdruck und Gravitation.

Die Hypothese I kann also nicht befriedigen, da bei ihr alle Gesetzmäßigkeiten bzw. die selbständigen Planetenkörper uranfänglich vorausgesetzt werden müßten, was, wie schon auf S. 106 gesagt, das Problem nicht löst.

Hypothese II steht unter dem Motto: wo viel Licht ist, ist auch viel Schatten! Denn auf der einen Seite haben wir eine unleugbar überzeugende Erklärung der meisten Gesetzmäßigkeiten, insbesondere auch der schwierigsten unter allen, der kleinen Exzentritäten. Wie aber die Abweichung des Sonnenäquators und vor allem die relativ großen Umlaufmomente der äußeren Planeten erklärt werden sollen, läßt sich kaum irgendwie verstehen. Auch die lineare Ausdehnung macht Schwierigkeiten. Aus dem auf S. 99 erwähnten Rotationsmoment einer bis zur Neptunbahn homo-

keiten des Planetensystems.

5.	6.	7.	8.	9.	10.
Rotation und Achsenneigung der Planeten	Massen, Dichten und Gestalt des Planetensystems	Lineare Ausdehnung des Planetensystems	Geophysik und Geochemie	Geologie und Paläoklimatologie	Zum Vergleich: Die Satellitensysteme
~	~	~	--	+	
(~)	(~)	(~)	(--)	(+)	
~	-	--	-	+	++
(~)	(~)	(+)	(~)	(+)	(++)
+	+	--	+	--	-
(+)	(+)	(-)	(+)	(~)	(-)

genen Sonne folgt nämlich, daß diese sehr stark nach dem Innern verdichtet gewesen sein mußte — die Atmosphäre kann noch nicht 1% der Sonnenmasse enthalten haben. Ob aber ein Zwergstern sich eine derart ausge dehnte Atmosphäre „leisten“ kann, ist mehr als fraglich; die größten Sterne, wie Antares, haben nur eine Ausdehnung bis über die Marsbahn hinaus und dazu mehr als die 10fache Sonnenmasse. Die nicht ohne weiteres ersichtliche diskontinuierliche Abschleuderung hat zwar Poincaré [135] Nr. 22 verständlich zu machen versucht; die Zusammenballung zu Planeten ist aber fast noch schwieriger vorzustellen als die bei Hypothese I betrachtete Zusammenballung aus Nebelmaterie. Werfen wir aber einen Blick auf die zum Vergleich gegebene Spalte 10, so müssen wir der Rotationshypothese einen unaufholbaren Vorsprung zugestehen. Gerade die merkwürdige Achsenlage des Uranus, sonst für alle Hypothesen eine äußerst harte Nuß, gibt uns hier einen an Gewißheit grenzenden Aufschluß, daß die regulären Satelliten kaum anders als durch Rotation aus dem Planetenkörper entstanden sein können.

Auch die Gruppe III hat bestechende Vorzüge. Zwar klappt zwischen ihr und den ersteren ein tiefer „weltanschaulicher“ Abgrund; denn, da nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung eine derartig nahe Begegnung, in unserem Falle ein streifender Zusammenstoß, nur alle 10^9 Jahre einmal in einem Sternsystem vorkommt, wäre unser Planetensystem viel-

leicht das einzige im Milchstraßensystem — aber da wir ja keine anderen kennen, darf man daraus der Hypothese keinen Strick drehen. Spalte 1 läßt sich gut erklären, Spalte 3 bildet das Glanzstück der Hypothese; sie ist ferner die einzige, die eine auch quantitativ annehmbare Erklärung der schnellen Rotation der Planeten gibt. Auch Spalte 8 läßt sich damit befriedigender als bei I und II erklären. Die lineare Ausdehnung ist allerdings auch hier recht schwer plausibel zu machen [127] S. 118, und auch die Energie des begegnenden Sternes ist noch immer nicht ausreichend, die großen Momente der Planeten zu erklären [127] S. 114. Erst wenn die relative Geschwindigkeit dieses Sternes > 100 km/sec wird, kann eine Übereinstimmung erzielt werden; ein solcher Wert ist aber unter 1000 Sternen höchstens einmal zu finden, also ungemein unwahrscheinlich. Die wirklich ernsthaften Schwierigkeiten sind jedoch in Spalte 2 und 9 zu finden. Die ursprünglichen Bahnen werden auf jeden Fall stark exzentrisch gewesen sein, ihre Abrundung soll in der zu Planeten nicht zusammengeballten, als widerstehendes Mittel wirkenden Materie erfolgt sein. Die Masse des Mittels müßte mindestens die Größenordnung der Planetenmassen gehabt haben. Seine Existenz läßt sich vor allem bei der Hypothese von Jeffreys, wo neben dem eigentlichen Flutband, das die Planeten bildete, eine große Menge Gas aufgewirbelt wird, auch gewiß plausibel machen. Wie nun die rechnerische Prüfung ergibt, kann eine wirksame Exzentrizitätsverminderung nur bei entsprechender Massenzunahme des Planeten erfolgen; in einzelnen hängt dies noch von der Dichtekonzentration des Mittels ab, das die Bahn um so wirksamer abrundet, je stärker es nach der Sonne zu konzentriert ist. Außerdem werden dabei die großen Halbachsen der Bahn stark verkleinert; sie müssen günstigstenfalls anfänglich mindestens das 3–5fache der heutigen betragen haben. Noch schwieriger zu beantworten ist die Frage nach dem Verbleib des Mittels, denn wenn es sich mit der Sonne vereinigt hätte, müßte deren Rotation viel schneller sein, und nach außen kann es sich kaum verflüchtigt haben. Auch mit Spalte 9 besteht ein unlösbarer Widerspruch, finden wir doch bis zu den ältesten Schichten keinerlei kosmischen Zufluß, den ein solches Mittel doch in beträchtlicher Menge, ja einen von der Größenordnung der ganzen Erdmasse, hätte liefern müssen. Durch neuere Untersuchungen von E. W. Brown können zwar stärkere Exzentrizitätsänderungen im Laufe von 10^6 Jahren auch durch rein gravitative Wirkungen erfolgen; sie sind aber ein Ausnahmefall, und die Wahrscheinlichkeit, daß dies bei allen Planeten eingetreten sei, ist praktisch gleich Null. Die Entstehung der Monde durch starke Gezeitenwirkungen der Sonne bei den ursprünglich stark exzentrischen Bahnen wird heute nicht mehr ernstlich erwogen.

Macht man den Versuch, sich zu einem abschließenden Urteil aufzuraffen, so lassen sich bei II und III zwar beachtliche Möglichkeiten erkennen, aber vor allem die Schwierigkeit der Umlaufsmomente im ersten, die der Abrundung der Bahnen im zweiten Falle, zu denen sich jeweils verschiedene andere hinzugesellen, sind doch zu groß, als daß man sich mit Bestimmtheit für einen der beiden Wege entscheiden könnte.

Der nächste Schritt wäre die Frage nach etwa nicht in Betracht gezogenen Kräften, deren Berücksichtigung die Schwierigkeiten vielleicht mildern könnte. Ähnlich wie in I kann man auch bei II und III den Strahlungsdruck hinzunehmen, wie dies bei II z. B. Berlage [136] und bei III Ross Gunn [137] versucht hat. Auch elektrische Kräfte, wie sie bei II Birkeland [132] S. 172 heranziehen wollte, wären zu erwägen. Alle solche Versuche scheiterten aber letzten Endes daran, daß diese Kräfte zu gering sind, um das Energieproblem wesentlich abzuändern. Die Schwierigkeiten der Annahme der Abtrennung und noch mehr derjenigen der späteren Zusammenballung der Planeten bei II ließe sich höchstens dadurch beheben, daß man eine ruckweise, mehr oder weniger katastrophale Abschleuderung annimmt, bei der von Anfang an ein dichter Kern besteht, um den sich die weitere Zusammenballung vollziehen könnte. Wie dies aber bei einer solch dünnen Atmosphäre von 10^{-14} g/cm³ Dichte möglich sein soll, ist nicht ersichtlich. Auch ein stärker beachteter Abänderungsversuch von III, wie ihn Lyttleton [138] vorgeschlagen hat, nämlich die Entstehung der Planeten durch Zusammenstoß eines früheren Begleiters der Sonne mit einem fremden Stern, hat sich nicht behaupten können [139].

Auch die Zuhilfenahme weiterer Sterne, also z. B. die Annahme, das Sonnensystem sei zu einer Zeit entstanden, als die Sonne in einem Sternhaufen stand oder als überhaupt die Sterne im Milchstraßensystem noch viel näher beieinander standen (S. 71), zerstört mehr, als sie aufbaut: wie sollte ein System höchster Ordnung aus einem Chaos heraus entstehen können? Im Gegenteil: wir können mit Gewißheit sagen, daß seit der Entstehung des Planetensystems kein fremder Stern in unmittelbare Nähe (d. h. in weniger als etwa 3 Neptunweiten) gekommen ist.

Wenn so nach fast 200jährigen Bemühungen die Kosmogonie zu dem Ergebnis kommt, daß das Planetensystem, zum mindesten so, wie es heute ist, eigentlich gar nicht entstehen konnte, so kann hier der Ausweg kaum im Suchen nach einer noch komplizierteren Möglichkeit gefunden werden. Könnte, so müssen wir uns vielmehr fragen, das Planetensystem in einer *von der heutigen verschiedenen Form* entstanden sein? Einen ersten Fingerzeig gaben uns die 3 Satellitensysteme: sie zeigten alle drei ganz erheblich kleinere relative lineare Dimensionen. Kehren wir nun zur Tabelle zurück

und fragen erneut: könnte dann unser Planetensystem entstanden sein, wenn es, sagen wir, rund 10mal enger wäre? Schon der erste Blick auf die eingeklammerten Zeichen sagt uns, daß wir in der erhofften Richtung sind; denn Spalten 4 und 7, die einzigen, die bei II und III gleichzeitig Minuszeichen zeigten, würden diese dadurch verlieren. Wenn wir nach den Kräften fragen, die das ursprüngliche Planetensystem auszudehnen imstande waren, gibt es nur eine Antwort: die Sonne hat einen wesentlichen Teil ihrer Masse verloren, und in gleichem Maße ist nach Gl. (XV) das Planetensystem ausgedehnt worden. Der Gedanke an ein anfänglich wesentlich engeres Planetensystem ist hier nicht zum ersten Male geäußert worden; er findet sich z. B. bei Kopal [140], der ihn aber sogleich wieder aufgibt, weil eine wesentliche Ausdehnung des Planetensystems in $2 \cdot 10^9$ Jahren auch heute eine jährliche Vergrößerung des Erdbahnradius um 70 m mit sich brächte, was nicht hätte unbemerkt bleiben können (S. 78). Es kommt also nur eine diskontinuierliche Ausdehnung, d. h. ein diskontinuierlicher Massenverlust, in Betracht und wir werden so, ohne danach gesucht zu haben, dazu geführt, den Gedanken von S. 93 wieder aufzunehmen. Ist die Sonne vor 2-3 Milliarden Jahren ein Riesenstern mit $10 M_{\odot}$ gewesen, so war ihr Rotationsmoment 10fach größer und die Planeten standen 10mal näher bei ihr, ihr Umlaufmoment war daher $\sqrt{10}$ mal kleiner; also das heutige Verhältnis 6% (S. 99) war dann $6\% \cdot 10^{3/2}$, d. h. rund 200%, und das Mißverhältnis ist verschwunden. Ferner wird, wenn wir zunächst Hypothese II weiterverfolgen, die lineare Ausdehnung des Systems nicht wesentlich über die Marsbahn hinausgehen, und Riesensterne, die solche Ausdehnung haben, sind interferometrisch gemessen worden, z. B. Beteigeuze, Antares und andere. Die Dichten in den äußeren Schichten dieser Sterne sind von der Größenordnung 10^{-7} – 10^{-8} g/cm³, ließen also Zusammenballung mit Massen von Planetengröße eher zu als solche von 10^{-14} g/cm³. Auch wäre eine diskontinuierliche Abschleuderung von Materie mit von Anfang an dichterem Kern hier eher verständlich. Bei II verbliebe also nur noch Spalte 3. Laplace hatte versucht, diese Achsenverlagerung durch Zusammenstöße der Sonne mit Kometen zu erklären, was bei der damals noch nicht bekannten äußerst geringen Masse der Kometen annehmbar erschien. Man kann aber nicht, wie analog bei Buffon, einfach an Stelle des Kometen einen fremden Stern setzen — der hätte zunächst einmal das Planetensystem zerstört. Eine andere Möglichkeit ergibt sich jedoch im Anschluß an das auf S. 86 Gesagte: es wird zumeist angenommen, daß beim Novaphänomen die Massenabstoßung kugelsymmetrisch erfolgt, doch bemerkt Stratton [72] S. 684 mit Recht, daß dies nur eine vereinfachte Annahme sein kann, die mit verschiedenen spektroskopischen

Beobachtungen nicht im Einklang steht und die in der Tat bei wirklichen Sternen, in denen Rotationsunterschiede, Konvektionsströmungen (S. 64) usw. auftreten, nur angenähert erfüllt sein wird. Erfolgt nun aber die Massenabstoßung nicht kugelsymmetrisch, so wird eine Achsenverlagerung eintreten. Da bei den ersten Ausbrüchen der Riesen Sonne ein Massenverlust von der Größenordnung der heutigen Sonnenmasse erfolgte, ist auch bei nicht sehr starker Abweichung von kugelsymmetrischer Massenabstoßung eine Achsenneigung von einigen wenigen Graden nicht unvorstellbar.

