

nage de radiation, production des gerbes). Les contradictions de l'ancienne théorie des quanta interdisaient ces calculs.

Les méthodes employées par HEITLER, PENG et GORA (1942) à (1945) correspondent aux résultats obtenus par un choix particulier d'électrodynamique fonctionnelle (resp. de «meso» dynamique) (BOUVIER et STUECKELBERG (1944)).

§ 3. La signification du principe de correspondance spatio-temporel

Ajoutons enfin quelques réflexions destinées à faire comprendre le principe de correspondance spatio-temporel: Le principe de correspondance impulsio-énergétique avait obligé le physicien à penser en images abstraites. La position et l'impulsion d'une particule n'avaient plus de sens précis (principe d'incertitude de HEISENBERG). Une abstraction du même genre, mais sur un plan tout à fait différent, est exigée aujourd'hui pour pouvoir penser en mécanique fonctionnelle. Nous avons décrit ci-dessus le problème, dans lequel un électron entrait dans un condensateur $\tilde{E}^{(inc)}$ et nous parlions à tout instant de la possibilité de voir l'évolution de ce phénomène. Or, par «voir», on comprend l'analyse très approfondie de $\tilde{E}(\tilde{x}, t)$ à une distance $|\tilde{x} - \tilde{z}| \gg c\tau$. Cette analyse rend possible la détermination, à tout instant t , de la distribution ρ et \tilde{J} de charge et courant libres. Ils sont définis comme les inhomogénéités des équations (4a). Or, on peut montrer que, pour toute électrodynamique asymptotique, dont le $\tilde{E}(\tilde{x}, t)$ à l'infini correspond à une source libre ponctuelle, on observera toujours que le point singulier $\tilde{z}(t)$ ainsi calculé s'accélère à un instant $t = t_0'$, qui précède l'entrée à $t = t_0$ de ce point dans le condensateur.

Indépendamment de l'électrodynamique particulière choisie, la valeur minimale de la différence $t_0 - t_0'$ est toujours $\gg 2\tau$. Cette «prémonition de l'électron» (anthropomorphisme qui identifie le «point vu» avec l'«endroit de l'électron») a été introduite par DIRAC (1938).

Comme certains auteurs (BOPP (1944)) essayent de trouver des théories dans lesquelles cette prémonition serait absente, il nous semble utile d'indiquer les raisons montrant que toute tentative semblable est vouée à un échec.

Le paramètre τ est un invariant caractérisant l'interaction entre particule et champ électromagnétique. Il s'introduit automatiquement dans le formalisme différentiel, en vertu du principe de conservation d'énergie, pour autant qu'un tel formalisme différentiel correspondant existe¹. Ce n'est que dans ce formalisme différentiel qu'il donne lieu à cette prémonition. Le paradoxe de cette prémonition est ainsi purement une affaire de langage: Si l'on veut, à tout prix, énoncer la théorie dans le langage d'équations différentielles ((4) et (4a)) pour une particule ponctuelle ayant à chaque instant t un endroit $\tilde{z}(t)$, on doit attribuer à ces particules une prémonition s'étendant sur 2τ . — Mais, si l'on renonce à donner un sens précis ($\approx 2c\tau \sim 3,6 \times 10^{-13}$ cm. près) à la notion de l'endroit \tilde{z} d'une particule élémentaire, on choisit un autre langage où $\Delta z \geq 2c\tau$ et $\Delta t \geq 2\tau$ jouent le rôle d'une incertitude spatio-temporelle dans l'espace-temps quadridimensionnel physique, analogue à l'incertitude $\Delta z \Delta P \geq h$ et $\Delta t \Delta H \geq h$ impulsio-énergétique dans l'espace-temps octodimensionnel de phase.

Littérature

BOPP, Ann. d. Phys. 38, 345 (1940); 43, 573 (1943). — BOPP, sous presse (1944). — BOUVIER et STUECKELBERG, C. R. Soc. Phys. et Hist. Nat. Genève, 61, 162 (1944). — DIRAC, Proc. Roy. Soc. 167, 198 (1938). — HEISENBERG (1943) à (1945), Z. f. Phys. 120, 513 et 673 et deux articles sous presse. — LANDÉ et THOMAS, Phys. Rev. 60, 514, (1941). — STUECKELBERG Nature, 144, 118; 153, 143 (1939) à (1945); Helv. Phys. Acta, 14, 51 (réf. I); 16, 427; 17, 3 (réf. II); 18, 21 (réf. III); 18, sous presse (réf. IV). — WENTZEL, Z. f. Phys. 86, 479 et 635 (1934). — WENTZEL, Helv. Physica Acta, 13, 269 (1940) à (1945), et des articles suivants dans les Helv. Physica Acta. — WENTZEL et FIERZ, Helv. Physica Acta, 17, 215 (1944).

¹ Ce qui est nullement nécessaire en mécanique fonctionnelle (cf. IV).

Moderne Kosmogonie

Von E. v. d. PAHLEN

Von den zahlreichen Ästen, die der uralte Stamm der astronomischen Wissenschaft im Laufe seiner vielhundertjährigen Entwicklung getrieben hat, ist die Kosmogonie heute zweifellos der schmächtigste und der am stärksten zurückgebliebene; und dies hängt keineswegs mit einem Mangel an Interesse für die Fragen des Werdens und Vergehens der Himmelskörper oder des gesamten Weltalls zusammen, die ganz im

Gegenteil stets das brennendste Interesse weitester Fach- und Laienkreise auf sich gefesselt haben, sondern mit den gerade diesem Gebiete der astronomischen Forschung eigentümlichen, besonders großen Schwierigkeiten, die uns die Erlangung eines einigermaßen sicheren Wissens auf ihm beinahe unmöglich machen. Das Bild, welches das Universum dem kurzebigen menschlichen Beobachter bietet, ist weit-

gehend ein statisches, und wenn auch die zahlreichen in ihm wahrzunehmenden Veränderungen von jeher die besondere Aufmerksamkeit der Sternkundigen auf sich gelenkt haben, so mußte doch schon sehr früh erkannt werden, daß die Bewegungen der Gestirne, und sogar die in ihnen beobachtbaren physikalischen Veränderungen, einen überwiegend periodischen Charakter tragen, mithin die Welt immer wieder in einen Zustand zurückführen, in dem sie sich bereits zu einer früheren Zeit befunden hat. Gerade dieser Tatsache ist es ohne Zweifel zu verdanken, daß der Begriff des Ewigen und Unwandelbaren bis auf den heutigen Tag noch so untrennbar mit der Vorstellung vom gestirnten Himmel verbunden geblieben ist. Die sich dem menschlichen Forschergeiste aufdrängende Frage nach der Entstehung und dem zukünftigen Schicksal des Weltalls würde daher seitens der exakten Wissenschaft niemals eine Antwort erhalten haben können, wenn es nicht durch ein außerordentlich mühsames und sorgfältiges Studium der einzelnen astronomischen Objekte gelungen wäre, unter diesen gewisse Sequenzen von Gestalten zu ermitteln, die als zeitlich aufeinanderfolgende Erscheinungsformen eines und desselben Gebildes gedeutet werden konnten, und dadurch das empirisch gegebene räumliche Nebeneinander in ein zeitliches Nacheinander, also in eine hypothetische Entwicklungskette, zu verwandeln. Da diese Abläufe, wegen der riesigen von ihnen beanspruchten Zeiträume, niemals der direkten Beobachtung zugänglich sein werden, und auch ihre Reproduktion im Laboratoriumsmaßstabe, wegen der überwiegenden Rolle, die in ihnen den nur bei Wechselwirkungen von Massen kosmischer Ausmaße merklich in Erscheinung tretenden Gravitationskräften zukommt, ausgeschlossen erscheint, bleibt uns um den ursächlichen Zusammenhang zwischen den einzelnen Gliedern der erwähnten Kette zu vermitteln, eigentlich nur unser aus irdischer Erfahrung gewonnenes, höchst unzulängliches theoretisches Wissen von den Eigenschaften der Materie als Wegweiser übrig. Es ist begreiflich, daß sich unter diesen Umständen unsere Vorstellungen über die Entwicklungsprozesse im Weltall noch auf einer sehr primitiven Stufe bewegen, und weder auf große Klarheit noch auf Sicherheit einen Anspruch erheben dürfen. Im nachfolgenden soll der Versuch gemacht werden, einen Überblick über ihren derzeitigen Stand zu geben.

Schon die antike Wissenschaft war von der Überzeugung durchdrungen, daß die sich in den Himmelserscheinungen offenbarenden Welt kein Chaos, sondern ein Kosmos, d. h. ein wohlgeordnetes, unter der Herrschaft einfacher, dem menschlichen Geiste verständlicher Gesetze stehendes harmonisches Ganze ist. Die Beantwortung der Frage nach der Entstehung dieser Harmonie lag allerdings, bei den sehr mangelhaften physikalischen Kenntnissen des Altertums, ganz außerhalb der Mittel der damaligen Wissenschaft, und wurde daher in zum Teil höchst sinnreichen, jedoch wissen-

schaftlich wertlosen Legenden und Fabeln gesucht: die Kosmogonie des Altertums ist, bis auf ganz ver einzelte Erscheinungen, Mythologie. Dagegen schien die Frage nach dem gegenwärtigen Aufbau der Welt, die dann meistens als unveränderlich seit aller Ewigkeit bestehend, oder durch einen einmaligen Schöpfungsakt ins Dasein gerufen gedacht wurde, dem menschlichen Verstande zugänglicher zu sein, und so sehen wir seit den frühesten Zeiten, neben der noch im Keime liegenden Kosmogonie, eine reich entwickelte *Kosmologie* auftreten, die auch später die Entwicklung der astronomischen Wissenschaft stets begleitet hat, ja in gewissem Sinne die eigentliche Triebfeder dieser Entwicklung gewesen ist, und die nach einem vorübergehenden Tiefstande im nüchternen, jeder gewagten Spekulation abholden 19. Jahrhundert, zu unserer Zeit wieder in voller Blüte steht. Die Weltsysteme des Ptolemeus und des Kopernikus mit ihren idealen Kreisbewegungen, sowie der von Kepler unternommene Versuch, den Aufbau des Sonnensystems durch Zuordnung der Planeten den regulären Körpern der Geometrie zu erklären, die uns heute nur als mehr oder weniger glückliche Lösungsversuche eines astronomischen Teilproblems erscheinen, verfolgten zur Zeit ihrer Aufstellung kein geringeres Ziel, als die Aufdeckung der einfachen Prinzipien, die dem Aufbau des Weltalls seit aller Ewigkeit oder seit seiner Erschaffung zugrunde liegen, und sind in diesem Sinne als echte Kosmologien anzusprechen. Wir brauchten, bei der Schilderung der modernen kosmogonischen Bestrebungen, auf diese ihnen parallel laufenden kosmologischen Spekulationen keine weitere Rücksicht zu nehmen, wenn sich beide, dank einer vor etwa 20 Jahren bei der Erforschung des Systems der sogenannten Außergalaktischen Nebel gemachten astronomischen Entdeckung, in jüngster Zeit nicht in höchst eigentümlicher Weise miteinander verquickt hätten.

