

Auch Nora wird einen Christen nicht mit ihrer Ratlosigkeit anstecken. Denn es ist nicht schwer zu sehen, wie ihr geraten werden müßte. Und ihr diesen Rat erteilen zu können, das kann den Fundus, aus dem man ihn schöpft, nur zum um so teureren Besitz machen.

Nur von Nathan wird der Christ traurig fortgehen. Das dort Angerichtete ist nicht mit einer Antwort des Herzens allein wieder gutzumachen. Hier wird nicht reines Theater gespielt, sondern räsonniert. Der Zuschauer wird nicht zum Mitspielen aufgefordert, sondern zum Lernen. Hier werden Theorien vorgetragen und Überzeugungen angefochten; man kann entweder den Kampf aufgeben und zustimmen oder man muß sich auseinandersetzen, aber dazu sind Waffen vonnöten, die man vielleicht nicht zur Hand hat. Nathan ist klug, wahrscheinlich klüger als manche seiner Zuhörer. Dieses Theater ist „gefährlich“, denn es ist zur Kanzel geworden.

Wir haben zwar auf der Endstation nun die ganze Summe des Irrtums zu tragen. Aber zu berichtigen wäre der Irrtum dort, wo er seinen gründlichsten Fehler beging. Wenn es gelänge, den ersten Schritt in die Resignation des Geistes rückgängig zu machen, dann würde der Fuß sofort wieder festen Boden fühlen.

Die Entstehung des Sonnensystems

Von GERHARD MICZAIKA

Das Hauptproblem der Kosmogonie ist über eine lange Zeit hinweg die Frage nach der Entstehung des Planetensystems gewesen. Bis vor wenigen Jahren schien es, als würde das Problem etwas in den Hintergrund geraten. Die aufblühende Astrophysik stellte eine gewaltige Menge von Aufgaben, deren Diskussion größere Aussicht auf Erfolg versprach als die Kosmogonie des Planetensystems, in der sich eine Reihe fast unüberwindlich scheinender Schwierigkeiten auftaten. Erst in den letzten Jahren kam es zu einem neuen Versuch von Bedeutung, den Fortschritte auf dem Gebiete der Physik ermöglicht hatten.

Die Frage nach dem Ursprung des Planetensystems gehört ohne Zweifel zu den anziehendsten Problemen der Astronomie; es ist daher keineswegs überraschend, daß eine kaum übersehbare Fülle von Hypothesen und Gedanken zu ihrer Lösung geäußert worden sind. Dennoch ist es zweifelhaft, ob diese bereits gefunden ist; vielleicht wird sie der Natur der Sache nach nie mit voller Sicherheit angegeben werden können. Nicht nur Naturwissenschaftler der unmittelbar beteiligten Fachgebiete haben sich an dem Rätsel versucht; so kam es, daß die Mehrzahl der Erklärungen über den Ursprung der Planeten oft schon bei ihrer Aufstellung mit eindeutigen und gesicherten Beobachtungstatsachen oder allgemeineren physikalischen Gesetzen in Widerspruch standen. Solche Hypothesen zu betrachten, ist im Rahmen dieses

Aufsatzes nicht möglich. Doch soll auf die weit verbreiteten Vorstellungen so bedeutender Männer wie Kant, Laplace u. a. eingegangen werden, auch wenn sie heute zumindest in ihrer ursprünglichen Form zurückgewiesen werden müssen.

Eine kosmogonische Theorie über das Planetensystem muß mit einer Reihe fundamentaler Eigenschaften dieses Gebildes verträglich sein. Wir wollen nur die wichtigsten erwähnen. Zunächst einmal steht es fest, daß seine Gesamtmasse überwiegend in der Sonne vereinigt ist. Das Heer der Planeten, Monde und Planetoiden enthält nur etwa 0,14 Proz. der gesamten Masse des Sonnensystems. Selbst die gewaltigen Riesenplaneten wie etwa Jupiter erscheinen demgegenüber als massenmäßig völlig unbedeutend. Dagegen steckt in den Planeten 98 Proz. des sogenannten Drehmoments. Diese Größe ist bei der Sonne trotz ihrer sehr erheblichen Masse verschwindend klein, da sie nur relativ langsam um die eigene Achse rotiert.