Auch Hypothese III geht nicht leer aus. Die Hauptschwierigkeit der Spalte 2 war bei dieser Hypothese die Frage nach der weiteren Entwicklung bzw. dem Verbleib des widerstehenden Mittels. Sie wird von der Novahypothese ohne Schwierigkeit beantwortet: bereits der erste auf die Entstehung des Planetensystems folgende Novaausbruch, der eine Masse von der Größenordnung der heutigen Sonnenmasse mit 1000 km/sec in den Weltraum hinausstieß, trieb das Mittel stark zurück und die weiteren Ausbrüche setzten dies fort. Die relativ große Exzentrizität der Merkurbahn könnte sehr einfach dadurch erklärt werden, daß das Mittel aus der intramerkuriellen Zone schon beim ersten Ausbruch restlos verdampft und vertrieben wurde, bei den übrigen Planeten erst später, so daß Merkur eben nur $1-2 \cdot 10^8$ Jahre Zeit hatte, seine Bahn abzurunden. Auch die Schwierigkeiten der Spalte 9 würden dann behoben. Die Schwierigkeiten des Energieproblems sind völlig verschwunden, die mittlere relative Geschwindigkeit von ~ 20 km/sec würde bei weitem ausreichend sein. Schwer zu erklären wäre allerdings auch hier die lineare Ausdehnung, die wegen der stark exzentrischen Bahnen selbst im günstigsten Falle das 3-5fache der ursprünglichen abgerundeten betragen mußte, d. h. der fremde Stern mußte also die losgerissenen Massen bis mindestens zur heutigen Saturnentfernung mitführen und dann seitlich loslassen, während er sich selbst geradlinig fortbewegte, „which is indeed a hopeless puzzle“ [127] S. 118.

Versucht man nun hier abermals ein zusammenfassendes Urteil, so dürfte ein *starker Massenverlust der Sonne seit Entstehung des Planetensystems ein ziemlich sicheres Resultat sein*, ohne dessen Zugrundelegung jeder kosmogonische Versuch aussichtslos ist. Dies vorausgesetzt, kommen in engere Wahl zwei Hypothesen, die von Laplace und die von Jeffreys. Die Tatsache, daß wir in den Mondsystemen eine Anwendung der Rotationshypothese ziemlich sicher vor uns haben, bei der Gezeitenhypothese aber kein solches Analogon, im Gegenteil noch verschiedene ungelöste Schwierigkeiten, gibt der Rotationshypothese einen gewissen Vorsprung.

Die unerläßliche Voraussetzung bei ihr ist aber die diskontinuierliche Abstoßung diskreter Massen. Da wir jedoch bei der Entstehung der Satelliten ohnehin in diesen sauren Apfel beißen müssen, ginge das in einem hin. An dieser Stelle könnte der Gegner der Rotationshypothese den letzten Trumpf ausspielen: die Analogie zwischen dem Planetensystem und den Satellitensystemen sei doch nur eine bedingte, da die Planeten sehr schnell rotieren, die Sonne sich aber sehr langsam um ihre Achse dreht, was in der Tat im Hinblick auf Massenabschleuderung schwerwiegend erscheint. Wie wir aber auf S. 63 sahen, nimmt die Rotation der Sonne wahrscheinlich nach innen sehr schnell zu; und wenn wir bedenken, daß die Dichtekonzentration in der Sonne relativ groß ist (S. 60 nach dem Eddington-Modell $\rho_c/\rho_m = 54$), so dürfen wir annehmen, daß *der Hauptteil der Sonnenmasse sich in erheblich schnellerer Rotation befindet als die Oberfläche*. Somit würde also auch die letzte Diskrepanz zwischen Planetensystem und Satellitensystemen erheblich verkleinert.

Viertes Kapitel.

Das System Erde—Mond.

9. Allgemeines und Einfanghypothese.

Es gibt in der Naturwissenschaft eine große Zahl Paradoxa. Daß wir gerade bei dem nächsten Planeten Venus als einzigem über die Rotation noch nichts Sicheres wissen, klingt zunächst paradox, und noch mehr vielleicht, daß derjenige Mond, über dessen Werdegang wir am meisten im Zweifel sind — kein anderer als unser eigener ist! Das System Erde-Mond bildet nämlich in verschiedener Hinsicht einen Ausnahmefall im Kosmos. Freilich, was die Masse des Mondes anbetrifft, ist er bei weitem nicht der größte im Planetensystem. Neptuns Riesenmond Triton hat die 5fache Mondmasse; aber auch in den regulären Systemen Jupiters und Saturns sind 3 Monde größer als er. Auch in bezug auf die Dichte spielt der Erdmond keine Ausnahmestelle. Dagegen das Massenverhältnis Mond:Planet ist bei ihm mit $1/81$ bei weitem das größte im Planetensystem, während bei den regulären Monden das größte Titan:Saturn nur $1/4000$ ist; doch läßt das große Verhältnis Triton:Neptun $\sim 1/300$ die Ausnahmestelle weniger kraß erscheinen. Noch viel deutlicher wird die Sonderstellung, wenn man das Verhältnis Umlaufmoment des Mondes zum Rotationsmoment der Erde berechnet; es ergibt sich bei homogen gedachtem Erdkörper zu $4/1$, in Wirklichkeit zu $5/1$; dagegen bei Triton:Neptun zu $1/3$ und in weitem Abstand bei Titan:Saturn zu weniger als $1/100$. Allerdings müßte

man die Dichtekonzentration kennen. Wäre z. B. Neptun nach dem bei Planeten allerdings unwahrscheinlichen Gaskugelmodell mit sehr großer Dichtekonzentration aufgebaut, könnte Tritons Umlaufsmoment Neptuns Rotationsmoment gar übertreffen. Nun haben wir schon auf S. 100 zwei offenbar verschiedene Mondtypen kennen gelernt, und zwar die regulären und irregulären, welche letztere in der Hauptsache durch rückläufigen Umlauf gekennzeichnet sind; bei einigen anderen, z. B. dem Saturnmond Japetus, ist die Zugehörigkeit zu einer der beiden Gruppen nicht eindeutig, und hierzu gehört in erster Linie auch der Erdmond. Bei der Erklärung der regulären Monde hat, wie bereits mehrmals hervorgehoben, die Rotationshypothese unaufholbaren Vorsprung. Bei den irregulären Monden, so insbesondere auch dem Neptunmond, kommt sie nicht in Betracht. Zu ihrer Erklärung wird im allgemeinen angenommen, daß sie „eingefangen“ worden seien. Entgegen einer vielfach verbreiteten Meinung, die das Einfangen als normalen Fall hinstellen möchte, sei hier mit Entschiedenheit betont, daß die Wahrscheinlichkeit dafür äußerst gering ist und man daher mit der Anwendung der Einfanghypothese sehr vorsichtig sein muß (vgl. [132] S. 306ff.). Denn ein aus größerer Entfernung sich einem Planeten näherender Körper dringt im allgemeinen mit in bezug auf diesen Planeten hyperbolischer Geschwindigkeit in dessen Anziehungsbereich ein und wird ihm daher, nachdem er lediglich eine mehr oder weniger große Bahnstörung erlitten hat, wieder enteilen. Nur die Einwirkung eines widerstehenden Mittels könnte die Wahrscheinlichkeit, daß der Planet den Körper als Mond festhält, erhöhen. Ein solcher Fall könnte vielleicht beim Neptunmond eingetreten sein und zwar kommt nach Nölke als widerstehendes Mittel die ursprünglich stark ausgedehnte Atmosphäre des Planeten in Betracht, die auch die anfänglich stark exzentrische Bahn zu der fast kreisförmigen heutigen abrundete. Dieser unmittelbar nach der Entstehung eingefangene Riesenmond mit seiner Merkur um das Doppelte übertreffenden Masse verhinderte, wie Nölke S. 311 vermutet, vielleicht die Bildung eines regulären Satellitensystems¹⁾. Die gleiche Annahme für den Erdmond zu machen, wäre nur dann erwägenswert, wenn die Erde eben ein Neptun wäre; bei ihrer kleinen Dimension ist ein solcher Einfang und erst recht eine Abrundung der exzentrischen Bahn schwer vorstellbar. Es wird daher heute eine von *Anfang an selbständige Existenz des Erdmondes allgemein*

¹⁾ Außergewöhnlich interessant ist aber die von Lyttleton [142] erwogene Möglichkeit, daß Triton und Pluto ursprünglich zwei rechtläufige, also reguläre, Monde Neptuns waren, die in ungefähr derselben Entfernung diesen umkreisten, dann zusammenstießen, wobei der eine hinausgeworfen und der andere rückläufig wurde.

nur dann als diskutierbar betrachtet, wenn Erde und Mond schon im Urzustand als Geschwister einander benachbart waren. Eine solche Lösung wird aber mit Recht als unbefriedigend betrachtet, denn sie wirft neue Fragen auf, anstatt gestellte zu beantworten. Wir müssen daher mutatis mutandis dieselbe Frage stellen wie im Planetensystem — ob nämlich der jetzige Zustand noch der ist, in dem das System entstand, oder ob Kräfte angegeben werden können, die es verändert haben.

10. Die Rotationshypothese.

Schon beim Planetensystem sahen wir, daß die Rotationshypothese diskutierbar wird, wenn das System anfänglich viel kleiner war als jetzt; die spätere Vergrößerung erfolgte durch Massenverlust der Sonne. Bei der Erde ergibt sich nun eine ganz andere Möglichkeit, die Mondbahn zu erweitern, und zwar die von G. H. Darwin begründete und in weitem Umfange auf die Kosmogonie angewandte Theorie der *Flutreibung* (vgl. dazu [141]). Sie führt zu dem Schlusse, daß bei den jetzigen Verhältnissen des Systems die Länge des Tages dauernd zunehmen muß, die Schiefe der Ekliptik langsam größer wird und schließlich der Mond sich von der Erde entfernt. Ein beobachtungsmäßiger Nachweis kann bei der Kleinheit der zu erwartenden Beträge nur hinsichtlich der Länge des Tages erhofft werden, und in der Tat ist eine Verlängerung des Tages aus der sog. säkularen Beschleunigung des Mondes nachweisbar. Aus den Beobachtungen ergibt sich nämlich, daß im Laufe eines Jahrhunderts der Mond ungefähr 10 Sekunden voreilt; daraus läßt sich berechnen, daß die Länge des Tages zunimmt, und zwar so, daß der letzte Tag eines Jahrhunderts nicht ganz 1/1000 sec länger ist, als der erste. Das gäbe, in geologische Zeiten umgerechnet, eine Stunde in $3 \cdot 10^8$ Jahren. Die Schiefe der Ekliptik, deren Anfangswert Darwin auf $\sim 11^\circ$ abschätzt, nähme dann zu, ungefähr 1° in $5 \cdot 10^8$ Jahren. Die Untersuchungen von Jeffreys führten nun zu dem bemerkenswerten Resultat, daß der wesentliche Teil dieser Flutreibung nicht, wie man erwarten könnte, von den Gezeiten des Erdkörpers oder der tiefen Ozeane, sondern gerade von den Flachgewässern geliefert wird, und zwar verursacht die Behringsee allein etwa $\frac{2}{3}$ der gesamten Bremsung. Eines der wichtigsten kosmogonischen Teilgebiete ist daher buchstäblich eine rein paläogeographische Angelegenheit! Daß das kosmogonische das paläogeographische Geschehen beeinflußt hat, ist einleuchtend; daß aber umgekehrt das paläogeographische Geschehen die Geschichte des Systems Erde—Mond maßgebend beeinflussen konnte, erscheint auf den ersten Blick doch recht merkwürdig! Daraus ersieht man aber sofort, daß eine Zuordnung einer bestimmten Tageslänge zu einem geologischen Zeitalter nicht möglich ist,