Die Geburt einer wissenschaftlichen Kosmogonie fällt in die zweite Hälfte des 18. Jahrhunderts, und war einerseits durch die zu dieser Zeit bereits erlangte, ziemlich weitgehende Kenntnis der verschiedenen am Himmel auftretenden Objekte, andererseits durch die Fortschritte der mathematischen Physik, welche die theoretische Verfolgung auch eines experimentell nicht reproduzierbaren physikalischen Prozesses ermöglichten, bedingt. Die «Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels» von KANT (1752), die eine Erklärung der Entstehung aller Himmelskörper aus dem ursprünglichen Chaos geben will, sowie das Kapitel der «Exposition du Système du Monde» von Laplace (etwa um 1800, abgedruckt als Note VII in seinen gesammelten Werken, 1835), das sich mit der Frage der Entstehung der Planeten und Satelliten aus einem ursprünglich rotierenden Gasballe beschäftigt, und die in späterer Zeit nicht ohne eine gewisse Willkür unter dem Namen der «Kant-Laplaceschen Theorie» zur kosmogonischen Theorie par excellence des 19. Jahr-

hunderts zusammengefaßt worden sind, bilden den Ausgangspunkt dieser neuen Entwicklung. Doch auch die kosmologischen Bestrebungen fanden um dieselbe Zeit eine ihrer berühmtesten Formulierungen in den von den Zeitgenossen mit größter Begeisterung aufgenommenen «Kosmologischen Briefen über die Einrichtung des Weltbaues» von LAMBERT (1761), die den Kosmos aus einer Reihe ineinander geschachtelter und einander übergeordneter Systeme zu erklären versuchten, indem sie die vom Sonnensystem her gewonnene Erfahrung einfach auf das Weltall übertrugen und die Sonne als Planeten um eine noch größere Zentralsonne, letztere wiederum um einen Zentralkörper noch höherer Ordnung usw. rotieren ließen. Von diesem fein ausgeklügelten System ist heute allerdings nichts mehr übriggeblieben, während die kosmogonischen Gedanken von KANT und LAPLACE sich immer noch in gewissen Beziehungen als lebensfähig und fruchtbar erweisen.

Der Begriff «Kosmogonie» kann in zwei verschiedenen Bedeutungen aufgefaßt werden: erstens als allgemeine Kosmogonie, die die Entstehung des gesamten physischen Weltalls zu erklären versucht, und zweitens als spezielle Kosmogonie, die eine theoretische Erklärung für die Entstehung und Verwandlung der einzelnen uns vom Himmel her bekannten Gebilde zu geben unternimmt. Es ist klar, daß die Probleme der letzteren Art viel leichter als das erstere einer wissenschaftlichen Behandlung zugänglich gemacht werden können, und sie haben denn auch in den seit KANT und LAPLACE verflossenen etwa zwei Jahrhunderten beinahe ausschließlich die Aufmerksamkeit der Forscher auf sich gelenkt. Unter dem Einfluß dieser Entwicklung hat auch die Bedeutung des Wortes Kosmogonie, das ja ursprünglich die Entstehung des ganzen Kosmos zu umfassen bestimmt war, eine weitgehende Wandlung erfahren, so daß wir heute jedes Problem, das sich auf die zeitliche Verwandlung irgendeines astronomischen Gebildes bezieht, als ein kosmogonisches bezeichnen. Nur in allerjüngster Zeit ist, in Verbindung mit der oben bereits erwähnten astronomischen Entdeckung, auch das Grundproblem der allgemeinen Kosmogonie, nämlich die Erklärung der Entstehung der Materie überhaupt, wieder in den Mittelpunkt des Interesses gerückt, weil sich, wie weiter unten noch ausgeführt werden soll, eine neue Möglichkeit eröffnet zu haben scheint, es von der astronomischen Seite anzupacken.

Um die derzeitige Lage der kosmogonischen Forschung zu charakterisieren, müssen wir einerseits die wichtigsten uns heute bekannten astronomischen Objekte, andererseits die uns zu ihrer Deutung zur Zeit zur Verfügung stehenden theoretischen Ergebnisse einer kurzen Durchmusterung unterziehen. Natürlich kann diese Durchmusterung hier nur in ganz gedrängter Form, unter Weglassung alles nicht absolut Wesentlichen, vorgenommen werden.

Unter weitgehender Schematisierung haben wir auf der empirischen Seite im wesentlichen drei Typen von Objekten:

1. die Galaxien,
2. die Sterne,
3. die Planeten.

1. Seitdem man in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts zu der endgültigen Erkenntnis gekommen ist, daß die sogenannten Außergalaktischen Nebel, zu denen auch die Spiralnebel gehören, fremde «Milchstraßen», d. h. riesige aus Sternen, Gasmassen und kosmischen Staubwolken bestehende Zusammenballungen der Materie darstellen, hat unsere eigene Milchstraße aufgehört, für uns ein einmaliges Phänomen zu sein und ihren richtigen Platz unter einer wahrscheinlich nach Millionen zählenden Kategorie von weitgehend gleichartigen Objekten, die wir heute mit dem Ausdrucke «Galaktische Systeme» oder «Galaxien» bezeichnen, eingenommen. Und hier, wie auch bei der nächstfolgenden Kategorie von astronomischen Objekten, den Sternen, tritt uns die höchst bemerkenswerte Tatsache entgegen, daß sich diese so überaus zahlreichen Objekte in eine verhältnismäßig sehr kleine Anzahl von Typen, die außerdem noch ganz stetige Übergänge untereinander zeigen, zusammenfassen lassen. Sie lassen sich nämlich in ein System von Sequenzen, oder *einparametrischen* Scharen einordnen, und es liegt selbstverständlich sehr nahe, diesen Parameter mit der Zeit zu identifizieren oder wenigstens mit dieser in enge Verbindung zu bringen. Dieses System von Sequenzen, wie es sich für die Galaxien aus den epochemachenden Untersuchungen von E. HUBBLE ergeben hat, ist in der untenstehenden Abb. 1 dargestellt.

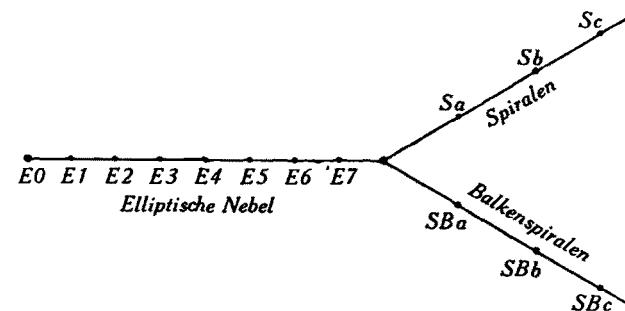


Abb. 1. Klassifikation der Außergalaktischen Nebel

Die Sequenz scheint mit den Außergalaktischen Nebeln anzufangen, die sich als kreisförmige, diffus leuchtende Scheiben auf die Himmelssphäre projizieren und daher vermutlich in ihrer Mehrzahl wirklich annähernd sphärische Gestalt haben. Diese mit *E 0* bezeichnete Klasse bildet den Ausgangspunkt der Sequenz der elliptischen Nebel, die bei stets zunehmender Elliptizität in acht Klassen, von *E 0* bis *E 7* (mit einem Achsenverhältnis von etwa 1:3), eingeteilt werden. An dieser Stelle hört die Sequenz der elliptischen Ne-

bel auf und teilt sich in die beiden Sequenzen der Spiralnebel, nämlich der gewöhnlichen Spiralnebel (Klassen *Sa*, *Sb*, *Sc*), und der von den englischen Autoren als «barred spirals» bezeichneten Nebel, für die es in der deutschen Literatur noch keine einheitliche Bezeichnung gibt, die man gelegentlich, nicht sehr treffend, als geschlossene Spiralen bezeichnet hat, die aber wohl besser «Balkenspiralen» genannt werden sollten, weil die (mitunter auch weit geöffneten) Spiralarme bei ihnen ihren Ursprung, nicht wie bei den normalen Spiralen unmittelbar im Kern, sondern von den beiden Enden eines geradlinigen Nebelstrichs (Balkens) zu nehmen scheinen (Klassen *SBa*, *SBb*, *SBc*). Längs beider Spiralsequenzen nimmt die Öffnung der Spiralwindungen mit fortschreitender Klasse von *a* bis *c* stetig zu (der Winkel zwischen Spiralarm und Radius Vektor nimmt ab). Einige besonders markante Vertreter der oben aufgezählten Typen von Nebeln sind in Abb. 2 zusammengestellt worden. In dieses einfache Schema

lassen sich nun etwa 98% der einige hundert Bilder enthaltenden Sammlung von Nebelaufnahmen, die HUBBLE zur Verfügung standen, zwanglos einordnen, während etwa 2% von ihm als unregelmäßige Spiralnebel klassifiziert worden sind. Die Spiralnebel sind im Gegensatz zu den elliptischen Nebeln ganz flache Gebilde, so daß die Abplattung von einem Ende der Serie zum anderen (von *E0* bis *Sc* und *SBc*) ständig zunimmt, und bei den Objekten der letzten Klassen einen Grad erreicht, der sie mit der Verteilung der Sterne in unserem Milchstraßensysteme in Parallele zu stellen gestattet.

Die äußeren Teile der großen Spiralnebel, namentlich der «späteren» Klassen, zeigen eine deutlich kernige Struktur, und da einige der in ihnen sichtbaren hellen Klümpchen Lichtveränderungen erfahren, von

genau derselben Art, wie wir sie in unserer Galaxie bei einigen veränderlichen Sternen (der sogenannten Cepheiden-Klasse) beobachten, kann es kaum noch zweifelhaft erscheinen, daß wir es hier auch in den Nebeln mit einzelnen Sternen zu tun haben. Dagegen ist die Auflösung der mittleren Teile auch der allergrößten (uns am nächsten liegenden) Spiralnebel in Sterne noch auf keiner Aufnahme gelungen, und auch in den elliptischen Nebeln sind einzelne Sterne noch nie gesehen worden, was allerdings bei den sehr großen,

nach Millionen von Lichtjahren zählenden Entfernungen dieser Objekte, noch nicht als Beweis dafür angesehen werden kann, daß sie nicht doch zu einem großen Teile aus Sternen, wenn auch vielleicht nicht aus Sternen der größten Leuchtkraft, bestehen. Die Spiralnebel befinden sich, wie die Messung der Dopplerverschiebungen in den Spektren ihrer verschiedenen Teile gezeigt hat, in ziemlich schneller Rotation. Die Geschwindigkeiten, mit denen sich ihre äquatorialen Teile bewegen,

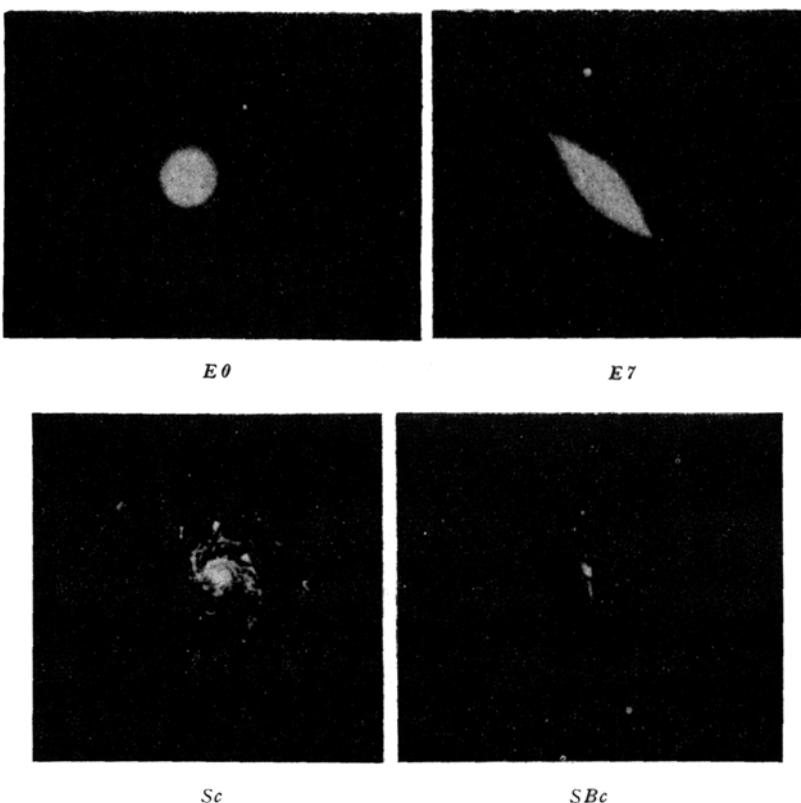


Abb. 2. Beispiele verschiedener Typen von außergalaktischen Nebeln.
(H. JEANS, Astronomy and Cosmogony, Plate IX gegenüber S. 334, und Plate X gegenüber S. 336.)

sind von der Größenordnung einiger hundert Kilometer pro Sekunde, was jedoch, bei ihren riesigen Ausmaßen (Durchmesser von der Größenordnung von 10 000 Lichtjahren) auf Umdrehungsperioden von Hunderten von Millionen von Jahren führt.