Die Massen der Planeten lassen eine eigentümliche Ordnung erkennen. Von den vier sonnennächsten — Merkur, Venus, Erde und Mars — haben Erde und Venus etwa gleiche Masse, Merkur und Mars jedoch etwa nur $\frac{1}{10}$ Erdmasse. Der nach außen folgende Jupiter ist ein Riesenplanet, er enthält mehr als 300 Erdmassen; die folgenden — Saturn, Uranus und Neptun — werden ziemlich stetig masseärmer, übertreffen aber die Erde immer noch um ein Vielfaches. Bei Pluto ist die Erdmasse wieder erreicht. Die Satellitenmassen sind sehr viel kleiner als die Planetenmassen.

Wichtig ist ferner, daß die Planeten nahezu kreisförmige Bahnen um die Sonne beschreiben, die bis auf ganz geringe Abweichungen alle in der gleichen Ebene liegen; diese Ebene fällt bemerkenswerter Weise eng mit der Ebene des Sonnenäquators zusammen. Die Rotationsachse der Sonne steht also fast senkrecht auf den Planetenbahnen. Umlaufssinn der Planeten um die Sonne sowie Achsendrehung von Sonne und Planeten erfolgen mit Ausnahme der Achsendrehung des Uranus gleichsinnig; dasselbe gilt für den Drehsinn der meisten Satelliten um ihre Planeten.

Einer eigentümlichen, aus physikalischen Gesetzen nicht zu begründenden Regel folgen die Entfernungen der Planeten von der Sonne. Die Regel wurde bereits 1766 von Titius in Wittenberg aufgestellt, aber erst sehr viel später durch den Berliner Astronomen Bode bekannt gemacht. Ordnet man die Planeten ihrer natürlichen Reihenfolge nach, Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun und Pluto, so wachsen ihre Sonnenentfernungen in einer einfachen Progression. Man erhält sie, indem man zu den Zahlen 0, 3, 6, 12, 24 usw., von denen mit Ausnahme der zweiten jede das Doppelte der vorhergehenden ist, 4 addiert. Die Erdentfernung wird dabei zu 10 angenommen, und zwischen Mars und Jupiter hat man an Stelle eines fehlenden großen Planeten die Schar der Planetoiden einzusetzen. Die Entfernung des Neptun gehorcht im übrigen dieser Regel nicht.

Das heutige Sonnensystem scheint ein stationäres Gebilde zu sein, das im wesentlichen keinen bedeutenden Veränderungen mehr unterworfen ist. Es

ist für uns eine sich stets gleichbleibende Gegebenheit, über dessen Vorgeschichte keine Zeugenaussagen verfügbar sind. Es ist zudem das einzige, das wir kennen. Oft läßt sich über Fragen der Entwicklung weit entfernter kosmischer Objekte sehr viel mehr ermitteln als über unsere unmittelbare Planetenumgebung. Immerhin sind die Entwicklungszeiten im astronomischen Bereich (worunter Zeiten verstanden werden sollen, in denen ein kosmisches Objekt eine nachweisbare erhebliche Veränderung durchgemacht hat) im allgemeinen unvorstellbar viel größer als das Alter der wissenschaftlichen Forschung oder der Menschheit überhaupt, so daß auch keine ausreichenden fortlaufenden Feststellungen vorliegen können. Die Situation unterscheidet sich aber häufig dadurch, daß Objekte der gleichen Art in verschiedenen Entwicklungsphasen vorkommen. Die Aufgabe besteht dann nur noch darin, die einzelnen Vertreter derselben Klasse zu erkennen und in eine natürliche, den Gang der Entwicklung kennzeichnende Reihenfolge zu bringen. Dieser Ausweg steht beim Planetensystem leider nicht offen, weil wir nur das eine untersuchen können, ja nicht einmal wissen, ob es noch weitere um andere der Myriaden Sonnen gibt. Auch diese Frage ist einer exakten Beantwortung nicht zugänglich. Eine wirklich zwingende Antwort kann nur die Erfahrung bringen, und hier steht die beobachtende Astronomie vor einer anscheinend unüberwindlichen Sperre: Man kann leicht zeigen, daß hypothetische Planeten selbst bei Zugehörigkeit zu den nächsten Fixsternen so lichtschwach sein müssen, daß sie hoffnungslos weit unter der Grenze dessen bleiben, was mit unseren optischen Mitteln erreichbar ist, und die auch mit Sicherheit auf lange Zeit hinaus oder gar für immer nicht unterschritten werden kann. Es muß allerdings erwähnt werden, daß man einige Fälle kennt, bei denen es sich möglicherweise um primitive Grenzfälle von Planetensystemen handeln könnte. Die Projektion der Bewegung der Fixsterne auf die Sphäre ist infolge der relativ kurzen Zeit, seit der sie genau verfolgt werden, eine gerade Linie. Einige Fälle fanden sich aber, wo periodische Abweichungen von der Geradlinigkeit des kurzen beobachteten Bahnstücks zu bemerken waren; die Sterne führen etwa wellenförmige Bewegungen auf einer geradlinigen mittleren Bewegungsspur aus. Das ist himmelsmechanisch nur zu verstehen, wenn der Stern in Wirklichkeit ein System aus mehreren bildet, die jedoch mit Ausnahme des einen infolge ihrer geringen Helligkeit nicht wahrgenommen werden können. Die einzelnen Komponenten kreisen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt und dieser wiederum beschreibt die geradlinige Bewegung auf der Sphäre. Die beobachtete Bewegung der hellen Komponente resultiert aus der Revolution um den Schwerpunkt und der Fortbewegung des ganzen Systems im Raum; das Ergebnis der Überlagerung hat wellenförmigen Charakter.