da wir über die Verteilung flacher Gewässer in den für diesen Zweck erforderlichen Einzelheiten natürlich nichts aussagen können. Eines ist aber ziemlich sicher: daß der Gegensatz zwischen Kontinent und Ozean in seiner heutigen Schärfe erst ein Produkt der Tertiärzeit ist, und vorher im allgemeinen mit weit ausgedehnteren Flachseebildungen zu rechnen ist. Ferner nimmt die Wirkung der Gezeitenreibung nach den Polen hin ab, äquatoriale flache Gewässer werden daher entsprechend stärker wirken als z. B. die im hohen Norden liegende Behringssee. Ob der Bremsfaktor gelegentlich zu dem 10- oder gar 100fachen des heutigen anwachsen konnte, läßt sich freilich nicht sagen; der Schluß aber, daß z. B. im Karbon der Tag um wesentlich mehr als 1^h kürzer und die Schiefe der Ekliptik um mehr als 1° kleiner waren als heute, ist unvermeidlich. Eine kleinere Schiefe der Ekliptik erhöht die zonalen Gegensätze, schwächt jedoch die Jahreszeitenkontraste erheblich ab. Eine kleine Tageslänge mildert die Temperaturgegensätze zwischen Tag und Nacht. Eine Vergrößerung der Rotationsgeschwindigkeit hat aber auf die meteorologischen Einzelphänomene entscheidenden Einfluß; denn alle Bewegungen der Luft und des Meeres werden durch die sog. Corioliskraft der Erdrotation abgelenkt, und zwar auf der Nordhalbkugel nach rechts, auf der Südhalbkugel nach links. Um zu einer Gesamtvorstellung über die klimatologischen Konsequenzen zu kommen, müssen wir aber noch die Stärke der Sonnenstrahlung kennen. War diese in der auf S. 87 auseinandergesetzten Weise stärker als heute (z. B. im Mesozoikum $\sim 4\%$, im Paläozoikum 8–10%), so konnten tatsächlich sehr milde Klimate mit ausgeglicheneren Jahreszeitenkontrasten bestehen. Auch hier ist jedoch, ähnlich wie auf S. 39, mit der Möglichkeit zu rechnen, daß eine Auswirkung dieser Veränderungen im eisfreien bzw. glazialen Polarklima sehr verschieden sein kann. Gerade eine kleinere Schiefe der Ekliptik könnte im eisfreien Klima die klimatischen Gegensätze mildern, dagegen im glazialen die Kontraste vermehren.

Wir können nun diese Rechnung zurückverfolgen, bis der Mond in unmittelbarer Nähe bei der Erde stand. Was davor liegt, ist nicht ohne weiteres rechnerisch erfaßbar. Wer aber nicht die völlig unbefriedigende Annahme machen will, Erde und Mond hätten von Anfang an selbständig nebeneinander bestanden, wird die *Ablösung des Mondes von der Erde* nicht von der Hand weisen können. Wir können aber, zunächst ganz unverbindlich, einmal eine Überschlagsrechnung anstellen, ob der Ablösungsvorgang auch quantitativ möglich wäre. Das Nächstliegende ist ein Vergleich der Dichten. Diese ist beim Mond erheblich geringer als bei der Erde; die Abtrennung kann daher nicht zu der ersten Zeit einer vollständigen Durchmischung, sondern erst, nachdem die chemische Differen-

tiation mindestens bereits im Gange war, erfolgt sein. Näher an das Problem heran führt uns die bekannte Tatsache, daß dem Gesamtmoment des Systems nichts verloren gegangen sein kann, d. h. also, die Summe des Umlaufmomentes des Mondes und des Rotationsmomentes der Erde muß, falls keine äußeren Kräfte eingewirkt haben, konstant und gleich der jetzigen sein. Würde diese Summe, die also vor der Mondablösung das ursprüngliche Rotationsmoment der Erde gewesen sein muß, ausreichen, um die Erde zur Rotationsinstabilität zu bringen? (Vgl. dazu [9] S. 303ff.) Die Antwort ist klar negativ. Die Erde würde nur ein stark abgeplattetes Rotationsellipsoid werden. Die Sachlage wird allerdings etwas günstiger, wenn man, wie schon Darwin, annimmt, die Wirkung der Sonnengezeiten habe die Ablösung durch *Resonanz* ermöglicht. Tritt nämlich die Periode der Sonnengezeiten in ein rationales Verhältnis zur freien Grundschiwingung (im günstigsten Falle 1:1), so wird eine gewaltige Verstärkung des Gezeitenhubes ermöglicht. Aber auch dann ergibt die Durchrechnung, daß es zur Massenabtrennung nicht ausreicht; das Rotationsmoment ist immer noch fast 3mal zu klein. Das Problem ist nun sehr klar umrissen: kann seit der mutmaßlichen Ablösung des Mondes das Rotationsmoment der Erde irgendwie durch eine *außerhalb* des Systems Erde—Mond liegende Kraft verkleinert worden sein? Hierfür können lediglich die Sonnengezeiten in Frage kommen. Rechnet man aber aus, wieviel sie in den seit dieser Zeit verflossenen 1·5–2 Milliarden Jahren dem Rotationsmoment der Erde entzogen haben können, so kommt man zu der Größenordnung 10%, was nur einen Tropfen auf einen heißen Stein bedeutet. Schwinner zieht daraus den *unvermeidlichen Schluß, daß die Entfernung Erde—Sonne früher kleiner gewesen sein muß*. Eine solche Abstandsänderung kann nur durch Massenverlust der Sonne zustande kommen¹⁾, und wir haben somit ein weiteres sehr beweiskräftiges Argument für solaren Massenverlust. Die Gezeitenreibung G ist gegeben durch:

$$G = \alpha \left(\frac{M}{m} \right)^2 \frac{r^9}{R^6} .$$

Hier ist α ein Proportionalitätsfaktor, und im Falle Erde—Sonne bedeutet M die Sonnenmasse, m die Erdmasse, r den Erdradius und R die Entfernung Erde—Sonne. Man sieht, daß R mit der sechsten Potenz eingeht; bei Merkur z. B., dessen mittlerer Abstand nur etwa $\frac{1}{3}$ des Erdbabstandes

¹⁾ Nach den Erfolgen der Darwinschen Flutreibungstheorie beim System Erde—Mond glaubte man anfänglich, daß diese auch zur Erklärung einer Abstandsvergrößerung aller Planeten von der Sonne benutzt werden könnte. Die rechnerische Nachprüfung (vgl. [132] S. 63) ergibt jedoch, daß eine merkliche Abstandsvergrößerung in 10^9 Jahren nicht erfolgt sein kann.

ist, konnte so die Gezeitenreibung 700mal stärker wirken, womit die völlige Abbremsung seiner Rotation sofort verständlich wird. Schätzen wir nun ab, wie groß die Abstandsvergrößerung und somit der solare Massenverlust in unserem Falle sein müßte, so kommen wir zu ungefähr 30 %, falls die Sonnenmasse gleichmäßig abgenommen hätte, und zu erheblich höheren Werten, wenn, wie im Falle der Sternentwicklung, die Masse proportional M^3 abnimmt. Dies stimmt auch quantitativ mit unseren obigen Abschätzungen überein. Hatte die Erde anfänglich ein etwa 3mal größeres Rotationsmoment, so konnte in der Tat Ablösung des Mondes erfolgen. Wir kommen also auch hier zum Ergebnis einer bei den Massen des Planetensystems anfänglich wahrscheinlich sehr schnellen Rotation, die bei den inneren Planeten im Laufe der Zeit stärker abgebremst wurde, bei den äußeren aber (mit Ausnahme Neptuns) infolge größerer Sonnenentfernung keine so starke Einbuße erlitt.

Bei Merkur haben, wie bereits gesagt, die Sonnengezeiten ausgereicht, die Rotation völlig abzubremesen.

Dagegen ergibt die Rechnung bei der Venus [4] S. 275, daß eine derartige Rotationsverzögerung von einer anfänglich schnellen Rotation zu ihrem heutigen Werte (es werden zur Zeit Werte zwischen 20 und 30 Tagen als am wahrscheinlichsten angesehen) bei der heutigen Stärke der Sonnengezeiten nicht möglich ist. Wenn man also nicht die reichlich gekünstelte Annahme machen will, daß bei der allgemein raschen Anfangsrotation nur Venus eine Ausnahme machte, so bleibt nichts übrig, als *auch für Venus eine anfänglich geringere Sonnenentfernung vorauszusetzen*¹⁾. Eine weitere Wirkung der abbremsenden Kraft der Sonnengezeiten sehen wir, wie schon Darwin [141], S. 288 vermutete, vielleicht bei dem Marsmond Phobos, der seinen Umlauf in 7³ Stunden um den Mars vollendet, während Mars selbst in 24⁶^h rotiert. Das ist mit der Rotationshypothese nur dann vereinbar, wenn Mars früher mit dieser Geschwindigkeit oder gar schneller rotierte und durch die Sonnengezeiten so stark abgebremst wurde. Auch hier gilt das bei der Erde Gesagte, daß nämlich eine derartige Abbremsung nur bei einer anfänglich stärkeren Wirkung der Sonnengezeiten erfolgt sein kann. Allerdings wäre nicht völlig ausgeschlossen, daß die winzigen Satelliten des Mars (Durchmesser 10 km) eingefangene Planetoiden sind;

¹⁾ Lyttleton [144], dessen Ideen sich durch reizvolle Originalität auszeichnen, hat kürzlich im Zusammenhang mit der langsamen Venusrotation sogar die Möglichkeit erwogen, daß Merkur ehemals Venusmond gewesen sein könnte und als solcher die Rotation stark abgebremst hätte. Doch würde dies mehr Fragen auf, als es allenfalls löst, und können wir solcher Hypothesen mit guten Gründen entbehren.

die Wahrscheinlichkeit hierfür ist allerdings sehr gering, da die Mondbahnen fast genau in der Äquatorebene des Planeten liegen.

Die Rotationszeit des Neptun, die mit 16^h merklich größer als die der übrigen großen Planeten (10^h) ist, kann kaum anders als durch Gezeitenbremsung des großen rückläufigen Mondes erklärt werden.

11. Geologische Konsequenzen.

Wir waren bei diesem Problem von außen nach innen vorgedrungen, hatten zunächst den Mond als ursprünglich weitentfernten selbständigen Planeten betrachtet und waren dann zu dem Ergebnis gekommen, daß er nur dann selbständig gewesen sein kann, wenn er schon von Anfang an in unmittelbarer Nähe der Erde war, und wir wagten dann den weiteren Schritt der Annahme einer Ablösung von der Erde, der auch erfolgreich ist, wenn die Sonne Masse verloren hat. Nun kommt der vierte und letzte Streich: wir wollen nachsehen, ob auf unserer Erde selbst Anhaltspunkte für die Annahme der Mondabtrennung zu finden sind (vgl. dazu vor allem [9] S. 312ff.). Wir lernten schon auf S. 27 einen etwas verschiedenen Aufbau der Erdkruste kennen, der sich am deutlichsten in dem Gegensatz des Pazifik zur übrigen Erdoberfläche zeigt. Über dem Pazifik fehlt die Sialdecke, und die fehlende Masse könnte auch quantitativ gut die Mondmasse geliefert haben, so daß diese erstmalig von Pickering [145] vorgebrachte Erklärung manches für sich hat. Gegen sie schien aber die Überlegung zu sprechen, daß zur Zeit der Mondablösung die Erdkruste kaum völlig erstarrt gewesen sein konnte, und somit ein solches Loch durch nachfließendes Material relativ schnell wieder ausgeglichen wäre; dies ist ein Vorgang, der allein durch die mehr als millionenfach stärkere Gezeitenreibung bewirkt werden mußte. Schwinner, S. 316, macht dafür, daß die Wunde nicht völlig verheilt ist, Konvektionsströmungen im freigelegten Sima verantwortlich. Daß die Abrißwunde nicht genau symmetrisch zum Äquator liegt, erklärt er durch die oben erwähnte Resonanzwirkung der Sonnengezeiten, so daß der Mond also im „Winter“ geboren wurde; daher ist auch heute noch auf der Südhalbkugel weniger Land als auf der Nordhalbkugel. Weiter ist eine gewaltige Erwärmung durch die Reibungsarbeit der anfänglich viele Millionen mal stärkeren Gezeitenkräfte in Rechnung zu ziehen, die den Fortgang der Abkühlung und chemischen Differentiation eine Zeitlang aufhielt. Allerdings ist die anfängliche Erweiterung der Mondbahn sehr schnell erfolgt, z. B. entfernte er sich von 3 Erdradien, wo die Gezeitenreibung $20^8 = 64$ Millionen mal stärker war, zu 6 Erdradien in weniger als 1000 Jahren, so daß der Mond, der sich heute im Jahr 1·5 cm von der Erde fortbewegt, dies damals mit 20 km pro Jahr,