2. Die heute allgemein gebräuchliche Klassifikation der Sterne beruht auf zwei Merkmalen, durch die ihr physikalischer Zustand weitgehend charakterisiert werden kann: ihrer absoluten Leuchtkraft, d. h. der Gesamtmenge der Strahlungsenergie, die sie in der Zeiteinheit in den umgebenden Raum aussenden, und der an ihren Oberflächen herrschenden Temperatur. Letztere wird natürlich durch die kontinuierliche Intensitätsverteilung der Strahlung in ihren Spektren bestimmt, aber auch durch das Auftreten verschiedener Absorptionslinien, die den an ihren Oberflächen

herrschenden Ionisationszustand der verschiedenen Elemente (der wiederum von der Temperatur abhängt) charakterisieren. Die Leuchtkraft eines Sternes konnte früher nur aus seiner scheinbaren Helligkeit in Verbindung mit seiner Entfernung bestimmt werden, neuerdings ist aber eine Reihe von Kriterien entwickelt worden, die dieses Merkmal auch aus dem Verhalten gewisser Spektrallinien, ohne jede Kenntnis der Entfernung zu bestimmen gestatten, so daß letztere

wiedergegeben ist. Als Abszissen dienen hier die Spektralklassen, die wie gesagt die Oberflächentemperaturen der Sterne vertreten, als Ordinaten — die absoluten Leuchtkräfte, in der in der Astronomie üblichen logarithmischen «Größenklassen-Skala», in der die Größenklasse mit zunehmender Helligkeit abnimmt und die absolute Leuchtkraft der Sonne etwa gleich +5 ist. Man sieht, daß die Sterne im wesentlichen in zwei Sequenzen zerfallen, von denen die erste

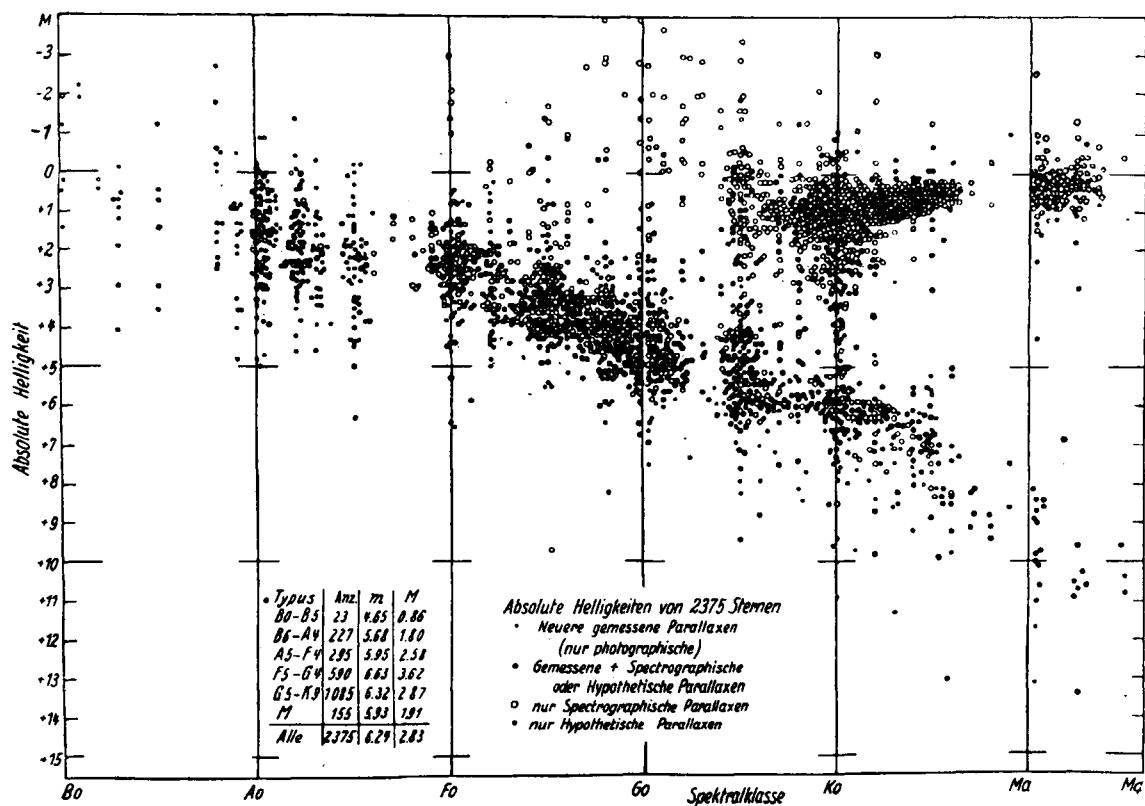


Abb. 3. Das Russell-Diagramm. Verteilung von 2375 Sternen in bezug auf ihre absolute Helligkeit und Spektralklasse.

umgekehrt aus ihm und der beobachteten scheinbaren Helligkeit berechnet werden kann (Methode der spektroskopischen Parallaxen). Nach der Beschaffenheit ihrer Spektren wird die große Masse der Sterne heute im wesentlichen (bei Vernachlässigung gewisser seltener Typen) in sieben Spektralklassen eingeteilt, die durch die Buchstaben *O, B, A, F, G, K, M* (in dieser historisch entstandenen Reihenfolge) bezeichnet werden. Diese Reihenfolge der Spektraltypen entspricht ungefähr einer Ordnung der Sterne nach abnehmender Temperatur ihrer Oberfläche, wenn auch die Temperaturunterschiede längs der Spektralserie keineswegs gleich sind, sondern von links nach rechts ständig abnehmen.

Wenn nun die Sterne nach den beiden obenerwähnten Merkmalen in ein Korrelationsdiagramm eingetragen werden, dann ergibt sich das berühmte, von H. N. RUSSELL zuerst konstruierte und nach ihm benannte Diagramm, das in der nebenstehenden Abb. 3

praktisch parallel der Abszissenachse verläuft (also durch praktisch konstante Leuchtkraft ausgezeichnet ist), während sich die zweite, einen beträchtlich größeren Prozentsatz aller Sterne enthaltende Sequenz schräg von der linken oberen Ecke des Diagramms nach der rechten unteren Ecke hinzieht. Auf der rechten Hälfte des Diagramms, also für die Spektralklassen *K* und *M*, gehören zu jedem Spektraltypus zwei bevorzugte Werte der Leuchtkraft, und da die Oberflächentemperaturen der Sterne beider Arten (und daher auch die Strahlungsintensitäten der Flächeneinheit ihrer Oberflächen) praktisch dieselben sind, kann der große Unterschied in den Leuchtkräften nur durch eine sehr verschiedene Größe dieser Oberflächen, und mithin auch der Durchmesser der betreffenden Sterne, erklärt werden. Während also die Sterne der oberen Sequenz *Riesensterne* sind, haben wir es bei den Sternen des schrägen Astes, der auch die «Hauptsequenz» genannt wird, mit *Zwergsternen* zu tun. In einigen astro-

nomischen Gebilden (den kugelförmigen Sternhaufen) erscheint, außer den auf der Abb. 3 zu sehenden Ästen, noch ein, hier über den oberen Rand der Figur hinausführender Ast der Überriesen oder Hypergiganten, und ferner würde, falls unser statistisches Material für das Sternsystem vollständig wäre, etwa parallel zu der Abszissenachse, aber im unteren Teile des Diagramms, auch der Ast der sogenannten *weißen Zwerge* einzutragen sein, d. h. der Sterne, deren Oberflächentemperatur zwar hoch, deren Leuchtkraft aber, und daher auch deren Durchmesser, sehr klein sind. Von diesen Sternen ist, wegen ihrer geringen Helligkeit, zunächst nur eine sehr kleine Anzahl bekannt, da diese aber alle in einem verhältnismäßig sehr kleinen Raumvolumen in der Umgebung unserer Sonne liegen, muß ihre räumliche Dichte in unserem Sternsystem eine außerordentlich große sein. Da die Massen der Sterne in viel engeren Grenzen zu schwanken scheinen, als ihre Volumina, müssen wir in den Riesensternen, deren Durchmesser den Durchmesser der Sonne um das Hundertfache und mehr übersteigen, ganz diffuse, nebulöse Gebilde sehen; die Zwergersterne, zu denen auch die Sonne gehört, haben eine mittlere Dichte, die etwa der Dichte des Wassers entspricht, während sich für die weißen Zwerge Dichten von den phantastischen Beträgen von 20000 und mehr ergeben, so daß die vermutlich vollständig ionisierten Atomkerne und Elektronen, aus denen sie bestehen, höchst wahrscheinlich ein entartetes Gasgemisch darstellen. Das Sequenzenschema für die Sterne scheint nicht so einfach zu sein, wie es sich für die Galaxien erwiesen hat, und es fällt hier viel schwerer, den die einzelnen linearen Sequenzen beherrschenden Parameter mit der Zeit in Verbindung zu bringen; es ist aber trotzdem außerordentlich bemerkenswert und sicher bedeutungsvoll, daß die nach Milliarden zählenden astronomischen Gebilde, die wir Sterne nennen, und die so tiefgehende Unterschiede voneinander zu zeigen scheinen, sich in eine so geringe, leicht übersehbare Anzahl einparametrischer Sequenzen einordnen lassen.

Die Sterne befinden sich im allgemeinen in Rotationsbewegung um eine durch ihren Mittelpunkt gehende Achse, wobei die Rotationsgeschwindigkeit sehr verschiedene Beträge haben kann. Bei der Sonne bewegen sich die auf dem Äquator liegenden Oberflächenteile mit einer Geschwindigkeit von etwa 2 km/sec, doch sind uns andere Sterne bekannt (die hauptsächlich den «frühen» Spektralklassen *O*, *B* und *A* angehören), bei denen diese Geschwindigkeit den Betrag 100 km/sec erreicht oder sogar übersteigt. Schließlich muß noch hervorgehoben werden, daß über ein Viertel aller uns bekannten Sterne Doppelsterne sind, d. h. aus zwei (und zuweilen auch mehr) Komponenten bestehen, die um einander geschlossene KEPLERSche Bahnen beschreiben, wobei sowohl das Massenverhältnis der Komponenten als auch ihre Durchmesser und die Bahnelemente in weiten Grenzen schwanken

können. Es sind uns Doppelsterne bekannt, bei denen die zweite Komponente viel kleiner als die erste ist, und um letztere eine weite Bahn, als eine Art leuchtender Planet beschreibt, aber auch solche, die aus zwei beinahe gleichen Komponenten bestehen, die so enge Bahnen um einander beschreiben, daß sich ihre Oberflächen berühren müssen. Es ist natürlich schwer, sich hierbei des Eindruckes zu erwehren, daß namentlich letztere Doppelsternsysteme, oder wenigstens ein großer Teil von ihnen, durch Spaltung eines ursprünglich einfachen Gebildes entstanden sein müssen.