Aus einer genauen Analyse dieser Wellenlinie hat man auf die Massen der lichtschwachen und nicht direkt beobachtbaren Doppelsternkomponenten schließen können. Sie betragen in den wenigen bekannten Systemen diesen Art zwischen 2 und 150 Proz. der Sonnenmasse, sind also noch erheblich

größer als die Planetenmassen des Sonnensystems. Das ist nicht überraschend. Nur in den Fällen werden die Abweichungen von der geradlinigen Bahn für den Nachweis hinreichend groß sein, wo die Masse des dunklen Begleiters eben ausreicht, um eine meßbare Störung zu verursachen. Die Abweichungen überschreiten tatsächlich nur wenig die durch die unvermeidlichen Meßfehler gesetzte Grenze. Kleinere Massen bewirken so geringe Abweichungen von der Geradlinigkeit, daß sie durch die Meßfehler verdeckt werden, etwaige Begleitkomponenten sich also so nicht verraten können. Die Entdeckung nicht leuchtender oder nicht genug leuchtender Sternbegleiter gehört zu den großen Leistungen der Astronomie, aber auch hier ist sicher, daß die „Astronomie des Unsichtbaren“ auf wenige Fälle beschränkt bleiben wird. Es handelt sich ja auch noch lange nicht um komplizierte Planetensysteme, sonder vielmehr um Gebilde, die aus zwei oder drei Komponenten bestehen und daher wohl doch besser der Kategorie der Doppelsterne zugeordnet werden.

Prinzipiell ist kein zwingender Grund ersichtlich, das Sonnensystem als einen Ausnahmefall anzusehen. Unter dem Einfluß der Tradition neigte man in der Vergangenheit mehr zu der Vorstellung, das Sonnensystem sei einmalig oder Wiederholungen seien wenigstens selten. Physikalische Gründe lassen sich dafür nicht angeben. Fast scheinen sie leichter für die entgegengesetzte Meinung beizubringen zu sein. Das Fehlen bekannter Fälle ist ja, wie wir sahen, kein Argument. Wenn man vom Zentralgestirn des Planetensystems, der Sonne ausgeht, läßt sich überhaupt kein Hinweis für seine Einmaligkeit ableiten. Die Sonne ist nämlich ein durchaus normaler Stern, ein sogenannter G0-Zwerg des gebräuchlichen Klassifizierungsschemas, wie er in ungeheuren Mengen von genauen Duplikaten auftritt. Durchmesser, Masse, Leuchtkraft und Temperatur werden von zahlreichen anderen Sternen sowohl weit übertroffen als auch unterschritten. Die Rotation um ihre eigene Achse ist genau wie bei ähnlichen Objekten ziemlich langsam. Ein Äquatorpunkt legt nur etwa 2 km/sec zurück. Auch das ist völlig normal für ihren Typ. Große Rotationsgeschwindigkeiten werden bei Sternen ihrer Art nie beobachtet, wohl aber bei anderen Typen, die unter Umständen Rotationsgeschwindigkeiten von mehreren hundert Kilometern in der Sekunde am Äquator erreichen. Alles in allem kein besonderes Objekt mit Anzeichen für anormale Verhältnisse seiner Vergangenheit oder Umgebung. Die Annahme, daß andere Sterne dieser Art unerkant auch Planetensysteme besitzen, ist also mindestens ebenso plausibel wie die gegenteilige.