d. h. mehr als eine Million mal schneller, vollführte. Aber nicht nur die ursprüngliche Ablösungsstelle hat sich als Pazifikbecken erhalten; Schwinner untersucht weiterhin, ob nicht auch andere Vorgänge auf der Erdoberfläche, nicht zuletzt die Gebirgsbildungsperioden, irgendwie mit der Geschichte des Mondes einen Zusammenhang haben könnten. Die freie Schwingung des Erdkörpers beträgt im Falle der Flüssigkeit $\sim 1 \cdot 5^h$, im Falle elastischer Festigkeit $\sim 1^h$. Tritt nun Rotationsverzögerung der Erde ein, so werden immer wieder Zeiten eintreten müssen, in denen die Periode der Gezeiten mit der freien Schwingung in ein rationales Verhältnis kommt, und hier wird die Gezeitenwirkung durch Resonanz gewaltig verstärkt, ähnlich, wie wir ja die Mondablösung mit einer solchen Resonanzwirkung in Verbindung brachten. Nun bedeuten Gebirgsbildungsperioden in ihrem episodischen und universellen Auftreten sehr wahrscheinlich den Umsturz eines irgendwie instabil gewordenen Zustandes des Erdballs. Kaum eine Hypothese konnte dieses episodische und universelle Auftreten der Orogenesen wirklich überzeugend erklären, und so liegt der Gedanke, daß diese mit den Hauptresonanzen der Mondgezeiten parallelisiert werden könnten, vielleicht gar nicht so fern. Zwar macht die Verteilung der Orogenesen gerade den gegenteiligen Eindruck, d. h. nicht den einer allmählichen Abnahme, sondern eher den einer fortlaufenden Verstärkung im Laufe der Erdgeschichte. Man muß hier aber die besonders in früheren Zeiten der Erdgeschichte stärkere Kontraktion in Rechnung ziehen, wodurch eine bessere Übereinstimmung erzielt werden kann. Hier haben wir vielleicht wieder den Fall vor uns, daß die kosmische Hauptursache den äußeren Rahmen des Geschehens liefert, dabei aber der Erde doch eine durchaus autonome Entwicklung möglich war. Ja, selbst eine Brücke zu der auf S. 28 besprochenen Radioaktivitätshypothese wäre denkbar: die Vorgänge der Kontinentenverschiebung und Gebirgsbildung sind rein intratellurische Vorgänge, deren episodische und vor allem universelle Auslösung eben sehr gut durch diese äußere, kosmische Ursache erfolgen konnte.

Eine weitere Folge des kleineren Mondabstandes ist eine erheblich größere Fluthöhe auf Erden, wobei die Fluthöhe umgekehrt proportional der dritten Abstandspotenz zunimmt. Bei gleichmäßiger Abstandsvergrößerung würde dies selbst bis ins Paläozoikum wenig ausmachen. Da jedoch, wie wir sahen, die Abstandsvergrößerung wesentlich von flachen Gewässern abhängt, uns aber gerade im Mesozoikum ausgedehnte Flachseebildungen entgegengetreten, läßt sich die Annahme, daß im Mesozoikum ein merklicher Teil der Abstandsvergrößerung erfolgte, durchaus vertreten. Waren es auch nur 10–20%, so betrug damals die Fluthöhe das Doppelte der heutigen, die 54 cm beträgt, also gut 1 m. Nun kommt es bekanntlich auf der Erde vor, daß

an geeigneten Stellen die Fluthöhe 10 m und mehr erreichen kann, und eine entsprechende Steigerung konnte damals eintreten. Außerdem waren auch die Sonnenfluten vielleicht 10 % höher als heute, was bei geeigneten Kombinationen (Springflut) nicht unwesentlich mitwirkte. Die Frage ist nun, ob in der Geologie Anzeichen von ehemals höheren Fluten gefunden wurden. In der Tat hat, zunächst unabhängig von kosmogonischen Betrachtungen, im Jahre 1933 Wilfarth [146] gewisse Sedimentationsverhältnisse in Deutschland zur Perm- und Triaszeit durch hohe Fluten zu erklären versucht. Gegen diese sog. Großflutenhypothese könnte eingewandt werden, daß man doch die Anzeichen der höheren Flut auf der ganzen Erde vorfinden müsse, und ferner, daß diese vorher noch viel stärker hätte sein müssen. H. Werner [147] versuchte diesen zweiten Einwand durch die interessante Hypothese zu beseitigen, daß die Erde den Mond im Rotliegenden eingefangen hätte. Ganz abgesehen von der prinzipiellen Schwierigkeit dieser Einfanghypothese ist aber die Abrundung der anfänglich exzentrischen Bahn lange nicht so einfach, wie Werner es meint, und ein widerstehendes Mittel, das sie bewirkt haben könnte, mindestens für jene Zeit nicht glaubhaft zu machen. Vielleicht läßt sich der Widerspruch einfacher beheben, wenn man bedenkt, daß zur Entstehung solcher Großfluten von vielleicht 20–50 m Höhe günstige Bedingungen des Erdreliefs erforderlich sind, und in früheren Zeiten, z. B. im Karbon, bei stärker differenziertem Erdrelief (steilere Küsten usw.) nicht so stark zur Ausbildung kommen konnten.

Sehr große Bedeutung muß aber, wie schon auf S. 119 besprochen, eine geringere Mondentfernung in klimatologischer Hinsicht haben. Kleinere Schiefe und kürzere Tageslänge in Verbindung mit stärkerer Sonnenstrahlung und schließlich bei etwas geringerem Sonnenabstand einer entsprechend kürzeren Dauer des Jahres (Mesozoikum 3–4 Tage, Paläozoikum 8 Tage) können unter dazu günstigen Verhältnissen (eisfreies Polarklima) in der Tat den Eindruck eines ausgeglicheneren Gesamtklimas hervorrufen. Möglicherweise ergibt sich damit auch eine größere *Erhaltungstendenz einmal bestehender klimatischer Zustände*, womit die längere Dauer der permokarbonen-Eiszeit und ihrer Schwankungen am ehesten verständlich würde. Wie erinnerlich, waren wir auf S. 25 zu dem Ergebnis gekommen, daß einige besonders auffällige paläoklimatische Anomalien möglicherweise auch durch die Hypothese einer ehemals wesentlich größeren Ekliptikschiefe dargestellt werden konnten — was aber durch die Kosmogonie nicht gestützt wird. Und zweifellos ist das mit ihrer Hilfe gewonnene klimatische Bild unter Hinzunahme mäßiger Kontinentenverschiebungen mit der Paläoklimatologie besser vereinbar als das einer großen Schiefe der Ekliptik.

tik, das nur neue Probleme aufwürfe. Schließlich wird bei geringerem Mondabstand auch die Präzessionsperiode kürzer, die heute 21000 Jahre, bei einer Tagesdauer von 16^h aber nur 10000 Jahre dauert. Wir sahen bei der Erörterung der diluvialen Eiszeit, welche Rolle gerade die „eiszeit-erzeugenden“ Minima der Strahlungskurve spielen. Sind diese umgekehrt nur halb so lang, so ist es fraglich, ob starke Eisvorstöße überhaupt Zeit hatten, sich auszubilden und nicht schon vorher durch Wiedereintritt normaler Verhältnisse zurückgedrängt wurden. Auch dies könnte die Erhaltungstendenz klimatischer Zustände vergrößern. Hierbei ist immer wieder zu bedenken, daß solche Folgerungen exakte rechnerische Grundlage haben, also paläoklimatologische Hypothesen sich unbedingt mit ihnen auseinanderzusetzen haben.

Aber trotz allem hätten wir die Rechnung ohne den Wirt gemacht, wenn wir nicht auch den anderen Partner, den Mond, untersuchten und prüften, ob unsere Vorstellungen sich auch mit seinem Zeugnis decken. Daß beim Mond Umlauf und Rotation übereinstimmen, läßt einen Schluß zu auf die Größe der Gezeitenkräfte, die dies zustande brachten. Da bei dem durch und durch erstarrten Mond heute keine wesentliche Bremswirkung mehr stattfinden kann, muß die Abbremsung in dem anfänglich flüssigen Zustand erfolgt sein. Da hier aber die heutigen Gezeitenkräfte bei weitem nicht ausreichen würden, müssen sie bei einer früher geringeren Entfernung gewirkt haben; man findet etwa $\frac{3}{8}$ der jetzigen Entfernung. Daß er diese Rotation, die also gleich der Länge des damaligen Monats von 6 Tagen war, nicht beibehalten hat, erklärt Jeffreys überzeugend durch die Anziehung der Erde auf die Spitze des ihr zugewandten Flutberges. Schon diese Tatsache ist ein Beweis dafür, daß der Mond nicht erst als selbständiger Planet später eingefangen wurde, sonst würde er auch heute noch schnell rotieren.

Die Oberfläche selbst zeigt die bekannten Mondkrater sowie die Mare als charakteristischste Formen. Unter den verschiedenen Hypothesen zur Entstehung der Mondkrater wird heute die sog. Aufsturzhypothese als die wahrscheinlichste betrachtet, gegen die eigentlich nur die Frage nach der Herkunft der vielen großen Meteore spricht. Zur Erklärung müssen wir auf die Geburt des Mondes selbst zurückgreifen (S. 120), zumal wir hier noch einen dunklen Punkt verschwiegen haben — wie nämlich der Mond über die Rochesche Grenze hinausgekommen sein soll, warum er nicht vielmehr sofort aufgebrochen wurde und wieder auf die Erde zurückfiel. Aus der Rocheschen Formel findet man für die Grenze der Selbständigkeit D in Erdradien:

$$D = 2 \cdot 44 \sqrt[3]{\frac{\rho \delta}{\rho \zeta}}.$$

Bei unmittelbarer Berührung müßte also die Dichte des Mondes, damit dieser selbständig bleiben konnte, 1,5mal größer sein als die der Erde; in Wirklichkeit war sie kleiner, so daß wir uns fragen müssen, wie der Mond über die kritische Zone von 3 Erdradien hinweg kam. Nun dürfen wir den Vorgang der Abtrennung eben nicht nur als ideal mathematischen Ablösungsvorgang betrachten, sondern als mehr oder weniger katastrophalen Vorgang, bei dem ein gewaltiger Gasausbruch die Mondablösung begleitete; dieses viele tausend Grad heiße Gas trieb den Mond in kürzester Frist über die Rochesche Grenze hinaus und ermöglichte ihm so die Erhaltung seiner Selbständigkeit. Dieses Problem ist deshalb von so großer Tragweite, weil in allen Fällen, in denen Abtrennung — sei es von Planeten von der Sonne, sei es von Satelliten von ihrem Zentralkörper — stattfand, die Rochesche Grenze überwunden werden mußte. Nun sahen wir aber schon auf S. 116, daß mehr oder weniger katastrophale Abtrennung eine zum mindesten vorläufig als Postulat hinzunehmende Forderung ist, die wir aber im Planetensystem in Kauf nehmen konnten, da es mit einer Riesensternsonne große Ähnlichkeit mit den Satellitensystemen hat und wir bei diesen um die Rotationshypothese kaum herumkommen. Was beim Erdmond allenfalls noch hinnehmbar wäre, wird man bei den Satellitensystemen kaum im Ernst behaupten wollen: nämlich, daß sie im Urnebel bereits embryonal selbständig vorgebildet gewesen seien. Was wir also im einen Falle als empirische Zwangsfolgerung kennen lernten, dürfen wir im anderen Falle unbedenklich annehmen.

Die mit dem gewaltigen Gasdruck herausgeschleuderten Gesteinsbrocken bildeten um den Urmond eine ausgedehnte Meteoritenwolke, deren nach und nach erfolgende Vereinigung mit dem Monde die bekannten Mondkrater erzeugte. Dagegen vergleicht Schwinner die sog. Mare des Mondes mit der großen Mittelmeerzone der Erde und nimmt an, daß sie beide durch Aufschmelzung infolge Reibungswärme entstanden, die bei den millionenfach stärkeren Gezeiten der Anfangszeit auch tatsächlich beträchtliche Ausmaße erreichte. Dazu ist zu sagen, daß die Mehrzahl der Mondforscher gegen eine Erklärung sämtlicher Mondgebilde aus einer einzigen Ursache ist; vielmehr liefern die Mare einen wesentlich anderen Gesamteindruck als die Krater.

Schon aus diesen spärlichen Andeutungen wird der Leser ersehen, welch erstaunliche Fülle von Beziehungen sich hieraus zwischen scheinbar weit auseinander liegenden Gebieten ergibt.