3. Bei der dritten Stufe von astronomischen Objekten, nämlich den Planeten, können wir die bei den zwei ersten angestellten statistischen Betrachtungen nicht in der früheren Weise fortsetzen, weil uns außer unserem eigenen, aus einer beschränkten Zahl von Körpern bestehenden Planetensystem kein anderes bekannt ist, und wir daher dieses System zunächst als ein allein dastehendes Individuum behandeln müssen. Trotzdem fordert auch dieses Gebilde den menschlichen Geist zu kosmogonischen Betrachtungen geradezu heraus, und zwar wegen der in ihm herrschenden, schon den Astronomen des Altertums aufgefallenen außerordentlich weitgehenden Gesetzmäßigkeiten seiner Anordnung, die von den Forschern oft als «vollendete Harmonie» bezeichnet worden ist, und die augenscheinlich nur durch die Entstehungsgeschichte dieses Gebildes erklärt werden kann. Die Eigenschaften, die das Konglomerat der sich um die Sonne bewegenden Planeten zu einem wohlgeordneten System stempeln, bestehen im wesentlichen in folgendem:

a) Die Bahnen der Planeten sind, mit nur ganz geringfügigen Ausnahmen (Asteroiden), nahezu kreisförmig (die Bahnexzentrizitäten sind durchweg sehr klein);

b) Diese Bahnen sind alle praktisch komplanar, d. h. daß ihre Ebenen beinahe genau zusammenfallen, und auch mit der unveränderlichen Ebene des Gesamtsystems, die im wesentlichen durch die Lage der Jupiterbahn bestimmt ist;

c) Die Bewegungen aller Planeten erfolgen in einem und demselben Sinne (der von den Astronomen als rechtläufig bezeichnet wird), nämlich vom Nordpol der Erde aus gesehen, in der dem Uhrzeiger entgegengesetzten Richtung;

d) Um sechs von den neun großen Planeten bewegen sich Trabanten oder Satelliten, so daß sie gewissermaßen verkleinerte Auflagen des Sonnensystems darstellen, und die Bewegungen dieser Begleiter befolgen im wesentlichen auch die unter a-c angeführten Gesetzmäßigkeiten;

e) Schließlich, und das ist vielleicht das Erstaunlichste von allem, besteht zwischen den Entfernungen der Planeten von der Sonne eine einfache, gesetzmäßige Beziehung, die durch die berühmte TITIUS-BODESche Formel ausgedrückt wird, aus der man die relativen Entfernungen aller Planeten genähert be-

rechnen kann, wenn man eine in sie eingehende Größe der Reihe nach alle *ganzen* Zahlen durchlaufen läßt. In der ihr von C. V. L. CHARLIER gegebenen besonders einfachen Form, lautet die BODESche Formel:

$$r_n = 4 + 3 \cdot 2^n \quad (1)$$

wo r_n die Entfernung eines Planeten von der Sonne bezeichnet, und die Entfernung der Erde gleich 10, also dem Werte $n=1$ entsprechend, zu setzen ist. (Die Entfernung der Venus entspricht dann mit $r=7$, dem Werte $n=0$, die Entfernung des Merkurs, mit $r=4$, dem Werte $n=-\infty$. Die Asteroiden sind hierbei als ein einziger Planet zu betrachten und stehen in der mittleren Entfernung 22, entsprechend dem Parameterwerte $n=3$.) Auf die Deutung dieser Beziehung werden wir weiter unten noch ausführlich eingehen müssen.

Bei dieser kurzen Übersicht der kosmogonisch wichtigen astronomischen Objekte haben wir gewisse Gebilde, denen mitunter auch eine beträchtliche kosmogonische Bedeutung zugeschrieben worden ist, wie die kugelförmigen und offenen Sternhaufen, die Gasnebel usw. ganz unberücksichtigt gelassen, weil wir es nur auf eine ganz schematische Darstellung der wichtigsten und verbreitetsten Typen astronomischer Objekte abgesehen hatten, und weil die Bedeutung der letztgenannten, verhältnismäßig seltenen Gebilde für die Erklärung des Werdens des Weltalls, nach den Ergebnissen der neueren Forschung, seinerzeit wahrscheinlich übertrieben worden ist.

Was haben wir nun dieser Fülle von Erscheinungen auf der theoretischen Seite gegenüberzustellen? Es ist klar, daß die Antwort auf das uns von ihnen aufgegebene Rätsel in jener mathematischen Disziplin gesucht werden muß, die die Gleichgewichtsformen von in Rotation befindlichen gravitierenden Massen untersucht; denn die äußerst langsam Änderungen, die die Himmelskörper mit der Zeit erfahren, können höchst wahrscheinlich als ein Durchlaufen einer Reihe von Gleichgewichtszuständen gedeutet werden, und andererseits ist es die bei einer Rotation auftretende Zentrifugalkraft, die vermutlich in erster Linie für die Abweichung eines im Raum isoliert schwebenden Gebildes von der Kugelgestalt verantwortlich gemacht werden muß. Trotz der sehr großen Schwierigkeiten, die die Entwicklung dieser Theorie in einzelnen konkreten Fällen bietet, sind ihre Grundlagen von einer außerordentlichen Einfachheit:

Das Gleichgewicht innerhalb einer freischwebenden, um eine feste Achse mit gleichmäßiger Winkelgeschwindigkeit rotierenden, gravitierenden Materiemasse wird durch die Bedingung bestimmt, daß die auf jedes materielle Teilchen wirkenden Kräfte sich in einem mitrotierenden Koordinatensystem in ihrer Summe aufheben müssen. Diese Kräfte sind aber:

1. die von der gesamten Masse auf das an der betrachteten Stelle befindliche Teilchen ausgeübte Gravitationskraft, die bekanntlich als der Gradient des von

der Gesamtmasse herrührenden Gravitationspotentials an der betreffenden Stelle dargestellt werden kann;

2. die von der Rotation des Gebildes herrührende Zentrifugalkraft, die sich ebenfalls auf eine Potentialfunktion zurückführen läßt; und

3. die Differenz der auf das Teilchen seitens seiner Umgebung wirkenden Druckkräfte, die durch den Gradienten der den an jeder Stelle herrschenden (hydrostatischen) Druck p angebenden Funktion für die betreffende Stelle gegeben wird. Da aber an der freien Oberfläche einer Masse im Zustande des Gleichgewichts der Druck p notwendig gleich Null sein muß (weil ja einem eventuell vorhandenen Drucke nichts von außen entgegenwirken würde und die Oberfläche daher unmöglich in Ruhe bleiben könnte), wird die mathematische Bedingung für diese Oberfläche einfach durch die Forderung gegeben, daß auf ihr die Summe des Gravitationspotentials und des Potentials der Zentrifugalkraft überall einen und denselben konstanten Wert behalten muß. Bezeichnen wir die (auf die Masseneinheit bezogene) Potentialfunktion der Gravitationskräfte mit $V(x, y, z)$, die für das ganze Gebilde als konstant angenommene Winkelgeschwindigkeit mit ω , so lautet, wenn wir die Rotationsachse zur Z-Achse unseres Koordinatensystems wählen, diese Bedingung

$$V(x, y, z) + \frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) = \text{const} \quad (2)$$

wo das zweite Glied der Summe bekanntlich das Potential der Zentrifugalkraft ausdrückt. Je nach dem wir auf der linken Seite dieser Gleichung verschiedene Ausdrücke für das Potential V einsetzen, können wir die den verschiedenen untersuchten Gebilden entsprechenden Gleichgewichtsformen erhalten. Dieses Potential wird natürlich von den Annahmen abhängen, die wir über den Charakter der räumlichen DichteVerteilung der Materie machen, und auch über ihre physikalische Beschaffenheit, also von der Beziehung, die wir zwischen der Dichte und dem auf das Massenteilchen von seiner Umgebung ausgeübten Druck als geltend voraussetzen. Es erweist sich nun, daß gerade in letzterer Hinsicht das Ergebnis von den gemachten Annahmen in sehr hohem Grade abhängt, und daß der ganze Vorrat an möglichen Gleichgewichtsgestalten in zwei voneinander scharf getrennte Gruppen zerfällt. Wenn wir von der Annahme ausgehen, daß die Dichte, ganz unabhängig von dem auf das Massenteilchen ausgeübten Drucke, immer einen konstanten Wert behält, dann haben wir es mit einer *inkompressiblen* Materie, also mit einer Flüssigkeit, zu tun, und die Gleichgewichtsformen, auf die wir geführt werden, sind diejenigen, die eine freischwebende gravitierende Flüssigkeitsmasse bei verschiedenen Rotationsgeschwindigkeiten annimmt. Im Falle dagegen, daß zwischen der Dichte und dem Drucke eine Beziehung besteht, so daß sich die Dichte innerhalb des

Gebildes ändern kann, und im Falle des Gleichgewichts überall den dem jeweiligen Drucke entsprechenden Wert besitzt, haben wir eine *kompressible* Materie, also ein Gas, vor uns, dessen Gleichgewichtsfiguren, wie die Theorie zeigt, einen ganz anderen Charakter haben, als diejenigen einer Flüssigkeit. Dieser zweite Fall bietet der mathematischen Analyse beträchtlich größere Schwierigkeiten, weil die Gleichgewichtsfiguren nicht mehr, wie bei den flüssigen Körpern, ausschließlich durch die Bedingung (2) bestimmt werden, sondern noch gewisse weitere Bedingungen erfüllt sein müssen, die den Gleichgewichtszustand in jedem Punkte im Inneren des Körpers gewährleisten. Die

mer zunimmt. Bei Erreichung eines gewissen Wertes von ω werden aber diese Ellipsoide instabil, und es treten an ihrer Stelle dreiachsige Ellipsoide auf, die nach ihrem Entdecker JACOBISche Ellipsoide genannt werden, und deren drei Achsen mit weiter wachsender Winkelgeschwindigkeit immer ungleicher werden, bis auch für diese Gebilde bei einer gewissen maximalen Winkelgeschwindigkeit die Stabilität aufhört. Die darauf folgenden Gleichgewichtsfiguren (drittes Bild), die eine mit wachsendem ω immer tiefere Einschnürung zeigen, und als POINCARÉsche Birnfiguren bezeichnet werden, sind immer instabil, so daß an dieser Stelle die Entwicklung wahrscheinlich einen katastro-

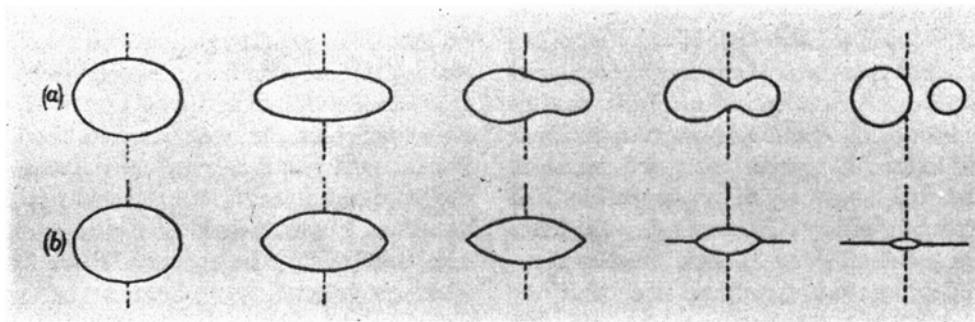


Abb. 4. Die beiden Sequenzen von Gleichgewichtsformen rotierender Massen unter dem Einfluß ihres eigenen Gravitationspotentials. (H. JEANS, Astronomy and Cosmogony, Fig. 63, S. 414.)