Die Theorien über die Entstehung des Planetensystems bilden zwei große Gruppen: die einen betrachten seine Existenz als eine aus inneren Gründen notwendige Folge der Stern- bzw. Sonnenentwicklung überhaupt, während die andere sie mehr als das Ergebnis eines zufälligen Ereignisses, eines nahen Vorübergangs der Sonne an einem anderen Stern, ansieht. Die berühmte Theorie Kants gehört ebenso wie die von Laplace in die erste Gruppe.

Der Grundgedanke der Theorie von Kant besteht in der Annahme, daß sich die Sonne und ihre Planeten durch Kondensation aus einer chaotischen Staub- oder Nebelmasse gebildet haben. Seine Kosmogonie umfaßt im übrigen nicht nur das Sonnensystem, sondern auch die übrigen Sterne.

In seiner 1755 veröffentlichten „Allgemeinen Naturgeschichte und Theorie des Himmels“ hat der Königsberger Philosoph seine Grundvorstellung näher entwickelt. Die Teilchen der diffusen Urmaterie bewegten sich zunächst völlig regellos durch den Raum. Bei einem Zusammenstoß entgegengesetzt bewegter Partikeln verlieren beide ihre Bewegungsenergie und sinken zu einem Anziehungszentrum ab, aus dem sich die Sonne bildete. Zum Teil werden sie aber auch durch weitere Zusammenstöße erneut abgelenkt und auf exzentrische Bahnen um die Sonne gezwungen. Allmählich ordnen sie sich durch nachfolgende Kollisionen zu größeren Partikeln und schließlich zu Planeten.

Es ist heute einfach, zahlreiche entscheidende Einwände zu machen. Bei einer genaueren Durchrechnung der Verhältnisse ergeben sich Entwicklungszeiten, die viel zu lang sind, um ernsthaft in Betracht kommen zu können. Es ist auch nicht einzusehen, wie sich der gleichsinnige Umlaufs- und Rotationsinn im Sonnensystem ausgebildet haben soll. Die Urmaterie besaß im übrigen nach Kant keine Eigenrotation; erst spätere Bearbeiter der Theorie haben sie eingeführt, um gewisse Schwierigkeiten zu umgehen. Aus der Kantschen Vorstellung wäre zu erwarten, daß die inneren, sonnennahen Planeten massereicher sind als die äußeren. Sie laufen mit größerer Geschwindigkeit um die Sonne und der Massenzuwachs sollte ungefähr proportional zur Geschwindigkeit sein. Eine solche Massenverteilung besteht jedoch keineswegs. Die Schwäche der Kantschen Hypothese rührt letzten Endes von der Tatsache her, daß er über den Anfangszustand der Materie vor dem Beginn der Entwicklung des Planetensystems keine speziellen Annahmen gemacht hat. Dies scheint heute unvermeidlich zu sein. Bei den späteren Hypothesen ist das auch geschehen; zahlreiche Eigenschaften des Sonnensystems werden schon der Urmaterie zugeschrieben.

Etwa 40 Jahre nach Kant vertrat Laplace eine Auffassung, die die Entstehung des Sonnensystems ebenfalls als einen Prozeß ansieht, der keines äußeren Anstoßes bedurfte: Er setzt eine langsam rotierende sphärische Gasmasse voraus. Unter der Wirkung der Gravitation zieht sie sich zusammen. Nach dem Gesetz von der Erhaltung des Drehmoments in einem abgeschlossenen System muß es dabei zur Vergrößerung der Rotationsgeschwindigkeit und damit zu Abplattung kommen. Die Rotationsgeschwindigkeit wächst soweit, daß die Gravitation die Zentrifugalkraft nicht mehr kompensieren kann. Ein Gasring wird abgestoßen, der sich im Laufe der Zeit zu einem Planeten zusammenzieht. Wiederholungen des letzten Vorganges führten zum heutigen Planetensystem.