Für die zukünftige Erdgeschichtsforschung muß der Mond ein Stück der Erde bedeuten, ja noch mehr, einen gleichberechtigten Partner, dessen Schicksal aufs engste mit dem der Erde verknüpft ist.

Schlußzusammenfassung.

Nach Durchquerung so sehr verschiedener und ausgedehnter Gebiete, wie wir es in der vorliegenden Schrift getan haben, wird es ratsam sein, sich noch einmal das in der Einleitung umrissene Ziel vor Augen zu führen und zu überprüfen, ob sich die Reise gelohnt hat.

Zunächst verschafften wir uns ein Instrument, das den einen Hauptpfeiler unserer Untersuchung bildet: eine theoretisch wohlfundierte absolute Zeitskala. Wir sahen, daß das Alter der Erde zwischen 2 und 3 Milliarden Jahren liegen muß, und hatten damit auch gleichzeitig einen unteren Wert für das Alter der Sonne gefunden (Abschnitt 1). In Absatz 2 haben wir die unmittelbarste Einwirkung des Kosmos auf die Erde, den direkten kosmischen Massenzufluß untersucht. Im nächsten Abschnitt wandten wir uns der Erforschung des wichtigsten Zusammenhanges zwischen Erdgeschichte und Kosmogonie, der Klimaentwicklung der Erde, zu. Das Ergebnis können wir dahingehend zusammenfassen, daß terrestrische Faktoren, wie Gebirgsbildung, Vulkanismus usw. allein zur Erklärung der großen Klimaschwankungen nicht ausreichen. Ferner stellten wir für ältere Zeiten, besonders das Permokarbon, eine systematische Abweichung der Klimazonen voneinander fest, die mit Wahrscheinlichkeit auf eine mindestens 20–30° betragende Kontinentenverschiebung hinwies. Doch genügt auch eine solche nicht zur vollständigen Erklärung der Klimaschwankungen.

Vor allem der im großen und ganzen parallele Gang der Klimaentwicklung beider Halbkugeln verwies uns von selbst auf das Studium solarer Einwirkungen; wir versuchten aber auch hier, zunächst ohne den Anschluß an die Fixsternkosmogonie durchzukommen, was aber nicht gelang; denn von den Sonnenflecken oder sonstigen solaren Phänomenen aus konnte keine Brücke geschlagen werden, und die ihrer grundsätzlichen Bedeutung wegen vor allem nach der problematischen Seite hin etwas ausführlicher behandelten sog. astronomischen Klimaschwankungen waren ebenfalls nicht in der Lage, auf eigenen Füßen zu stehen und bedurften unter allen Umständen der Heranziehung einer primären, aller Wahrscheinlichkeit nach kosmischen Ursache, die ihnen eine klimatologische Auswirkung erst ermöglichte. Den letzten Schritt zum direkten Anschluß an die Kosmogonie ermöglichte uns die Gedankengänge von C. G. Simpson, die einerseits die Paläoklimatologie von der bisher für selbstverständlich erachteten Beschränkung auf eine Erniedrigung der Sonnenstrahlung bzw. solaren Aktivität während der Eiszeiten frei machten, andererseits nichts anderes sind als der Hinweis auf die von der Fixsternkosmogonie durchzuführende Überprüfung der Möglichkeit zeitweisen Variabilitätsstadiums der Sonne.

Im zweiten Teil versuchten wir diesen Anschluß von der astrophysikalischen Seite her durchzuführen, wobei wir den Lebensweg der Sonne aus dem Nebeneinander der Fixsterntypen zu rekonstruieren versuchten. Die im Anschluß an die Simpsonsche Idee wichtige Frage nach der Stellung bzw. dem Charakter der Veränderlichen auf dem Zwergast führte uns zu dem Resultat, daß hier nur ein novaartiges Aufleuchten oder allenfalls ein den Novae offenbar nahe verwandtes und mit ihnen durch Bindeglieder verbundenes Stadium eines der Typen *UGeminorum-Z Camelopardalis* möglich ist; Pulsationsvariabilität kam nicht in Betracht.

Aber eine Belebung erfuhr das Diagramm erst durch Einführung einer kosmogonischen Zeitskala (Abschnitt 6), deren untere Grenze durch das Erdalter bereits gegeben war, deren obere aber nur auf theoretischem Wege erhältlich war. Eine wegen ihrer besonderen Wichtigkeit etwas ausführlichere Diskussion führte uns zur Annahme der sog. kurzen kosmogonischen Zeitskala als der wahrscheinlichsten, derzufolge die Sterne ein Alter von der Größenordnung von 10^9 – 10^{10} Jahren haben, und somit auch das Alter der Erde sich als von kosmogonisch beträchtlicher Länge ergibt. Das so gewonnene Bild entsprach allerdings nicht ganz dem erhofften, denn das Russell-Diagramm stellt dann keinen Entwicklungsweg, sondern nur noch ein Verteilungsbild häufigster Zustände dar. Wir haben dann versucht, das Novaphänomen als massenreduzierenden Faktor in Zeiträumen von 10^9 – 10^{10} Jahren aufzufassen, und kamen, wie die ausführliche Diskussion ergab, zu guten Resultaten hinsichtlich der Massenabnahme-Geschwindigkeit, ebenso damit gleichzeitig zu einer Ausdeutung des Simpsonschen Variabilitätsgedankens als temporäres Auftreten eines der Typen der Zwergsternvariabilität.

Jedoch ohne uns vorzeitig auf diesen Entwicklungsweg der Sonne festzulegen, hatten wir den Lebensweg der Sonne von der anderen Seite her, der Entstehungsgeschichte des Planetensystems, betrachtet. Wir hatten dort versucht, uns in tabellarischer Form einen Überblick über die Entwicklungsmöglichkeiten zu verschaffen und kamen trotz der gerade hier so verschiedenen Auffassungen zu einem mindestens teilweise positiven Resultat. Von den beiden Hauptmöglichkeiten, nämlich der einer von Anfang an selbständigen Entwicklung der Planeten oder einer Entstehung aus der Sonne, ist die erstere nur möglich, wenn wir die Mehrzahl und, wie unsere Diskussion wahrscheinlich machte, sogar sämtliche Gesetzmäßigkeiten als a priori gegeben postulierten. Die zweite hingegen führt zu dem, was wir als befriedigende Erklärung bezeichnen dürfen, aber nur unter der unerläßlichen Bedingung, daß die Sonnenmasse zur Zeit der Entstehung des Planetensystems wesentlich größer war als heute; aber

mit der Annahme noch so großen Massenverlustes kommen wir nicht ganz durch, er muß vielmehr durch das Novaphänomen erfolgt sein. Denn bei der ersten Hypothese sind es die Schwierigkeiten um das widerstehende Mittel, bei der zweiten die Abweichung des Sonnenäquators von der unveränderlichen Ebene, die auch bei jedwedem kontinuierlichen Massenverlust voll bestehen bleiben würden und nur durch das Novaphänomen überwunden werden konnten. Aus der in diesem Falle weitgehenden Analogie des Planetensystems mit den großen Satellitensystemen schlossen wir, daß die Rotationshypothese die wahrscheinlichste ist. Im 4. Kap. schließlich untersuchten wir die unmittelbarste Verbindung von Erdgeschichte und Kosmogonie, die Geschichte des Systems Erde-Mond. Es zeigte sich, daß man mit einer uranfänglich selbständigen Entwicklung des Erdmondes zu keinem Anfang kommen kann. An Hand der Darwinschen Gezeitenreibungstheorie schlossen wir auf Ablösung von der Erde, die aber, wie die numerische Nachprüfung ergibt, nur bei einem anfänglich geringeren Sonnenabstand möglich war. Andererseits zeigte sich, daß sich aus diesem Entwicklungsgang eine erstaunliche Fülle geologischer und anderweitiger Beziehungen und Schlußfolgerungen von selbst ergibt. Schließlich finden wir bei Venus und Mars weitere Hinweise auf ehemals geringeren Sonnenabstand.

Diese Schlußfolgerung, daß die Sonne zur Zeit der Entstehung der Erde ein Riesenstern war und sich seit dieser Zeit durch starken Massenverlust zu ihrer jetzigen Größe entwickelt hat, möchte ich als das Hauptergebnis des Buches bezeichnen. Welche Sicherheit hat nun dieses Ergebnis? Wir sahen bereits in der Einleitung, daß ein zuverlässiges Kriterium für jede naturwissenschaftliche Hypothese ihre Bewährung nicht nur auf einem ganz speziellen Gebiete, sondern auf verschiedenen, miteinander nicht unmittelbar zusammenhängenden Gebieten ist. Prüfen wir nun das erwähnte Resultat unter diesem Gesichtswinkel!

Was zunächst die allgemeine Fixsternkosmogonie anbetrifft, so hatten wir gesehen, daß das Russell-Diagramm nur unter der Annahme eines nach einem bestimmten Entwicklungsgesetz erfolgenden Massenverlustes als Entwicklungsweg der Sterne aufgefaßt werden kann; andererseits aber sahen wir, daß es gewagt wäre, für solche Entwicklungszeiten eine Zeitdauer von mehr als 10^{10} Jahren anzunehmen. Da die erwähnte Entwicklungshypothese in der Tat in solchen Zeiträumen eine kräftige Massenreduktion vorsieht, hat sie hier zweifellos einen Vorzug. Denn die sonst noch mögliche Erklärung des Russell-Diagramms als statistisches Zustandsbild müßte sehr gekünstelte Annahmen über die Entstehungsgröße

der Sterne machen, über deren Berechtigung wir heute nichts aussagen können.

Noch eindeutigere Aufschlüsse gab uns aber die Kosmogonie des Planetensystems. Nehmen wir an, daß die Sonne zur Zeit der Entstehung des Planetensystems ein Mehrfaches ihrer heutigen Masse (und somit auch Ausdehnung) besaß, kommen wir zu einer weitgehend befriedigenden Kosmogonie des Planetensystems; hätte die Sonne, wie zur Zeit zumeist angenommen wird, damals wirklich nur ihre heutige Masse gehabt, so müßte das Planetensystem als ein unerklärliches Naturwunder erscheinen!

Es mußte doch überraschen, daß genau dieselbe Problemstellung im 4. Kap. noch einmal auftauchte: bei gleicher Sonnenmasse und somit auch gleichem Erdbstand kommen wir zu keiner befriedigenden Erklärung der Entstehung des Mondes, während andererseits bei der Annahme früher größerer Sonnenmasse die Geschichte des Systems Erde-Mond zu einem der sichersten und vor allem auch für die Erdgeschichte fruchtbarsten Teilgebiete kosmogonischer Forschung werden kann.

Aber nicht nur zu diesen, sondern auch zu einer großen Anzahl verschiedener Probleme zeigten sich Verbindungswege. Der wichtigste war die Möglichkeit einer Beziehung zu den großen, in ihrer Gesamtheit noch ungelösten Problemen der Paläoklimatologie. Durch den Vorgang des Novaausbruches, die anschließende Variabilität und nicht zuletzt die materielle Einwirkung der Sonnenmaterie auf die Erdatmosphäre, entstanden auf der Erde die großen Eiszeitperioden, und weitere Beziehungen, nicht zuletzt zu den Problemen der Paläobiologie, schienen angedeutet.

Vieles konnte im Rahmen der kleinen Schrift nur kurz angedeutet werden, aber das war nicht deren Hauptaufgabe: sie sollte vielmehr zeigen, daß die Einbeziehung des Novaphänomens in die Kosmogonie wohl in der Lage wäre, nicht nur diese, sondern auch die Erdgeschichte im weitesten Sinne dauernd zu befruchten.

Literatur-Verzeichnis.

Abkürzungen:

- A. N. = Astronomische Nachrichten.
Met. Z. = Meteorologische Zeitschrift.
Geol. Rdsch. = Geologische Rundschau.
Z. D. Geol. Ges. = Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft.
Gerland = Gerlands Beiträge zur Geophysik.
Naturwiss. = Die Naturwissenschaften.
Z. f. Aph. = Zeitschrift für Astrophysik.
M. N. = Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

Allgemeine Abkürzungen:

- Z. = Zeitschrift, J. = Journal, Hdb. = Handbuch.
* bedeutet im Hinblick auf den Inhalt des Buches besonders empfehlenswerte Bücher und Schriften.