Theorie der Gleichgewichtsfiguren rotierender Flüssigkeitsmassen ist bekanntlich von MACLAURIN JACOBI, POINCARÉ, G. H. DARWIN, LIAPOUNOFF und J. H. JEANS entwickelt worden und kann heute auf eine lange Geschichte zurückblicken; die entsprechende Theorie für gasförmige (kompressible) Massen, deren Anfänge sich bereits in den Arbeiten von LAPLACE und ROCHE (1873) finden, ist vor allem von J. H. JEANS in seinen beiden grundlegenden Werken: *Problems of Cosmogony and Stellar Dynamics* (1918) und *Astronomy and Cosmogony* (1929) entwickelt worden. Die Ergebnisse beider Untersuchungsreihen können am bequemsten an Hand der nebenstehenden Abb. 4, die dem letztgenannten Buche von JEANS entnommen ist, veranschaulicht werden. Die Reihe (a) bezieht sich auf rotierende inkompressible Flüssigkeiten, und stellt in stark schematisierter Form die Auffeinanderfolge der Gestalten, die eine um eine Achse (punktierter Vertikalstrich) rotierende Flüssigkeitsmasse bei zunehmender Winkelgeschwindigkeit annehmen kann. Die beiden ersten Figuren ergeben sich theoretisch sehr leicht aus der Gleichung (2), wenn man in ihr für V den Ausdruck für das Potential eines homogenen Ellipsoids einsetzt und die Achsenverhältnisse bestimmt, für die diese Bedingungsgleichung erfüllt ist. Bei kleinen Werten der Winkelgeschwindigkeit ω werden bekanntlich Rotationsellipsoide — sogenannte MACLAURINSche Ellipsoide — erhalten, zu denen für $\omega=0$ auch die Kugel gehört und deren Abplattung mit wachsendem ω im-

phalen Verlauf nimmt, bis sich die ursprüngliche Masse in zwei selbständige Körper aufspaltet (letzte Figur der Reihe, die aber nur hypothetisch ist), die wieder eine stabile Bewegung um ihren gemeinsamen Schwerpunkt ausführen können. Das der zweiten Reihe (b) zugrunde liegende Modell stellt gewissermaßen den vollständigsten Gegensatz zu dem der ersten Reihe (a) dar. Während im ersten wegen der angenommenen Inkompressibilität, die Dichte der Materie an allen Stellen und im Verlaufe der ganzen Entwicklung denselben Wert behält, entspricht das Modell der Reihe (b) einem aus so kompressiblem Materiale aufgebauten Körper, daß praktisch seine ganze gravitierende Masse in seinem Mittelpunkt konzentriert ist, und nur eine dünne Atmosphäre, deren Gravitationswirkungen wegen ihrer verschwindend kleinen Gesamtmasse vernachlässigt werden können, um diesen Kern sich der jeweiligen Rotationsgeschwindigkeit anpaßt, indem ihre Oberfläche die Gestalt einer Äquipotentialfläche annimmt (ROCHESches Modell). Diese Figuren können wieder aus der Bedingung (2) erhalten werden, wenn man in ihr das Gravitationspotential eines Massenpunktes einsetzt, der sich im Mittelpunkt befindet und dessen Masse gleich der Gesamtmasse des gasförmigen Körpers ist. Für kleine Rotationsgeschwindigkeiten erhält man in diesem Falle, von der für $\omega=0$ geltenden Kugel ausgehend, zunächst ebenfalls nur schwach abgeplattete Rotationsfiguren, jedoch folgen ihnen für zunehmende Werte von ω bald ganz anders gestaltete Gebilde.

Diese um die Rotationsachse stets symmetrisch bleibenden Figuren, die JEANS als «Pseudosphäroide» bezeichnet, haben als Grenzfigur für einen bestimmten Wert der Rotationsgeschwindigkeit ω das dritte in der Serie (b) dargestellte Bild: hier hat sich längs dem Äquator der achsensymmetrischen Figur eine *scharfe Kante* herausgebildet, und die hier liegende Materie wird, wie die genaue Theorie zeigt, von der Anziehung der Gesamtmasse nicht mehr gebunden. Eine kleine weitere Steigerung der Winkelgeschwindigkeit hat daher schon ein *Entweichen* von Materie längs dem Äquator des Gebildes zur Folge, was in den beiden nächsten Bildern durch die vom Äquator aus gezogenen Geradenabschnitte angedeutet ist. Das Instabilwerden und Aufbrechen einer kompressiblen Gasmasse erfolgt also auf ganz andere Weise, als bei einer Flüssigkeit, nämlich durch äquatoriale Instabilität, indem sie von einer gewissen Rotationsgeschwindigkeit an kleine Massenmengen in ihrer Äquatorebene auszustossen anfängt, während die flüssige Masse, wie wir gesehen haben, sich einschnürt und einem einen beträchtlichen Teil ihrer ursprünglichen Masse mitnehmenden Begleiter (durch «Fission») Geburt gibt. Da die wirklichen Himmelskörper weder ganz inkompressibel noch über alle Grenzen kompressibel sind, könnte man erwarten, daß ihre Aufteilung auf irgendeinem zwischen beiden oben gefundenen Wegen verlaufenden Mittelwege erfolgen müsse. Die strenge Theorie zeigt jedoch, daß das nicht der Fall ist; ein stark nach seinem Mittelpunkte konzentrierter Körper befolgt mit nur ganz geringen Abweichungen die Entwicklungsreihe (b), auch wenn wir seine Konzentration langsam abnehmen lassen, bis ein gewisser Grenzwert erreicht wird, bei dem er sich plötzlich auf die Reihe (a) umschaltet, so daß in der Natur im wesentlichen nur die beiden durch die Reihen (a) und (b) dargestellten Entwicklungsreihen vorzukommen scheinen.

Zur Vervollständigung unseres theoretischen Rüstzeuges wollen wir an dieser Stelle noch den auch heute für das Verständnis des Entwicklungsprozesses eines Himmelskörpers grundlegenden Gedanken von LAPLACE erwähnen: ein Himmelskörper, der Wärme ausstrahlt, verliert dauernd Energie und muß sich schließlich abkühlen, wodurch seine Dichte zunehmen und sein Volumen abnehmen wird; da aber der Flächensatz der Mechanik dabei erfüllt bleiben muß, hat diese Zusammenschrumpfung notwendig ein Anwachsen der Rotationsgeschwindigkeit zur Folge, so daß letztere tatsächlich, wie wir es oben stillschweigend angenommen haben, als der von der Zeit abhängige Parameter erscheint, der die Evolution beherrscht.

Wenn wir nun die oben geschilderten theoretischen Ergebnisse mit dem empirischen Befunde vergleichen, so müssen wir zu dem Schluß kommen, daß zwischen beiden eine unverkennbare und ziemlich weitgehende Ähnlichkeit besteht. Fangen wir mit den Galaxien an, so haben wir es hier mit Gebilden ungeheuer großer

Massen, von der Größenordnung von 10^9 bis 10^{11} Sonnenmassen (Masse der Sonne = $2 \cdot 10^{33}$ g), zu tun. JEANS hält es für wahrscheinlich, daß die Gravitationswirkung einer so beträchtlichen Gasmasse auf ihre sicher sehr verdünnten Außenteile ungefähr dieselbe sein wird, wie wenn die ganze Masse praktisch in ihrem Mittelpunkte konzentriert wäre. In diesem Falle hätten wir aber ein Gebilde vor uns, das in dynamischer Beziehung eine weitgehende Ähnlichkeit mit dem ROCHE-Schen Modell aufweisen würde, und wir sehen in der Tat, daß es, je nach der Geschwindigkeit seiner Rotation, so ziemlich alle Formen annehmen könnte, die wir bei den Außergalaktischen Nebeln tatsächlich realisiert finden, von ovalen Gebilden verschiedener, jedoch unter einer bestimmten oberen Grenze bleibender Abplattung, bis zu ganz flachen, aus einem kleinen Kerne und sich um ihn herum lagernden (wahrscheinlich aus ihm hervorgequollenen) Materietzen bestehenden Gebilden, wie wir sie bei den normalen Spiralnebeln in allen möglichen Abwandlungen finden. Auch das an der Grenze zwischen ovalen Nebeln und Spiralnebeln stehende, so charakteristische Gebilde E7, das uns am Himmel aus sehr zahlreichen Nebelaufnahmen bekannt ist, erscheint theoretisch verständlich, wie ein Vergleich des im Abb. 2 dargestellten Nebels dieser Klasse mit der dritten Gestalt der Reihe (b) auf Abb. 4 lehrt. Auf die von JEANS für die Balkenspiralen versuchsweise gegebene Erklärung, die auf einem durch einen eingebauten inkompressiblen Kern erweiterten ROCHE-Schen Modell beruht (in dem der Kern bereits die Form eines dreiachigen JACOBISchen Ellipsoids angenommen haben müßte), wollen wir hier nicht näher eingehen, da sich ihr beträchtliche theoretische Schwierigkeiten entgegenzustellen scheinen.

Was nun die astronomischen Gebilde zweiter Stufe, nämlich die Sterne, betrifft, so steht es mit der Erklärung ihrer Entstehung und Entwicklung heute viel weniger günstig, als mit den Galaxien. Die große Anzahl von Doppelsternen weist allerdings in der Richtung hin, daß bei der Entstehung dieser Gebilde die Entwicklungsreihe (a) der Aufteilung einer Masse in zwei Komponenten gleicher Größenordnung eine hervorragende Rolle spielen muß, und der Vergleich der theoretisch abgeleiteten Gleichgewichtskonfigurationen von zwei um einander rotierenden Massen mit den genauer untersuchten Doppelsternsystemen, scheint dieser Ansicht eher eine Stütze zu verleihen. Doch stellen sich der Theorie auch gewisse Schwierigkeiten entgegen. Die Gültigkeit letzterer ist an die Voraussetzung gebunden, daß die Materie, aus der sich der Urstern zusammensetzte, ihrer physikalischen Beschaffenheit nach sich einer inkompressiblen Flüssigkeit genähert haben soll. JEANS nimmt dies zwar an, indem er voraussetzt, daß die Atome (oder richtiger die ionisierten Atomreste) in den innersten Teilen eines Sternes so eng gepackt sind, daß das von ihnen

gebildete Material praktisch mit einer inkompressiblen Flüssigkeit verglichen werden darf. Dagegen ist von anderer Seite geltend gemacht worden, daß bei dem im Inneren der Sterne wegen der dort herrschenden riesigen Temperaturen (von der Größenordnung von 10^7 Grad) zu erwartenden hohen Ionisationsgrade der Materie und dem sehr hohen Gehalte an Wasserstoff, letztere im wesentlichen aus Protonen und freien Elektronen zusammengesetzt sein muß, und daß ein solches Gemisch eher die Eigenschaften eines idealen Gases, als einer Flüssigkeit zeigen würde. Namentlich A. S. EDDINGTON hat diesen Standpunkt in seinen bahnbrechenden Arbeiten über den inneren Aufbau der Sterne vertreten und ihn auch durch den Hinweis auf die empirische Tatsache zu stützen versucht, daß die von ihm entdeckte Massenhelligkeitsrelation sowohl für die sehr diffusen Riesensterne, als für die dichteren Zwergsterne mit derselben Genauigkeit erfüllt ist, so daß auch die Eigenschaften letzterer durch seine sich auf die idealen Gasgesetze stützende Theorie ihres inneren Aufbaus richtig wiedergegeben werden. (Für die weißen Zwerge würde sie dagegen nicht mehr gelten.) Was den Entstehungsprozeß eines einzelnen Sterns aus einer Gas- oder Staubmasse betrifft, so kann heute die Ansicht, daß sich dieser Prozeß vermutlich in den äußersten Teilen der Galaxien, und zwar am wahrscheinlichsten der Spiralnebel, vollzieht durchaus vertreten werden, jedoch bleibt für uns das Wesen dieser «Sternwerdung», trotz gewisser von verschiedenen Forschern, unter anderen auch von JEANS selbst, angestellter, feinsinniger Betrachtungen, auf die hier nicht eingegangen werden kann, noch immer dunkel. Daß die Entwicklung des einzelnen Sterns in der Richtung immer zunehmender Dichte verläuft, erscheint auf den ersten Blick als die einzige plausible Annahme, jedoch ist es bis heute noch nicht gelungen, den näheren Hergang einer solchen Entwicklung genauer zu beschreiben. Auf den noch tobenden Streit, ob die Riesensequenz zusammen mit der Hauptsequenz den tatsächlichen Entwicklungsweg eines Sternes im RUSSELL-Diagramm darstellt, wie von RUSSELL selbst anfänglich angenommen wurde, oder ob man in diesem gebrochenen Linienzuge nur die Häufungsstellen der langlebigsten Zustände von Sternen zu erblicken hat, während die wirkliche Evolution auf ganz anderen Kurven – eventuell auf den der Abszissenachse etwa parallel verlaufenden Kurven konstanter Masse (Massenhelligkeitsrelation) – vor sich geht (JEANS denkt sogar an katastrophenartige, sprunghafte Übergänge zu immer größeren Dichten), kann an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden, da die Ansichten der verschiedenen Autoren noch zu weit auseinandergehen und zu großen Schwankungen unterworfen sind. Es bleibt daher nichts anderes übrig, als sich zunächst mit der betrüblichen Tatsache abzufinden, daß uns der Prozeß der Entstehung und Entwicklung eines Sterns heute noch weitgehend unverständlich bleibt.