Wenn auch die Theorie von Laplace manche Eigenschaft des Sonnensystems verständlich zu machen vermag, so bietet sie dennoch genügend An-

griffsflächen, um sie als unhaltbar zu verwerfen. Die Ablösung von Ringen ist unter den vorausgesetzten Umständen unwahrscheinlich; die Materie würde sich wohl in mehr diffuser Form verlieren. Die Formierung der Planeten aus Ringen ist kaum vorstellbar. Eine für die Laplacesche und ähnliche Theorien unüberwindliche Schwierigkeit liegt in der Verteilung des Drehmoments im Sonnensystem. Wie bereits erwähnt, besitzen die Planeten zwar nur $\frac{1}{700}$ der gesamten Systemmasse, jedoch 98 Proz. des Drehmoments. Die praktisch die gesamte Masse enthaltende Sonne verfügt also nur über einen geringen Bruchteil des Drehmoments.

Die Schwierigkeit mit dem Drehmoment wird in den Hypothesen von Chamberlin und Moulton (1905) sowie Jeans (1917) und Jeffreys (1929) vermieden. Sie gehören zur zweiten Gruppe kosmogonischer Theorien des Sonnensystems und verlangen die Mitwirkung eines äußeren Anlasses. Die Idee einer nahen Begegnung oder sogar einer Kollision der Sonne mit einem Stern als auslösendes Moment für den Entwicklungsprozeß stammt bereits von Buffon, einem französischen Naturforscher des 18. Jahrhunderts. Ein solcher Vorübergang soll nach Chamberlin gewaltige Gezeitenwellen auf den Sternoberflächen bewirken, wobei Materie abgestoßen wird, die um den jeweiligen Ursprungstern rotiert. Kleine vorhandene Verdichtungen mögen sich unter Abkühlung zu einigen wenigen Planeten vereinigen. Jeans und ebenso Jeffreys modifizierten die Hypothese etwas. Ein langer Materiestreifen sollte sich bei einer — nach Jeffreys sogar direkten — Kollision zweier Sterne ausbilden, der allmählich in kontrahierende und abkühlende Fragmente zerfiel.

Die kosmogonischen Hypothesen, die mit einem nahen Vorübergang der Sonne an einem anderen Stern operieren, sind von vorherein mit einer gewissen Unwahrscheinlichkeit behaftet, die jedoch kein zwingendes Gegenargument darstellt. Nahe Vorübergänge zweier Sterne sind äußerst selten im Milchstraßensystem. Ernsthafter ist der Einwand, daß zur Erzeugung starker Flutwellen auf der Sonne die enge Annäherung eines Sterns sehr großer Masse erforderlich ist, solche massereichen Sterne aber so weit ausgedehnt sind, daß sie überhaupt nicht nahe genug herankommen können. Ob ein vorbeilaufender Stern das hohe Drehmoment auf die Planeten übertragen haben kann, erscheint mehr als zweifelhaft. Schließlich ist neben den Bedenken mechanischer Natur neuerdings auch noch eine mehr physikalische Schwierigkeit hinzugetreten. Die Sonne besteht, wie wahrscheinlich nahezu alle Sterne, atomzahlenmäßig aus etwa 85 Proz. Wasserstoff. Die Planeten sind aber überwiegend aus Silikaten und Metallen aufgebaut. Die Ausgangsmaterie muß also vor dem Fortdiffundieren des Wasserstoffs außerordentlich umfangreich gewesen sein, damit genügend Baustoff für die Planeten übrigbleiben konnte.