Spezialnachweise:

1. Dacqué, E., Das fossile Lebewesen. Berlin 1928. 184 S.
- *2. Dacqué, E., Grundl. u. Meth. d. Paläogeographie. Jena 1915. 499 S.
3. de Geer, G., Geochronol. d. letzt. 12000 Jahre. Geol. Rdsch. **3** (1912) 457.
- *4. Jeffreys, H., The Earth, its origin, history usw. 2. Aufl. Cambridge 1929.
5. v. Bubnoff, S., Das Alter d. Erde usw. Naturwiss. **23** (1935) 506.
6. Borchert, H., Gerland **28** (1930) 32.
7. Mc. Crea u. a., Discuss. on origin of solar system. J. Roy. Astron. Soc. Canada **30** (1936) 392.
8. Hoffmeister, C., Die Meteore. Diese Samml. Bd. 17 (1937).
- *9. Schwinner, R., Lehrb. d. physik. Geologie. Bd. I. Berlin 1936. 356 S.
10. Schwinner, R., Meteoriten u. Geologie. Gerland **16** (1927) 296.
11. Paneth, F. u. Koeck, W., Z. f. physik. Chemie. Festband (1931) 145, Naturwiss. **19** (1931) 164.
12. Öpik, E., Meteorites and age of Universe. Popul. Astronomy **41** (1933) 71.
13. Becker, W., Materie im interstell. Raum in Fortschr. d. Astron. Bd. I, 1938. 78 S.
14. Lambrecht, H., Interstell. Materie. Naturwiss. **25** (1937) 631.
15. Nölke, F., Erstmalig vorgetragen 1908, zuletzt in Met. Z. **54** (1937) 34.
16. Keilhack, K., Die Rätsel des Löß. Z. D. Geol. Ges. **72** (1920) Monatsber. 146.
17. Himpel, K., Zur Entstehung d. Tektite. Gerland **54** (1938) 21.
18. Spencer, L. J., On the origin of tektites. Nature **131** (1933) 117.

19. Dacqué, E., Paläogeographie in Enzykl. d. Erdkunde. Leipzig 1926. 169 S.
- *20. Kerner-Marilaun, F., Paläoklimatologie. Berlin 1930. 512 S.
- *21. Köppen, W. u. Wegener, A., Die Klimate d. geol. Vorzeit. Berlin 1924. 244 S.
22. Kerner-Marilaun, F., Met. Z. **48** (1931) 352; **49** (1932) 186.
- *23. Brooks, C. E. P., Climate through the ages. London 1926. 439 S.
- *24. Born, A., Alter der Erde und geologische Zeitalter in Gutenberg, Hdb. d. Geophysik. Bd. II. Lief. 1 (1931).
25. Salomon-Calvi, W., Die vordiluvialen Eiszeiten. Sitzber. Heidelberg. Akad. Jahrg. 1931, Heft 8.
- *26. Salomon-Calvi, W., Die permokarbonischen Eiszeiten. Leipzig 1933. 156 S.
27. Dall, W. H., Pliocene a. pleistocene fossils from Arctic coast. U. S. Geol. Survey Prof. Paper No. 125 (1920).
28. Obrutscheff, W. A., Geol. Rdsch. **31** (1930) 243; **32** (1931) 236.
29. Arrhenius, Sv., Met. Z. (1896) 258; (1910) 182; Frech, F., Z. Gesell. f. Erdkunde Berlin (1902) 611.
30. Humphreys, W. A., Physics of the air. Philadelphia 1920. 241 S.
31. Kreichgauer, D., Die Äquatorfrage in der Geologie. Steyl 1902.
- *32. Wegener, A., Die Entstehung der Kontinente u. Ozeane. 4. Aufl. Braunschweig 1929. 242 S.
33. Gripenberg, W. S., Arkiv f. Kemi, Mineral. o. Geol. **11** A No. 11. Stockholm 1934.
34. Kerner-Marilaun, F., Zur Frage d. Paläoklimate. Z. D. Geol. Ges. **86** (1934) Heft 2.
35. Himpel, K., Z. Probl. d. astron. Klimaschwankungen. Met. Z. **55** (1938) 256.
36. Range, F., Über die kambrische Eiszeit. Z. D. Geol. Ges. **88** (1936) 303.
37. Gutenberg, B., Gerland **16** (1927) 239; **18** (1927) 281; vgl. dazu auch die beiden Artikel von A. Wegener, *ibid.* **17**. 313 u. Ihering, *ibid.* **18**, S. 266.
38. Prey, A., Über Flutreibung u. Kontinentalversch. Gerland **15** (1926) 401.
39. Prey, A., Über die Polfluchtkraft. Gerland **48** (1936) 349.
40. Milankovitch, M., Astron. Hilfsmittel z. Erforsch. d. Erdgesch. in Gutenbergs Hdb. d. Geophysik. Bd. 9. 1938, Lief. 3.
41. Schwinner, R., Sind große Polverschiebungen möglich? Gerland **43**, (1935) 296.
42. Ampferer, O., Über Kontinentenverschiebungen. Naturwiss. **13** (1935) 669.
43. Joly, J., The surface history of the earth. 2. Aufl. Oxford 1930. 212 S.
- *44. Kirsch, G., Geologie u. Radioaktivität. Berlin 1928. 214 S.
45. Kirsch, G., Geomechanik. Leipzig 1938. 151 S.
46. Corlin, A., How larger bodies may be built usw. Z. f. Aph. **15** (1938) 239; **18** (1939) 1.
47. Lotze, F., D. Jolysche Radioaktivitätshyp. Göttinger Nachr. **1927**, 75.
48. Schwinner, R., Das Problem d. Isostasie. Geol. Rdsch. **29** (1939) 1.
49. Salomon-Calvi, W., Akadem. Anzeiger Wien 1937, Nr. 14.
50. Sueß, F. E., Über d. Bau d. Kaledoniden usw. Centralblatt f. Mineralogie usw. **1938**, 321.

51. Theory of Continental drift. A Symposium. New York 1928. 240 S.
 52. Geol. Rdsch. **30** (1939) Heft 1/2. 240 S.
 *53. v. Hann-Knoch, Hdb. d. Klimatologie. Stuttgart 1932. 444 S.
 54. de Lury, R. E., Sunspot Influences. J. Roy. Astron. Soc. Canada **32** (1938) Heft 3 u. 4.
 55. Korn, A., Schichtung u. absolute Zeit. Geol. Rdsch. **26** (1935) 136; Neues Jahrb. f. Mineralogie usw., Beilage-Bd. 74, Heft 1 (1938).
 *56. Bernheimer, W. E., Strahlung u. Temperatur d. Sonne. Hdb. d. Astroph. IV u. VII.
 57. Spitaler, R., Das Klima des Eiszeitalters. Prag 1921; ferner eine Anzahl von Aufsätzen in Gerland **31** u. f.; ferner *Milankovitch, Mathem. Klimalehre in Köppen-Geigers Hdb. d. Klimatologie, Teil IA. 176 S. Berlin 1930.
 58. Wundt, W., Änderung d. Erdalbedo in d. Eiszeit. Met. Z. **50** (1933) 241 und ebda. **51** (1934) 151; **52** (1935) 273; **55** (1938) 81.
 59. Soergel, W., Die Vereisungskurve. Berlin 1938. 87 S.
 60. Eberl, B., Die Eiszeitfolge im nördl. Alpenvorland. Augsburg 1930. 427 S.
 61. Milankovitch, Neue Ergebn. d. astron. Theorie d. Klimaschwank. Bull. Acad. Serbe (1938) 41 S. Referat Met. Z. **55** (1938) 76.
 62. Scherhag, R., Die Erwärmung d. Polargebiets. Ann. d. Hydrographie **67** (1939) 57.
 63. Simpson, C. G., Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. **53** (1927) 213.
 64. Simpson, C. G., World climate during quarternary period. Ibid. **60** (1934) 425.
 65. v. Ficker, H., Neue Eiszeittheorie v. Simpson. Met. Z. **52** (1935) 165, 259.
 66. Köppen, W., Vergleich zweier Eiszeittheorien. Gerland **43** (1935) 379.
 *67. Lundmark, K., Luminisities, colours etc. of the stars. Hdb. d. Astrophysik V 1/2 u. VII.
 *68. Ludendorff, H., Veränderliche Sterne. Hdb. d. Astrophysik VI/2 u. VII.
 *69. C. P. und S. Gaposchkin, Variable Stars. Harvard Monogr. Nr. 5 (1938) 382 S.
 70. Kukarkin u. Parenago, Gorki Bull. **4** (1934) 251; Ref. D. Sterne **14** (1934) 201.
 71. v. Maanen, A., Astron. J. Nr. 1081 (1938) 23.
 72. Stratton, J. F. M., Novae. Hdb. d. Astrophysik VI/2 u. VII.
 73. Hubble u. Duncan, Astroph. J. **66** (1927), 59 fanden — 9^{·2}^m als absolute Helligkeit, Wilson Publ. Astron. Soc. Pacific **48** (1936) 229 fand—9^{·9}^m.
 74. Humason, L., Spectral charact. of old novae. Astroph. J. **88** (1938) 228.
 75. Lundmark, K., Was the Crab Nebula a Supernova? Festschrift t. Östen Bergstrand, Stockholm 1938.
 76. Adams u. Joy, Popular Astron. **30** (1921) 103.
 77. Gerasimovic u. Payne, Harvard Bull. Nr. 889 (1932).
 78. Lönnquist, C., Frequency of the Nova phenomenon. Lund Obs. Circ. Nr. 7 (1932).
 79. Himpel, K., A. N. **267** (1938) 55; Hachenberg-Wellmann, Z. f. Aph. **17** (1938) 246.

80. Sticker, B., Veröff. Univ. Sternw. Bonn Nr. 23 (1930); Z. f. Aph. 1 (1930) 174; 4 (1932) 53.
81. Kienle, H., Z. f. Aph. 3 (1931) 1.
82. Öpik, E., Harvard Bull. Nr. 885 (1931).
83. v. d. Pahlen, E., Lehrb. d. Stellarstatistik. Leipzig 1938. 934 S.
84. Heckmann-Haffner, Veröff. Univers. Sternw. Göttingen Nr. 55 (1937).
85. Hopmann, J., Die Streuung d. absol. Größen usw. Sitzber. Sächs. Akad. Math.-Naturw. Kl. 90 (1938) 175.
- *86. Eddington, A. S., The internal constitution of the stars. Cambridge 1926. Deutsche Übers. D. innere Aufbau der Sterne. Berlin 1928.
87. Vogt, H., Innerer Aufbau u. Entwickl. d. Sterne. Ergebn. d. exakten Naturwiss. VI. (1927.) 1.
- *88. Vogt, H., Sternaufbau u. Sternentwicklung. Handwörterb. d. Naturwiss. 2. Aufl. Bd. X. (1934) 557.
- *89. Strömberg, B., Thermodynamik d. Sterne usw. Hdb. d. Astrophysik VII (1936) 121 sowie Theorie d. Sterninnern usw. Ergebn. d. exakten Naturwiss. 16 (1937) 465.
90. Biermann, L., Häufigkeit d. Wasserstoffs in Sternen. Vierteljahrsschr. d. Astr. Ges. 72 (1937) 329.
91. Milne, E. A., M. N. 91 (1931) 4; Referat Naturwiss. 19 (1931) 685.
92. Kopal, Z., Density Condensations in stellar Interiors. Observatory 61 (1938) 201.
93. Klauder, H., Innerer Aufbau v. Bedeckungsveränderl. A. N. 255 (1935) 1; Cowling, G., On the motion of apsidal line usw. M. N. 98 (1938) 734.
94. R. C. Majumdar, Theorie d. stell. Absorptionskoeff. A. N. 247 (1932) 242.
95. Vogt, H., Die Rotation d. Sonne. A. N. 241 (1931) 185.
96. Walter, K., Über d. Masseleuchtkraftgesetz usw. Z. f. Aph. 15 (1938) 315.
97. Meyer, St., Über d. Alter d. Sonne usw. Sitzber. Wien Math.-nat. Kl. IIa 146, (1937) 175 und 581.
- *98. Jeans, J. H., Astronomy and Cosmogony. Cambridge 1928. 428 S.
99. Ambarzumian, V., Massenverlust d. Novae. Z. f. Aph. 14 (1937) 320.
100. Mc. Crea, Ejection of matter by novae. Z. f. Aph. 14 (1937) 208.
101. Siedentopf, Grundl. d. Kosmogonie. Göttingen 1928. 58 S.
102. Hubble, E., The realm of nebulae. 1936, Deutsche Übers. D. Reich d. Nebel. Braunschweig 1938. 192 S.
103. Hubble, E., Red shift in nebulae. Astroph. J. 84 (1936) 517.
104. Eddington, A. S., Red shift in nebulae. M. N. 97 (1937) 156.
105. ten Bruggencate, P., Dehnt sich d. Weltall aus? Naturwiss. 25 (1937) 562.
106. Zwicky, F., On Supernovae. Publ. Astr. Soc. Pacific. 50 (1938) 215.
107. Atkinson, R. D., Atomic synthesis usw. Astroph. J. 84 (1936) 73.
108. v. Weizsäcker, C. F., Elementenumwandlungen im Innern d. Sterne. Physik. Z. 38 (1937) 176.
109. v. Weizsäcker, C. F., Ibid. 39 (1938) 633.
110. Nernst, W., Das Weltgebäude im Lichte d. neueren Forschung. Berlin 1921. 63 S; ferner: Zur Entwicklung der Sterne. Z. f. Physik 97 (1935) 511; Referat Die Sterne 16 (1936) 50.