Wir kommen nun zu der untersten Stufe der astronomischen Gebilde, – zu den Planeten sowie dem einzigen uns bekannten System solcher Körper, unserem eigenen Planetensystem, und fragen, was die moderne Theorie zu seiner Entstehung zu sagen hat. Von den sehr zahlreichen zu verschiedenen Zeiten zu seiner Erklärung aufgestellten Hypothesen, kommen heute eigentlich nur noch drei ernstlich in Frage: die alte KANT-LAPLACESche Hypothese, eine in den ersten Jahren unseres Jahrhunderts aufgestellte Flutwellentheorie, und die im Jahre 1943 von C. F. VON WEIZSÄCKER¹ vorgeschlagene neue Theorie, die man als die Wirbeltheorie bezeichnen könnte.

1. Die KANT-LAPLACESche Hypothese ist jedem Gebildeten zu gut bekannt, als daß sie hier ausführlich dargestellt zu werden brauchte. Sie fußt, in der ihr von LAPLACE gegebenen Form augenscheinlich auf der Theorie des ROCHEschen Modells, das ja bei genügend schneller Drehung in seiner Äquatorebene Materieringe abzuwerfen anfängt. Diese älteste Theorie ist als eine sehr leistungsfähige zu nennen, denn sie gestattet nicht weniger als vier der auf S. 41 aufgezählten Eigenschaften des Planetensystems, nämlich a–d, in zwangloser Weise zu erklären. Zwei Umstände aber lassen uns diese Theorie heute als nicht mehr befriedigend erscheinen: auf Grund eines von POINCARÉ² bewiesenen Theorems läßt sich unschwer zeigen, daß ein von der Sonne auf die beschriebene Weise abgesetzter Ring gasförmiger Materie sich unter dem auflösenden Einfluß seiner eigenen Rotation sofort im Raume verflüchtigen müsste, es sei denn, daß seine Dichte schon gleich nach der Abtrennung auf das 0,36fache der mittleren Dichte der Sonnenmasse (die ja, um diesen Prozeß der Abtrennung überhaupt möglich zu machen, als sehr stark nach ihrer Mitte konzentriert zu denken ist) anwachsen kann; der zweite Einwand besteht aber darin, daß die KANT-LAPLACESche Theorie keinerlei Erklärung für die so merkwürdige, durch einen *ganzzahligen* Parameter charakterisierte Gesetzmäßigkeit in den Entfernungswerten der aufeinander folgenden Planeten von der Sonne, die durch die BODEsche Formel (1) ausgedrückt wird, zu geben vermag, was in Anbetracht der augenscheinlich fundamentalen, dieser Relation zukommenden Bedeutung, von jeder Theorie der Entstehung des Planetensystems verlangt werden muß.

2. Die Flutwellentheorie, die als «Planetenmaltheorie» um die Jahrhundertwende von CHAMBERLIN und MOULTON aufgestellt, und 1916 von JEANS in abgeänderter und vereinfachter Form als reine Flutwirkungstheorie mathematisch unterbaut worden ist, geht von der Grundannahme aus, daß die Planeten ihre Entstehung einer auf die Sonne von einem an ihr in verhältnismäßig kleiner Entfernung vorbeigegangenen anderen Stern ausgeübten Gezeitenwirkung ver-

¹ C. F. VON WEIZSÄCKER, Zeitschrift für Astrophysik, 22, 319 (1943).

² H. POINCARÉ, *Leçons sur les Hypothèses Cosmogoniques*, p. 22.

danken. In ihrer ersten Form nahm diese Theorie an, daß die von diesem Fremdkörper erzeugte Flutwelle die auf der Sonne ständig vorkommenden Materieausbrüche in einem solchen Maße vergrößerte, daß schließlich ein langer, aus ausgeworfener Materie bestehender Arm aus der Sonne in den Außenraum hinausragte. Eine Eigentümlichkeit dieser Theorie, der sie ihre Bezeichnung als Planetesimaltheorie verdankt, besteht darin, daß sie die Bildung der Planeten aus diesem Arme sozusagen in zwei Stufen erfolgen läßt, indem sie zuerst die Entstehung ganz kleiner Materieverdichtungen annimmt, die sich dann durch Zusammenschluß zu einem größeren Planeten auswachsen. Die JEANSSCHE Fassung dieser Theorie sieht dagegen von der eruptiven Tätigkeit an der Oberfläche der Sonne vollständig ab, und zeigt, daß schon die störende Wirkung des Fremdkörpers auf die gasförmige Sonne genügt, um auf letzterer eine Deformation hervorzurufen, die die Entstehung einer Reihe von neuen Körpern (der Planeten) aus ihr erklären kann. Die Flutwellentheorie bietet den Vorteil, auch einen bisher nicht erwähnten Umstand im Aufbau des Planetensystems zu erklären, nämlich die Tatsache, daß die Massen der in mittleren Entfernungen von der Sonne kreisenden Planeten, Jupiter und Saturn, die größten Werte haben, und daß die Planetenmassen sowohl nach innen als nach außen abnehmen: ein aus einem Sterne durch eine Flutwirkung herausgerissener Balken müßte augenscheinlich in seiner Mitten die Hauptmasse seiner Materie haben und sich gegen beide Enden verjüngen. Die Flutwellentheorie kann heutzutage noch keineswegs als widerlegt gelten, doch vermag auch sie für die BODESche Beziehung zwischen den Entfernungen der Planeten keine vernünftige Deutung zu geben.

Diese Leistung darf die im Jahre 1943 von v. WEIZSÄCKER in Vorschlag gebrachte neue Theorie, wohl als erste, für sich in Anspruch nehmen, weshalb wir ihr hier eine etwas ausführlichere Betrachtung widmen müssen, wenn sich auch unsere Darstellung nur mit ihren allgemeinen Umrissen beschäftigen kann, und wegen aller Einzelheiten auf die Originalarbeit verwiesen werden muß.

v. WEIZSÄCKER weist zunächst auf den durch die neuere Forschung festgestellten Umstand hin, daß die chemische Zusammensetzung der Sonne und der Planeten eine ganz verschiedene ist. Während die Erde zu etwa einer Hälfte aus Elementen besteht, die schwerer als Sauerstoff sind und zur anderen Hälfte im wesentlichen aus Sauerstoff, und wir allen Grund haben, auch für die anderen Planeten (sogar die weniger dichten großen Planeten Jupiter und Saturn) eine nicht stark abweichende chemische Zusammensetzung anzunehmen, besteht die Sonne zum überwiegenden Teil aus den allerleichtesten Elementen, Wasserstoff und Helium, und die die Hauptmasse der Planeten bildenden schwereren Elemente machen kaum 1% ihrer Gesamtmasse aus. Wenn wir also an der nahe-

liegenden Annahme festhalten wollen, daß die Sonne und die Planeten aus derselben ursprünglichen Substanz entstanden sind, dann müssen wir annehmen, daß die Planeten in ihrer gegenwärtigen Form nur einen kläglichen Rest der Materie darstellen, die bei ihrer Entstehung in dem von ihnen heute bewohnten Raume enthalten war, und daß folglich etwa 99% dieser Materie zu irgendeiner Zeit das System verlassen haben müssen. Diese Annahme bringt den Vorteil mit sich, daß sie mit einem Schlag mit allen Schwierigkeiten aufräumt, die aus der Tatsache entstehen, daß der Drehimpuls des zur Erklärung der Planetenbildung zu postulierenden Gasnebels etwa hundertmal größer gewesen sein müßte, als der gegenwärtige Drehimpuls des gesamten Sonnensystems, denn die aus letzterem entweichende, aus den leichteren Elementen bestehende Materie könnte sehr wohl den größten Teil des Drehimpulses mit sich ins Unendliche mitgenommen haben. Die in den Planeten auftretenden schwereren Elemente wären dagegen aus dem Grunde im System geblieben, weil sie sich, bei den von den heute auf den Planeten bestehenden nicht sehr verschiedenen Temperaturen, zu Tröpfchen und Staubteilchen kondensiert haben müßten, durch deren Zusammenschluß die Planeten sehr wohl entstanden sein könnten. Auch die Tatsache, daß die Erde z. B. so gut wie gar keine Edelgase (auch nicht die schwereren) enthält, würde durch diese Entstehungsweise ebenfalls eine ganz ungezwungene Erklärung finden. Die ursprüngliche Masse der zu postulierenden Gas- hülle muß nach dem oben Gesagten etwa $1/10$ der Sonnenmasse betragen haben (die Gesamtmasse aller Planeten zusammengenommen übersteigt nur wenig $1/1000$ der Sonnenmasse), was auf den ganzen von dem Planetensystem eingenommenen Raum ausgebrettet, eine räumliche Dichte von etwa 10^{-9} g/cm^3 ergeben würde. Eine solche Hülle ist ihrem Wesen nach instabil, denn sie kann, bei ihrer geringen Dichte, nicht wie ein starrer Körper rotieren, und ihre langsamer bewegten äußeren Schichten werden daher auf die inneren Schichten durch Reibung eine bremsende Wirkung ausüben, die letztere schließlich zum Einsturze in die Sonne bringen muß, während sie selbst eine Beschleunigung erfahren, die sie in immer größere Entfernungen von der Sonne wegtreibt, so daß nach einer gewissen Zeit das ganze Gebilde verschwinden muß. Aus demselben Grunde, nämlich der ihr innenwohnenden Instabilität, kann diese Hülle auch nicht von selbst entstanden sein, sondern muß entweder durch einen katastrophalen Prozeß, wie etwa eine durch einen dritten Körper hervorgerufene Flutwelle, oder was der Verfasser für wahrscheinlicher hält, durch Einfangen durch die im Werden begriffene Sonne von in der interstellaren Materie immer vorhanden gewesener und auch noch heute vorhandener «Turbulenzelementen» entstanden sein. Die ursprünglich vermutlich zum Teil stark elliptischen Bahnen dieser Turbulenzelemente sind dann