111. Strömgen, B., Helium and hydrogen content of stars. *Astroph. J.* **87** (1938) 520.
112. Fotheringham, H., Two Babylon. eclipses. *M. N.* **95** (1935) 719.
113. Öpik, E., Stellar structure usw. *Publ. Observ. de Tartu* **30** (1938) Heft 3, 118 S.
114. Dubois, E., Die Klimate d. geol. Vorzeit u. d. Entwickl. d. Sonne. Leipzig 1893.
115. Jung, B., Zur Frage der Klimaschwank. *A. N.* **263** (1937) 435.
116. Zinner, E., Die Helligkeitsänderungen d. Sterne. *A. N.* **249** (1933) 90.
117. Himpel, K., Die Klimate d. geol. Vorzeit. *A. N.* **262** (1937) 393; **264** (1937) 197; *Z. f. angew. Meteorol. Das Wetter* **55** (1938) 301; *Met. Z.* **55** (1938) 69.
118. J. L. Wilser, Lichtreaktionen in d. fossilen Tierwelt. Berlin 1931. 192 S.
119. Riem, J., Zur Geologie u. Sintflut. *Deutsches Pfarrerbibl. Essen* **41** (1937) 6:5.
121. Vogt, H., *A. N.* **263** (1937) 5.
122. Bobrovnikoff, N. T. On disintegr. of comets. *Lick Obs. Bull. Nr. 408* (1929).
123. Corlin, A., Origin of comets. *Festschrift t. Östen Bergstrand. Stockholm* 1938.
124. Nölke, F., Ursprung d. Kometen. *A. N.* **268** (1939) 87.
125. Krug, W., Abstandsgesetz im Planetensystem. *Die Sterne* **18** (1938) 68, 204.
126. Mohorovicic, St., Entfernungsgesetz im Planetensyst. *A. N.* **266** (1938) 164.
- *127. Russell, H. N., *The solar system and its origin.* New York 1935. 144 S.
128. Kopal, Z., *A. N.* **265** (1938) 126.
129. Jeffreys, H., Intern. *Constit. of inner planets.* *M. N.* **94** (1934) 823; *M. N. Geoph. Suppl* **4** (1937) 62.
130. Luyten, W. J., Origin of solar system. *Observatory* **61** (1938) 83.
131. Davidson, M., Origin of solar syst. *J. Brit. Astr. Assoc.* **49** (1938) 4.
- *132. Nölke, F., *Der Entwicklungsgang unseres Planetensystems.* Berlin u. Bonn 1930. 359 S. (Vgl. auch die Darstellung in „Entwicklung im Weltall“, Bd. VIII dieser Sammlung [1926]).
133. Chamberlin, T. C. u. Moulton, F. R., *Letzte Darstellung der Hypothese in dem Buch „The two solar families“.* Chicago 1928.
134. Jeffreys, H., Origin of solar system. *M. N.* **89** (1929) 636, 731.
- *135. Poincaré, H., *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques.* Paris 1911.
136. Berlage, H. P. jun., *Entwicklungsgesch. d. Planeten.* *Gerland* **17** (1927), *Ergänz.-Hefte*, 68 S.
137. Gunn, R., Origin of solar system. *Physic. Review* **39** (1932) 311; *Ref. Himmelswelt* **42** (1932) 161.
138. Lyttleton, R. A., Origin of solar system. *M. N.* **96** (1936) 559; **98** (1938) 536 u. 633.
139. Luyten u. Hill, Origin of solar system. *Astroph. J.* **86** (1937) 470; ferner *M. N.* **99** (1930) 692.
140. Kopal, Z., Origin of solar system. *A. N.* **258** (1936) 381.
141. Darwin, G. H., *Ebbe u. Flut.* Leipzig 1911. 420 S.

142. Lyttleton, R. A., On an encounter of Pluto with the Neptunian System. M. N. **97** (1937) 108.
- *143. Kienle, H., Kosmogonie in Enzyklop. d. math. Wiss. Bd. VI./2 (1933) 987.
144. Lyttleton, R. A., Rotation of planets. M. N. **99** (1939) 181.
145. Pickering, H., Place and origin of the Moon. J. of Geology **15** (1907) 23.
146. Wilfarth, M. Großfluten in Perm u. Trias. Geol. Rdsch. **24** (1933) 349; Z. D. Geol. Ges. **86** (1934) 265.
147. Werner, H., Großfluten in Perm u. Trias. In „Kali, Erdöl“ usw. Jg. 1938, Heft 7.
148. Wigand, A., Zur atmosphärischen Trübung 1912. Met. Z. **30** (1913) 249.
149. Junge, Chr., Zur Frage d. Kernwirkung d. Staubes. Met. Z. **53** (1936) 186.
150. Vogt, H., Zur Theorie des Sterninnern und Zur Theorie rotierender Sterne; in Veröffentl. d. Sternw. Heidelberg **10** (1935) Heft 1.

Namenregister.

- A**dhémar, A. 34
Ampferer, O. 28
Arrhenius, Sv. 22, 108
Atkinson, R. 74
- B**erlage, H. P. jun. 113
Bernheimer, W. E. 33
Bickerton, Ch. 108
Birkeland, K. 113
Blytt, A. 5
Born, A. 16
Brooks, C. E. P. 15, 20, 40
Brückner, E. 32
Buffon, G. L. 108, 114
- C**hamberlin, T. C. 108
Mc. Crea, W. H. 68
Croll, J. 34
- D**acqué, E. 16
Dall, W. H. 20, 26
Darwin, G. H. 118, 120, 121
David, T. C. E. 33
Davidson, M. 107
Dubois, E. 81
- E**berl, B. 37
Eddington, A. S. 56-62, 68, 71
- F**auth, Ph. 108
Frech, F. 22
- G**alilei, G. 31
de Geer, A. 4, 37
Gripenberg, W. S. 24
Gutenberg, B. 27
- H**alm, J. 54
v. Helmholtz, H. 72
Hoffmeister, C. 7, 10
- Hörbiger, H. 11, 108
Hubble, E. P. 71
- J**eans, J. H. 67, 73, 108
Jeffreys, H. 6, 98, 105, 108, 110, 112,
115, 118, 125
Joly, J. 28
Jung, B. 86
Junge, Chr. 22
- K**ant, I. 96, 107
Keilhack, K. 10
Kerner-Marilaun, F. 15
Kienle, H. 54
Kirsch, G. 28, 29
Kopal, Z. 62, 114
Köppen, W. 26, 29
Korn, A. 33
Kreichgauer, D. 22
- L**aplace, P. S. de, 107, 108, 110, 116
Lönquist, C. 52
Lotze, F. 28
Ludendorff, H. 48
Lundmark, K. 50, 53
Luyten, W. J. 107
Lyttleton, R. A. 113, 117, 121
- M**ayer, Robert 66
Meyer, St. 66, 75
Milankovitch, M. 27, 34, 36, 38
Milne, E. A. 60, 62
Mohorovicic, St. 102, 103
Moulton, F. R. 108
- N**ernst, W. 73, 77, 81, 82, 85
Nölke, F. 10, 107, 110, 117
- O**brutscheff, W. A. 21
Öpik, E. 54, 80

- Paneth**, F. 8
Pickering, W. H. 122
Poincaré, H. 108, 111
Prey, A. 27
- Range**, F. 26
Reinmuth, K. 9
Richter, N. 50
Riem, J. 90
Rhijn, H. van 47
Ross Gunn 113
Russell, H. N. 62, 104, 105
- Salomon-Calvi**, W. 16, 24, 28, 30
Schwabe, H. 31
Schwinner, R. 7, 12, 28, 109, 122, 123, 126
Simpson, G. C. 41-44, 87, 127
Slipher, V. M. 99
Sörgel, H. 37
Spencer, J. L. 10
- Sticker**, B. 54
Stratton, F. J. M. 114
Strömgren, B. 56, 75
Suess, F. E. 30
- Vogt**, H. 56, 60, 92
- Wagner**, A. 38
Walter, K. 62, 64
Wegener, A. 23-27, 29
v. Weizsäcker, C. F. 74-76
Werner, H. 124
Wigand, A. 22
Wildt, R. 105
Wilfarth, M. 124
Wilser, J. L. 88
Wundt, W. 37
Wylie, C. C. 7
- v. Zeipel**, H. 53, 63
Zwicky, F. 50, 72

Sachregister.

- Absorptionskoeffizient** (der Sternmaterie) 57ff., 62, 92
Alter der Erde 3ff., 71, 127
– der Kometen 101
– der Meteoriten 8, 28, 65
– des Milchstraßensystems 70
– der Sonne 7, 65, 71, 78, 96
– der Sterne 66ff.
Astronomische Klimaschwankungen 34ff., 87
Aufbau (von Elementen) 73
Aufbauhypothese 74, 80, 82
- Bedeckungsveränderliche** 46, 62, 77, 78
Beta Lyrae 77
- Cepheiden** (Delta-Cephei-Sterne) 48, 78
- Dichte des Erdinnern** 103
– der Planeten 102
– der Sterne 55, 72
Dichtekonzentration der Planeten 105, 117
– der Sonne 116
– der Sterne 46, 62
Doppelsterne 45, 64
Dunkelwolken (kosmische) 9ff.
- Einfanghypothese** 116ff., 124
Eisspuren (fossile) 13
Eiszeiten (allgemeines) 10, 19, 81, 83, 84
–, algonkisch-kambrische 18, 81, 88.
–, diluviale 19, 20, 23, 26, 36, 37, 42, 88
–, permokarbonische 18, 22, 23, 24, 79, 84, 101, 124
Energiequellen (der Sterne) 63, 66, 69, 71ff.
- Erdkern** 8, 103
Erdmond 100, 102, 116ff.
Expansion (des Universums) 71
Exzentrizität der Erdbahn 36, 89
– der Merkurbahn 115
– der Planetenbahnen 99, 107, 110
- Feinstruktur** (des Russell-Diagramms) 54, 85
- Gasdruck** 56ff., 109
Gasgleichung 57
Gebirgsbildung 21ff., 123
Gezeitenhypothese 108ff.
Gezeitenreibung 64, 118ff.
Glazialkosmogonie 11, 108
Gondwanakontinent 11
Gravitationsinstabilität 67
Großflutenhypothese 124
- Heliumgehalt der Meteoriten** 8
– der Sterne 75
- Isostasie** 30
- Jahresringe** (fossile) 14
- Kälterückfälle** 35, 43, 83
Kernmodell (der Sterne) 60, 62
Klimazeugen (fossile) 13ff.
Kohlenbildungen 14
Kontinentenverschiebungen 23ff., 29, 40, 127
Kontraktionsenergie 72, 92, 94
Kontraktionshypothese 11
Konvektionsströmungen im Sima 122
– im Sterninnern 57, 64, 115
Krebsnebel 50
Kreislauf (kosmischer) 77, 96

- Leitfossilien** 3
Leuchtkraft (absolute u. scheinbare) 44
Löß 10

Masse der Planeten 99, 102
 — der Satelliten 100, 116
 — der Sonne 99
 — der Sterne 45, 55, 61, 67
Massenverlust der Sonne 114, 115, 121, 128ff.
 — der Sterne 69, 77ff., 85, 93, 130
Meteore 7
Meteoriten 7, 28, 103
Meteoritenwolke (kosmische) 7, 10
Molekulargewicht (der Sternmaterie) 57ff.
Mond (s. Erdmond)
Monde (s. Satelliten)
Mondkrater 126
Mondmare 126

Neue Sterne (s. Novae)
Novae, Novaphänomen 49ff., 84ff., 114, 115, 128
Nova Aquilae (1918) 49, 50, 95
 — — (1919) 53
 — — (1936) 53
 — **Herculis** (1934) 49, 51
 — **Lacertae** (1936) 49
 — **Sagittae** (1913) 50
Nullpunktenergie 77

Paläobiologie 88, 130
Paläoklimatologie 13ff., 79ff., 125
Pazifik 12, 123
Permanenzproblem 11
Polarklima (eisfreies u. glaziales) 15, 39, 40, 119
Polverschiebungen 22
Pulsationsvariabilität 61, 128

Radioaktivität 5, 72
Radioaktivitätshypothese 28ff., 123
Roch'sche Grenze 100, 125
Rotation der Erde 119
 — des Erdmondes 125

Rotation des Mars 121
 — des Merkur 121
 — des Neptun 122
 — der Planeten 99, 112
 — der Planetoiden 100
 — der Sonne 99, 116
 — der Sterne 45, 46, 63
 — der Venus 99, 116, 121
Rotationshypothese, 107ff., 110, 114, 116, 118ff.
Rotverschiebung (der Spiralnebel) 70, 77
Russell-Diagramm 47ff., 67, 85, 128

Satelliten, Satellitensysteme 100ff., 111, 116, 117, 126
Sauerstoffgehalt der Erdatmosphäre 12, 89
 — der Sonne 104
Schiefe der Ekliptik 24ff., 36, 38, 124
Sial 27
Sima 27, 122
Sintflutsagen 90
Siriusbegleiter (Sirius B) 55, 97
Sonnenflecken 31ff., 64, 65
Spektralklassen 45ff.
Sternhaufen 69, 85, 113
Strahlungsdruck 56ff., 107, 109, 113
Strahlungsgleichgewicht 57
Super-Novae 50, 72, 91

Tektite 10, 89
Temperatur der Sonne 45
 — der Sterne 45
 — des Sterninnern 60, 62, 69, 76, 92
 — der Planeten 105
Tillite 13

Überriesen 54
Unterriesen 54, 76
Unterströmungshypothese 28

Veränderliche Sterne 48ff., 62
 R Coronae 53
 RS Ophiuchi 52
 SS Cygni 48, 51, 83

- | | |
|---|---|
| <p>Veränderliche Sterne</p> <p> T Coronae 53</p> <p> T Pyxidis 51, 52, 85</p> <p> U Geminorum 48, 82, 83, 95, 128</p> <p> μ Cephei 53</p> <p> Y Cygni 62, 78</p> <p> Z Andromedae 52</p> <p> Z Camelopardelis 48, 51, 82, 128</p> <p>Veränderlichkeit der Sonnenstrahlung 31, 33, 42ff., 82ff., 128</p> <p>Vulkanismus 17, 21, 22</p> | <p>Wasserstoffgehalt der Sterne 58</p> <p>Welteislehre (s. Glazialkosmogonie)</p> <p>Weltinseltheorie 70</p> <p>Zustandsdiagramm 46ff.</p> <p>Zustandsgrößen der Sterne 44ff.</p> <p>Zusammenstoß der Erde mit anderen Himmelskörpern 8</p> <p>Zusammenstoß bzw. nahe Begegnung zweier Fixsterne 28, 98, 107, 108, 110, 115</p> |
|---|---|

PROBLEME DER KOSMISCHEN PHYSIK

Herausgegeben von Prof. Dr. Chr. Jensen, Hamburg

- I. Das Problem der Wettervorhersage.** Von Prof. Dr. A. Schmauß, München. 2. ergänzte Aufl. 1937. VIII, 102 S. RM. 4.40, Lw. RM. 5.60.
- II./III. Der Kugelblitz.** Von Dr. W. Brand, Marburg a. L. 1923. 170 S. Mit 2 Textabb. und 1 Tafel. Preis RM. 5.40, Lw. RM. 6.30
- IV. Die Milchstraße.** Von Prof. Dr. J. Plaßmann, Münster i. W. Nebst einem Anhang über die Nebelstraße von Dir. J. G. Hagen, S. J., Rom. 1924. 96 S. Mit 3 Abb. u. 2 Tafeln. Preis RM. 5.40, Lw. RM. 6.30.
- V. Die durchdringende Strahlung in der Atmosphäre.** Von Prof. Dr. W. Kolhörster, Berlin. 1924. 72 S. Mit 5 Abb. Preis RM. 3.60, Lw. RM. 4.50.
- VI. Gezeitenprobleme des Meeres in Landnähe.** Von Prof. Dr. A. Defant Berlin. 1925. 78 S. Mit 17 Abb. Preis RM. 5.40, Lw. RM. 6.30
- VII. Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen.** Von Prof. Dr. W. Schmidt, Wien. 1925. VIII, 118 S. Mit 5 Abb. Preis RM. 6.30.
- VIII. Entwicklung im Weltall.** Kosmogonische Probleme und Hypothesen. Von Prof. Dr. Fr. Nölke, Bremen. 1926. 134 S. Mit 10 Abb. u. 4 Tafeln. Preis RM. 6.75, Lw. RM. 7.65.
- IX. Das Problem der technischen Wetterbeeinflussung.** Von Dr. A. Wendler, Erlangen. 1927. 107 S. Mit 7 Abb. Preis RM. 5.85, Lw. RM. 6.75
- X. Die Dämmerungsercheinungen.** Von Professor Dr. P. Gruner und H. Kleinert, Bern. 1927. VIII, 124 S. Mit 6 farb. Tafeln, 1 mehrfarb. Übersichtstafel, 30 Abb. u. 11 Tab. Preis RM. 9.90, Lw. RM. 10.80
- XI. Das Zodiaklicht.** Sein Wesen, seine kosmische oder tellurische Stellung. Von Dr. Fr. Schmidt, Oberhelfenswil (St. Gallen). 1928. X, 132 S. Mit einem mehrfarbigen Titelbild, 3 Tafeln, 22 Abb. und 3 Tab. Preis RM. 9.45.
- XII. Die Haloerscheinungen.** Von Prof. Dr. R. Meyer, Riga. 1929. VI, 168 S. Mit 2 Tafeln und 22 Abb. im Text. Preis RM. 9.90, Lw. RM. 11.70.

PROBLEME DER KOSMISCHEN PHYSIK

Herausgegeben von Prof. Dr. Chr. Jensen, Hamburg

XIII/XIV. Probleme der Wasserwellen. Von Dr. H. Thorade, Hamburg. 1931. VIII, 219 S. Mit 5 Bildtafeln in Lichtdruck, 4 Karten und 110 Abb. auf 11 Tafeln. Preis RM. 18.—.

Aus dem Inhalt: Oberflächenwellen: Form und Bewegung. Entstehung der Wellen durch Wind. Ausbreitung der Wellen / Flutwellen: Grundform der Flutwellen. Umgestaltung der Flutwellen durch die Bodenformen. Umgestaltung der Flutwellen durch die Erdumdrehung. Umgestaltung der Flutwellen durch die Reibung. Uneigentliche Flutwellen.

XV. Die Aufrechterhaltung der elektrischen Ladung der Erde. Von Prof. Dr. Egon Schweidler, Wien. 1932. 68 S. Mit 8 Abb. Preis RM. 5.—, Lw. RM. 6.50.

Aus dem Inhalt: Der elektrische Zustand der Erde und der Atmosphäre: Ionisation der Atmosphäre. Das elektrische Feld und die Raumladung der Atmosphäre. Elektrische Ströme in der Atmosphäre. — Der Zustrom: Der Zustrom als Leitungsstrom in Gebieten umgekehrter Feldrichtung. Der Zustrom als Korpuskularstrahlung. Der Zustrom durch negative Träger im Gravitationsfeld. Der Zustrom als Bewegung von Ladungsträgern durch besondere Kräfte. Der Zustrom durch Konvektionsströme. Der Zustrom als Folge spontaner Ladungsänderungen. Die Schmidt-Bauerschen Ströme.

XVI. Die Wolken. Von Prof. Dr. R. Süring, Berlin. 1936. XII, 122 S. Mit 11 Abb. und 4 Tafeln. Zur Zeit vergriffen.

XVII. Die Meteore. Ihre kosmischen und irdischen Beziehungen. Von Dr. C. Hoffmeister, Sonneberg. 1937. VIII, 154 S. mit 25 Abb. im Text und 4 Tafeln. Preis RM. 8.40, Lw. RM. 9.60.

Aus dem Inhalt: Astronomischer Teil: Die Beobachtungen / Das Problem der Geschwindigkeit und seine Lösung / Kometarische Meteore / Interstellare Meteore / Das Problem der Stromradienten / Radioaktivität, Alter und Herkunft der Meteorite. Geophysikalischer Teil: Die atmosphärischen Bahnen / Vorgänge bei Meteoritenfällen. Hemmung, Streufelder, Bahnkurven / Physikalische Vorgänge / Die Bedeutung der Meteorforschung für die Physik der Atmosphäre.

XVIII. Physikalische Bioklimatologie. Probleme und Methoden. Von Dr. K. Büttner, Kiel. 1938. VII, 155 S. mit 37 Abb. Preis RM 9.—, Lw. RM 11.20.

Aus dem Inhalt: I. *S t r a h l u n g*: Einteilung der Strahlenarten / Minderung und Umwandlung der Sonnenstrahlung / Meßgeräte der Sonnen- und Himmelsstrahlung / Ultraviolett-Meßgeräte / Temperaturstrahlung / Strahlendurchlässigkeit der Haut / Spezifische Strahlenwirkungen des Ultraviolett B / Biologische Wirkungen der übrigen Spektralbereiche / Das Ultraviolettlima / UV-Normalwerte und Strahledosierung / Das Wärmestrahlungsklima. — II. *W ä r m e h a u s h a l t*: Bestandteile des Wärmehaushaltes / Energiebildung durch Verbrennungsvorgänge im Körper / Wärmespeicherung / Größe der Oberfläche / Wärmetransport im Körper / Der äußere Wärmestrom durch Leitung — Konvektion / Der äußere Wärmestrom durch Strahlung und der „trockene“ Wärmeverlust / Hauttemperatur / Summenwirkung von Wind, Strahlung und Temperatur / Wärme- und Wasserverlust der Haut durch Verdunstung / Wärmeverlust durch Atmung / Summenwirkung von Lufttemperatur, Feuchte und Wind. Die Schwüle. Die effektive oder Behaglichkeits-temperatur / Die Kleidung.

ERGEBNISSE DER KOSMISCHEN PHYSIK

Herausgegeben von Prof. Dr. L. Weickmann, Leipzig

Band I. 1931. XI, 448 S. Mit 243 Abb. Preis RM 44.—, Lw. RM 46.—

Aus dem Inhalt: C. Störmer, Über die Probleme des Polarlichtes — W. Kolhörster und L. Tuwim, Der Barometereffekt der Höhenstrahlung — W. Kolhörster und L. Tuwim, Absorptionskoeffizienten der Höhenstrahlung — F. W. Paul Götz, Das atmosphärische Ozon — P. Duckert, Ausbreitung von Explosionswellen in der Erdatmosphäre — F. Hopfner, Neue Wege zur Bestimmung der Erdfigur — F. M. Exner, Dynamik der Bewegungsformen auf der Erdoberfläche.

Band II. 1933. XII, 364 S. Mit 102 Abb. und 4 Karten. Preis RM 33.—, Lw. RM 35.—

Aus dem Inhalt: M. Lagally, Mechanik und Thermodynamik des stationären Gletschers (RM 7.—) — V. F. Hess, Die Ionisierungsbilanz der Atmosphäre (RM 5.—) — F. A. Vening Meinesz, Ergebnisse der Schwerkraftbeobachtungen auf dem Meere in den Jahren 1923—1932 (RM 5.—) — B. Gutenberg, Das „Seismological Laboratory“ in Pasadena (RM 3.—) — W. Kolhörster, und L. Tuwim, Richtungsverteilung der Höhenstrahlung — S. Fujiwhara, T. Tsujimura and S. Kusamitsu, On the Earth-Vortex, Echelon faults and Allied Phenomena (RM 7.—).

Die Beiträge aus Band II sind auch einzeln zu beziehen, der Beitrag 5 zusammen mit den Beiträgen 2 und 3 von Band I unter dem Titel „Kolhörster und Tuwim, Physikalische Probleme der Höhenstrahlung“ zum Preise von RM 12.—.

Band III: Physik der Atmosphäre. 1938. XI, 333 S. Mit 135 Abb. Preis RM 30.—, Lw. RM 32.—

Aus dem Inhalt: J. Zenneck, Physik der hohen Atmosphäre — R. Steinmaurer, Die Erforschung der kosmischen Strahlung im letzten Jahrzehnt — P. Gruner, Neueste Dämmerungsforschungen — H. Landsberg, Atmospheric condensation nuclei — F. W. Paul Götz, Die vertikale Verteilung des atmosphärischen Ozons.

Band IV: Physik der Hydro- und Lithosphäre. 1939. X, 293 S. Mit 161 Abb. Preis RM 29.—, Lw. RM 31.—

Aus dem Inhalt: V. W. Ekman, Neuere Ergebnisse und Probleme zur Theorie der Konvektionsströme im Meere — H. Jeffreys, Deep Focus Earthquakes — Ch. Tsuboi, Deformations of the Earth's Crust as Disclosed by Geodetic Measurements — B. Gutenberg, Zur Entwicklung der seismischen Aufschlußmethoden — V. Fritsch, Einiges über den Aufbau und die Eigenschaften geologischer Leiter.