im Laufe der Zeit durch Reibung in nahezu kreisförmige Bahnen verwandelt worden. Eine genauere Rechnung zeigt, daß die Hülle zur Zeit ihrer vollen Entwicklung, als sie sich einem Gleichgewichtszustande am stärksten genähert hatte, die Gestalt einer ganz dünnen Scheibe gehabt haben muß. Da der Gasdruck in ihr immer nur eine ganz untergeordnete Rolle gespielt haben kann, bewegten sich die einzelnen Teilchen dieser Hülle im wesentlichen unter dem Einfluß der von der Sonne ausgehenden Gravitationskraft, und es ist daher durchaus möglich, daß sich in ihr mit der Zeit reguläre Strömungen ausgebildet haben könnten. Damit solche Strömungen einigermaßen von Bestand sein können, müssen die einzelnen an ihnen teilnehmenden Teilchen lauter KEPLERSche Ellipsen um die Sonne beschreiben, die zu ihrem Bestehen keine Energiezufuhr von außen brauchen, und zwar von nahezu gleicher Periode (falls die Strömung mehrere Umläufe überleben soll), also auch von derselben großen Achse. Da die Bewegungen praktisch in einer Ebene erfolgen, können sich die Bahnen der einzelnen Teilchen also nur durch ihre Exzentrizitäten unterscheiden, die auch alle unterhalb einer gewissen Grenze liegen. Betrachten wir nun die *relative* Bewegung eines eine schwach exzentrische Bahn beschreibenden Teilchens in bezug auf ein Teilchen, das eine streng kreisförmige Bahn um die Sonne beschreibt, so werden beide Teilchen, in Zeitabständen, die ihrer gemeinsamen Umlaufsperiode gleich sind, immer wieder in derselben Konfiguration zueinander stehen. Da sich nun aber das Teilchen in der Kreisbahn natürlich gleichmäßig bewegt, während das die Ellipse beschreibende Teilchen im Perihel (also wenn es sich innerhalb des Kreises befindet) schneller läuft und das «Kreisteilchen» somit überholt, in seinem Aphel aber, in dem es sich langsamer bewegt, hinter diesem zurückbleibt, wird seine relative Bewegung in bezug auf das die Kreisbahn beschreibende Teilchen augenscheinlich durch eine um letzteres beschriebene geschlossene Kurve gegeben, die das Teilchen in dem der Gesamtrotation *entgegengesetzten* Sinne durchläuft. Die genaue Rechnung zeigt, daß diese relative Bahn bei sehr kleinen Exzentrizitäten eine Ellipse ist, die sich aber für wachsende Exzentrizitäten immer mehr deformiert und die Gestalt einer bohnenförmigen Figur, wie sie in der Abb. 5, auf die wir gleich zu sprechen kommen werden, dargestellt sind, annimmt. Diese Kurven genügen einer sehr merkwürdigen Bedingung, die zwar nur genäherten Charakter besitzt, bis zu Werten der Exzentrizität von etwa $\frac{1}{3}$ aber mit einer Genauigkeit von etwa 98% erfüllt ist. Bezeichnen wir mit χ den Winkel, unter dem eine solche bohnenförmige Figur vom Mittelpunkte (der Sonne) aus erscheint, so gilt mit der erwähnten Genauigkeit

$$e = \sin \chi / 4. \quad (3)$$

Haben wir also einen Schwarm von Teilchen, die sich in der Umgebung des «Kreisteilchens» in nicht sehr stark

elliptischen Bahnen bewegen, so kann ihr Bewegungszustand relativ zu diesem als ein *rückläufiger Wirbel* beschrieben werden, dessen Mittelpunkt sich rechtsläufig und gleichmäßig in einem Kreise um die Sonne bewegt, und ein solcher Wirbel kann unbeschränkt lange Zeit bestehen bleiben, weil seine Bewegung, wie bereits hervorgehoben, zu ihrer Aufrechterhaltung keine Energiezufuhr von außerhalb erfordert. Eine Störung dieser Wirbelbewegung kann daher nur seitens anderer Wirbel oder einzelner frei herumfliegender Teilchen erfolgen. Es kann nun auf Grund energetischer Überlegungen gezeigt werden, daß solche Teilchen im allgemeinen nur dann in den Wirbel eingebaut werden können, wenn ihr Drehimpuls kleiner als der Drehimpuls der äußersten Teilchen des Wirbels ist, die die exzentrischsten Bahnen beschreiben und daher den kleinsten Drehimpuls haben. Was daher geschehen muß, ist leicht zu übersehen: solange ein Wirbel sehr klein ist, wird er durch Angliederung fremder Teilchen schnell wachsen können, derin alle seine Teilchen beschreiben nahezu kreisförmige Bahnen, haben also den für ihre Energie denkbar größten Drehimpuls und können daher sehr viele Teilchen mit kleinerem Drehimpuls binden. Dieses Wachstum wird aber eine gewisse Grenze nicht überschreiten können, die einer bestimmten maximalen Exzentrizität e_{\max} entsprechen wird, und wenn dieses e_{\max} , was plausibel erscheint, von der Entfernung des Wirbels von der Sonne unabhängig ist, wird ein vollausgebildeter Wirbel in jeder Entfernung von der Sonne aus unter einem und demselben, durch Formel (3) bestimmten Winkel erscheinen. Auf einem gegebenen Kreise können mehrere Wirbel um die Sonne herumlaufen, da ihre Bahngeschwindigkeiten dann gleich sind und sie sich nie einmal einholen, wenn sie sich aber auf etwas verschiedenen Kreisen bewegen, dann werden sie über kurz oder lang einmal zusammenstoßen müssen. Was geschieht nun in einem solchen Falle? Zu einem einzigen Wirbel können sie sich meistens, wie wir gesehen haben, nicht verbinden, aber sie können auch nicht ungestört durcheinander hindurchgehen, weil die freie Weglänge in einem Gase, bei einer Dichte von 10^{-9} g/cm^3 , von der Größenordnung von nur etwa 1 cm ist. Es bleibt den Wirbeln also nichts anderes übrig, als einander auszuweichen. Das Ergebnis wird sein, daß die auf einem Kreise laufenden Wirbel vermutlich bis zu ihrer gegenseitigen Berührung anwachsen werden, und sich durch Ausweichen vor Wirbeln, die auf anderen Kreisen liegen, um die Sonne in einem System von *Wirbelringen* anordnen werden, wie das in Abb. 5 andeutungsweise dargestellt ist. Die zwischen einem System von konzentrischen Kreisen angeordneten Wirbelringe muß man sich in Bewegung vorstellen, und zwar laufen die einzelnen Wirbel im *entgegengesetzten* Uhrzeigersinne mit vom Mittelpunkte nach außen abnehmenden Geschwindigkeiten, während die eigentliche Wirbelbewegung in ihnen mit derselben jeweiligen Periode,

aber rückläufig, d. h. im Uhrzeigersinne, erfolgt. Diese Bewegungen verlaufen im allgemeinen überall ganz regulär, mit Ausnahme der obenerwähnten Einrahmungskreise, die die verschiedenen Wirbelringe von einander trennen. Hier erfolgt die Bewegung der die aneinander stoßenden Wirbel bildenden Teilchen zwar in derselben Richtung, aber mit verschiedenen Geschwindigkeiten, weil die Teilchen des äußeren Wirbels in ihrem Perihel, die des inneren in ihren Aphel

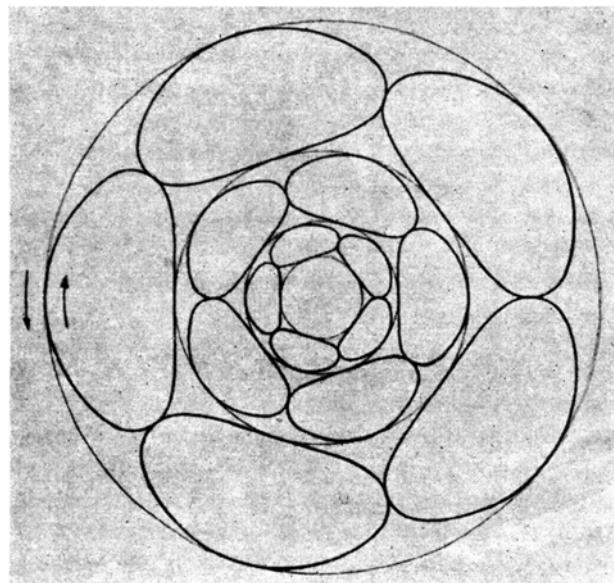


Abb. 5. System von Konvektionswirbeln in der Gashülle um die Sonne zur Zeit der Entstehung der Planeten. Der äußere Pfeil deutet die Gesamtrotation der Gashülle, der innere den Drehsinn der Wirbel an. Im gemeinsamen Mittelpunkt ist die Sonne zu denken.
(C. F. v. WEIZSÄCKER, Über die Entstehung des Planetensystems, Zeitschrift für Astrophysik, Bd. 22, 5 (Schluß)-Heft, S. 339, Abb. 2, Dezember 1943.)

sind und daher langsamer laufen als erstere. Die Geschwindigkeitsdifferenzen betragen in der Entfernung der Erde von der Sonne etwa 10 km/sec, in der Entfernung des Jupiter immer noch etwa 3 km/sec. An diesen Kreisen müssen sich also kleine rechtläufige «Kugellagerwirbel» ausbilden, die aber keine Tendenz zeigen werden, stark zu wachsen, da man keine stabilen rechtläufigen Wirbel aus KEPLERSchen Ellipsenbewegungen aufbauen kann. Aber die an den Einrahmungskreisen stattfindende turbulente Bewegung wird das Auseinanderprallen von Kondensationsteilchen, und damit die Bildung von Brocken und schließlich von größeren Planeten begünstigen. Nun befolgen aber die Radien dieser Kreise ein einfaches Gesetz: zwei aufeinanderfolgende Radien verhalten sich augenscheinlich zueinander wie die Apheldistanz zur Periheldistanz der Ellipsen größter Exzentrizität, welche in einem Wirbel vorkommen dürfen, d. h. es ist:

$$r_{n+1} : r_n = \frac{1 + e_{\max}}{1 - e_{\max}} = \epsilon \quad (4)$$

und wenn das e_{\max} wirklich von der Entfernung unabhängig ist, wird ϵ eine Konstante sein. Wir können daher die Entfernung des n -ten Planeten von der Sonne in der Form schreiben:

$$r_n = r_0 \cdot \epsilon^n \quad (5)$$

und dies ist, wie ein Vergleich mit Formel (1) zeigt, bis auf das kleine Korrektionsglied 4, das mit zunehmender Entfernung von der Sonne immer bedeutungsloser wird, nichts anderes, als die BODESche Beziehung, die somit hierdurch zum ersten Male eine physikalisch sinnvolle Deutung erhält. In der Originalformel von BODE war allerdings $\epsilon = 2$, was nach Formeln (4) und (3) den Werten $e_{\max} = \frac{1}{3}$ und $\chi = 19,4^\circ$ entspricht, so daß die Anzahl der Wirbel in einem Ringe keine streng ganzzahlige wäre, doch ist letzteres durch eine ganz geringfügige Änderung des numerischen Wertes dieser Konstanten leicht zu erreichen. Man braucht nämlich nur $\epsilon = 1,9$ zu setzen, dann ergibt sich aus Formel (4) $e_{\max} = 0,31$ und aus (3) $\chi = 18^\circ$, so daß die Anzahl der Wirbel in jedem Ringe genau gleich 5 wird. Die so geheimnisvolle Ganzzahligkeit ist also hier als Ausdruck für das Bestehen regelmäßiger Strömungen in einem Kontinuum aufzufassen, und das Problem hat daher, wie v. WEIZSÄCKER hervorgehoben hat, eine gewisse, nicht bloß äußerliche Ähnlichkeit mit den ganzzahlig gequartelten BOHRschen Bahnen der älteren Atomtheorie, die sich ja, im Lichte der Wellenmechanik, auch nur als der Ausdruck für gewisse Eigenschwingungen eines Kontinuums erwiesen haben – trotzdem das PLANCKSche Wirkungsquantum mit dem Aufbau des Planetensystems natürlich nicht das geringste zu tun haben kann. Auf weitere Einzelheiten der v. WEIZSÄCKERSchen Theorie, die sicher einen bedeutenden Fortschritt über alle früher aufgestellten Theorien des Planetensystems darstellt, wenn sie auch noch gewisse Unvollkommenheiten aufweist, können wir hier nicht näher eingehen; es sei nur noch beiläufig erwähnt, daß auch die in den Satelliten-systemen festgestellten Regelmäßigkeiten durch diese Theorie weitgehend erklärt werden können – die Satelliten müssen nämlich aus den obenerwähnten «Kugellagerwirbeln» entstanden sein, woraus sich z. B. die Komplanarität ihrer Bahnen und der rechtläufige Sinn ihrer Bewegung in zwangloser Weise ergibt.

Wir verlassen nun das Gebiet der speziellen kosmogonischen Probleme, um uns zum Schlusse noch einen Augenblick dem allgemeinen kosmogonischen Problem der Entstehung der Materie überhaupt zuzuwenden. Von der rein astronomischen Seite her ist dieses Problem wohl als unlösbar zu bezeichnen, und es hat daher, je mehr die Astronomie zu einer streng wissenschaftlichen Disziplin wurde, in immer abnehmendem Maße die Aufmerksamkeit ihrer Vertreter auf sich gelenkt. Erst in allerjüngster Zeit hat dieser Sachverhalt eine radikale Änderung erfahren, indem der Astro-

nomie auf diesem Gebiete ein mächtiger und berufener Bundesgenosse in der modernen Atomphysik entstanden ist. Seitdem die neuere Atomtheorie nicht nur Verwandlungen gewisser Atomarten in andere praktisch zu realisieren gelehrt hat, sondern auch einen Stammbaum der uns bekannten Atome aufzustellen in der Lage war, ist gerade in ihr mit vollem Bewußtsein die kosmogonische Frage nach dem Woher dieser unsere materielle Welt heute ausmachenden Gebilde gestellt worden. Und da hat es sich zur allgemeinen Überraschung erwiesen, daß weder die Physik noch die Astronomie in dem ganzen unserer Erkenntnis heute zugänglichen Universum einen Ort anzugeben vermag, wo sich die zur Bildung der Atome, aus denen unsere Welt besteht, führenden, allerdings hypothetischen Prozesse abspielen könnten. An dieser Stelle kann nun die moderne Astronomie ihrerseits in fruchtbarer Weise in die Diskussion eingreifen, indem sie unter Berufung auf eine von ihr vor etwa zwanzig Jahren gemachte Entdeckung, wenigstens in der Vergangenheit auf einen Zeitpunkt hinweisen kann, in dem die Welt vermutlich eine so völlig andere Beschaffenheit besessen haben muß, daß die von der Physik für die Entstehung von Atomen verlangten Bedingungen sehr wohl verwirklicht gewesen sein könnten. Diese Entdeckung bezieht sich auf die sogenannte *Flucht der Außergalaktischen Nebel*, eine Erscheinung, die darin besteht, daß die in den Spektren dieser Gebilde beobachteten sehr beträchtlichen Rotverschiebungen aller Spektrallinien, als Dopplereffekte gedeutet, lauter Entfernungsbewegungen von uns ergeben, und zwar mit Geschwindigkeiten, deren absolute Beträge mit den Entfernungswerten der betreffenden Objekte linear zunehmen (HUBBLESches Gesetz), von rund 100 km/sec für die uns am nächsten benachbarten Galaxien, bis zu dem ungeheuren Betrage von über 40000 km/sec für die fernsten Objekte, deren Radialgeschwindigkeiten noch gemessen werden konnten. Das System der Galaxien macht also den Eindruck einer geplatzten Bombe, deren Stücke mit verschiedenen Geschwindigkeiten in den Raum herausgeschleudert worden sind, so daß die am schnellsten bewegten heute auch am weitesten im Raum zerstreut sind. Schon aus dem linearen Charakter des HUBBLESchen Gesetzes geht hervor, daß alle diese riesigen Massen zu einer bestimmten Zeit auf engstem Raum zusammengedrängt gewesen sein müssen, und die Berechnung gibt für die seit diesem Zustand verflossene Zeit den auffallend kleinen, mit der aus physikalischen Gründen für die Lebensdauer eines Sternes zu postulierenden Zeit durchaus vergleichbaren Wert von 10^9 bis höchstens 10^{10} Jahren. Bei der für die Zeit dieses «Weltanfanges» anzunehmenden unvorstellbaren Zusammenballung der Materie, erscheinen atombildende Prozesse durchaus als möglich, also Prozesse von einem Energiereichtum, der auch die Explosion und die als ihre Folge auftretenden riesigen Geschwindigkeiten der entferntesten Galaxien

als begreiflich erscheinen läßt. Natürlich können wir diese Prozesse mit den uns heute zur Verfügung stehenden theoretischen Hilfsmitteln noch nicht in befriedigender Weise beschreiben, und noch weniger können wir eine Antwort auf die Frage geben, was vor diesem Zeitpunkte, den wir vorläufig als den Zeitpunkt der Entstehung unseres materiellen Weltalls betrachten müssen, vorhanden war. Aber die Tatsache, daß sowohl die physikalische als die astronomische Forschung auf einen solchen Zeitpunkt hinzuweisen scheint, bildet zweifellos das wichtigste konkrete Ergebnis, das jemals in der allgemeinen Kosmogonie erreicht worden ist.

Es ist im Zeitalter der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik kaum verwunderlich, daß auch die kosmologische Spekulation sich dieser höchst merkwürdigen Tatsachen sofort bemächtigt hat, und aus ihnen, wie es ihrer Grundeinstellung entspricht, die weitestgehenden verallgemeinernden Schlüsse gezogen hat. Der Kosmologie war es inzwischen recht schlecht ergangen. Nach einem langen Stagnieren, war sie in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts durch die Bemühungen von SEELIGER und C. NEUMANN zu gewissen wichtigen, jedoch rein negativen Ergebnissen gekommen, nämlich daß eine statische Welt im unendlichen euklidischen Raum aus nach dem NEWTONSchen Gesetze gravitierender Materie nicht aufgebaut werden kann. Diese Schwierigkeit konnte allerdings vermieden werden, erstens durch einen ziemlich künstlich erscheinenden «hierarchischen» Aufbau der Welt aus einander übergeordneten Systemen immer abnehmender mittlerer räumlicher Dichte, so daß diese Dichte zwar für jedes endliche Raumgebiet endlich bleibt, für den ganzen unendlichen Raum aber dem Werte Null zustrebt, und zweitens durch eine kleine Abänderung des NEWTONSchen Gravitationsgesetzes. Es ist bekannt, daß es EINSTEIN in Verfolgung dieses letzteren Gedankens später gelungen ist, durch Hinzufügung eines «kosmologischen Gliedes» in seinen Feldgleichungen, das die doppelte Wirkung einer Abänderung des Gravitationsgesetzes und der Einführung einer Raumkrümmung hat, eine in einem geschlossenen Raum ruhende Materieverteilung mit überall konstanter räumlicher Dichte, also eine geschlossene, sphärische oder elliptische, statische Welt zu konstruieren.

Bis dahin waren die Berührungspunkte zwischen Kosmologie und Kosmogonie nur wenig zahlreich gewesen, was wegen der Verschiedenheit der von beiden Disziplinen verfolgten Ziele nicht verwunderlich erscheint. Während letztere das Werden im Weltall in allen seinen Äußerungen untersucht und sich mühsam in zahllose Einzelprobleme vertieft, strebt erstere durch kühne Extrapolationen nach einem Erfassen des sozusagen zeitlosen Aufbaus der Welt und kennt außer diesem allumfassenden Problem überhaupt keine Einzelprobleme. Natürlich konnte die Kosmologie die zahl-

reichen Wandlungsprozesse, die die Kosmogenie in der Welt festgestellt hatte, nicht völlig ignorieren, sie betrachtete aber das Werden und Vergehen der einzelnen astronomischen Gebilde gewissermaßen sub specie aeternitatis, als einen nie aufhörenden, sich ständig gleichbleibenden Prozeß, als ein Beharren im Wandel. Durch die Entdeckung der Fluchterscheinung der Außergalaktischen Nebel wurde aber auch für sie die Situation mit einem Schlag eine andere: das Moment des Statischen schien, falls man aus den Erfahrungstatsachen aufs Ganze schließen wollte, aus der Welt überhaupt für immer verbannt zu sein und nur noch zeitlich veränderliche (allenfalls periodische) Lösungen in Frage zu kommen. Die reine Beobachtungstatsache einer allseitigen Flucht der Galaxien konnte und mußte, um als Weltprinzip hingestellt werden zu können und eine Auszeichnung der zufälligen Lage unseres eigenen Galaktischen Systems auszuschließen, als allgemeine Expansion des Systems der Galaxien gedeutet werden. Die Verallgemeinerung dieser Erscheinung auf die ganze Welt, durch die allein sie zur Grundlage für kosmologische Betrachtungen werden kann, stellt das sogenannte Homogenitätsprinzip oder Kosmologische Prinzip dar, auf dem sich alle heute vorgeschlagenen Kosmologien aufbauen und welches die Forderung enthält, daß der gesamte zeitliche Verlauf im Weltsystem, dessen Moleküle die einzelnen Galaxien sind, sich von jeder von ihnen aus gesehen, in genau gleicher Weise ab-

spielen soll. Es ist hier nicht der Platz, auf die wahrhaft großartigen Konzeptionen einzugehen, zu denen die Anwendung dieses Prinzips geführt hat, wie die auf der allgemeinen Relativitätstheorie fußende Theorie des expandierenden Weltalls von FRIEDMANN und LEMAÎTRE, oder die zweite, kinematische, Kosmologie von E. A. MILNE, die allein vom kosmologischen Prinzip und der Forderung der Invarianz gegenüber der LORENTZ-Transformation ausgehend, auf deduktivem Wege eine ganz neue Mechanik, Gravitationstheorie und Elektrodynamik zu begründen unternimmt¹. Solche Versuche mögen manchem als zu «phantastisch» erscheinen; wer aber von der segensreichen Wirkung für die Wissenschaft des im tiefsten Inneren des menschlichen Geistes wurzelnden, unwiderrührlichen Dranges zur Synthese überzeugt ist, wird nicht umhin können, mit dem allergrößten Interesse das spannende Wechselspiel zwischen diesen beiden so ungleichen Schwesternwissenschaften zu verfolgen, der an Jahrhunderten jüngerer, aber vorsichtig abwägenden, jeder überstürzten Verallgemeinerung abholden Kosmogenie, und der zwar älteren, doch ewig jungen und begeisterungsfähig gebliebenen Kosmologie.

¹ Eine vorzügliche Darstellung des derzeitigen Standes der kosmologischen Spekulationen hat O. HECKMANN in seiner Monographie «Theorien der Kosmologie» (Fortschritte der Astronomie, Nr. 2, Springer, Berlin [1942]) gegeben, wo auch die gesamte einschlägige Literatur zitiert ist.

L'évolution de la formule chromosomiale chez les Vertébrés

Par R. MATTHEY, Lausanne

1. Les lois générales de l'évolution chromosomique

Fixons tout d'abord la marche des idées au cours de ces vingt dernières années. Dans son magistral traité de Cytologie, somme de la science de son temps, WILSON (1925), examinant comment la formule chromosomiale a varié et varie, d'une espèce à l'autre, invoque les mécanismes suivants:

- 1^o Réduction graduelle de taille et disparition.
- 2^o Anomalies mitotiques, telles que non-disjonction.
- 3^o Polyploidie.
- 4^o Fusion (*linkage*) selon le type robertsonien.
- 5^o Fragmentation, le meilleur exemple en étant le passage d'un type *X-O* à un type *X-X* «*compound*».
- 6^o Mutation brusque, réduplication.
- 7^o Hybridation.
- En 1940, WHITE, s'inspirant de MÜLLER (1940), et laissant de côté la polyploidie, propose le tableau que voici:
- 1^o Mutation génique.

2^o Réorganisation segmentaire, avec les modalités suivantes:

- A) Inversion –
 - a) péricentrique, c'est-à-dire incluant le centromère;
 - b) paracentrique, c'est-à-dire excluant le centromère.
- B) Translocation –
 - a) «*shift*», transport en une position nouvelle d'un segment de chromosome brisé en trois;
 - b) insertionnelle; un segment d'un chromosome brisé en trois, s'intercale entre les deux segments d'un non-homologue brisé en deux;
 - c) mutuelle; les portions terminales de deux chromosomes non-homologues sont échangées après rupture de ceux-ci.

Si nous comparons ces deux tableaux, nous voyons que les cas 4 et 5 de WILSON ont disparu. WHITE, cependant, insiste sur la fusion de deux chromosomes en *I* en un chromosome en *V* (type robertsonien), ce qu'il conçoit comme un phénomène de translocation mu-