— Eine sehr aussichtsreiche Theorie, die C. F. von Weizsäcker vor einigen Jahren aufstellte, verknüpft wieder die Planetenentstehung mit der Sternentwicklung überhaupt. Sie bedient sich einer Erscheinung, die in der Physik der

Strömungsvorgängen in Flüssigkeiten und Gasen eine ständig wachsende Bedeutung besitzt: die Turbulenz. Der Begriff der Turbulenz ist in der Physik nicht gerade neu, aber die genauere Klärung all dessen, was sich an höchst komplizierten Vorgängen bei ihrem Auftreten abspielt, ist erst in der letzten Zeit erfolgreich in Angriff genommen worden. Es handelt sich dabei um mathematisch äußerst schwierige und verwickelte Probleme, deren Lösung auch für technische Aufgaben der Aërodynamik zum Beispiel von entscheidender Wichtigkeit ist. Selbst eine ausreichende Definition des Begriffs stößt bereits auf erhebliche Schwierigkeiten. Turbulente Strömung eines Mediums liegt immer dann vor, wenn in dem Strömungsfeld Wirbel auftreten. Einzelne Teilchen oder auch größere Komplexe der strömenden Materie können infolge der Wirbelausbildung gegen die allgemeine Bewegungsrichtung rückläufig werden. Ausbildung von Turbulenz kann man z. B. oft hinter einem Pfahl beobachten, der im Wasser eines schnell fließenden Baches steht, oder auch hinter einem rasch dahinfahrenden Schiff.

Es ist klar, daß solche Vorgänge einer mathematischen Behandlung großen Widerstand entgegensetzen. Man hat ihre Unübersichtlichkeit geradezu als Definition der Turbulenz zu benutzen versucht: „Turbulenz ist eine Strömungsbewegung, die so kompliziert ist, daß man von einer genauen Kenntnis derselben absieht und sich mit der Beschreibung einer mittleren Bewegung begnügt“ (Oseen). Diese Definition setzt keine scharfe Grenze zwischen turbulentem und nichtturbulentem (laminarem) Strömungszustand, die Grenze ist vielmehr je nach Belieben oder Stand der wissenschaftlichen Erforschung eines speziellen Falls verschiebbar. Inzwischen ist sie durch tiefere Einsichten ersetzt worden. Als grobe Hilfe zur Beschreibung dessen, was gemeint ist, mag sie aber im Hinblick auf den Verzicht mathematischer Entwicklungen von einigem Nutzen sein.

Von Weizsäcker nimmt an, daß die Gegend des heutigen Sonnensystems vor seiner Entstehung mit einer diffus verteilten gasförmigen Materie erfüllt war. Fein verteilte, sogenannte interstellare Materie findet sich auch heute noch im Weltenraum. Ihre Dichte ist äußerst gering, man rechnet durchschnittlich weniger als 1 Atom pro Kubikzentimeter. Die postulierte Urmaterie muß erheblich dichter gewesen sein, denn sonst hätte der vorgeschlagene Prozeß eine so lange Zeit benötigt, wie sie mit dem wahrscheinlichen Alter des Sonnensystems von einigen 10^9 Jahren nicht vereinbar ist. Ähnlich wie die Sonne sind aus der prästellaren Materie auch andere Sterne entstanden. Aus der relativen Eigenbewegung der Sterne, durchschnittlich etwa 30 km/sec, gegen ihre nähere Umgebung schließt von Weizsäcker, daß sich die prästellare Materie in turbulenter Bewegung befunden haben muß. Die relative Bewegung großer Turbulenzwirbel lebt heute in den relativen Bewegungen der Sterne weiter. Wäre nur die regellose Wärmebewegung der Gas- oder Staubpartikel vorhanden gewesen, so müßten sich benachbarte Fixsterne heute gegeneinander in Ruhe befinden, was jedoch durchaus nicht der Fall ist. Ein in der Entwicklung begriffener Stern zieht aus seiner Um-

gebung Materie an sich. Da sie im allgemeinen relativ zu ihm eine Geschwindigkeit besitzt, überträgt sie einen Drehimpuls, der den Stern in Rotation versetzt.

Sonne und Planeten sind zusammen aus einer einheitlichen rotierenden Gasmasse entstanden. Dabei bildete sich zunächst eine zentrale Verdichtung. Die ungeheure Gashölle kann aber nicht wie ein starrer Körper rotieren. Die Winkelgeschwindigkeit muß nach den Gesetzen der Mechanik um so mehr abnehmen, je weiter vom Zentralkörper nach außen liegende Teile der Gasmassen betrachtet werden. Äußere Teile bleiben also bei der Drehbewegung gegen innere zurück. Stellt man sich die Hölle der Einfachheit halber scheibenförmig vor, so werden vom Zentrum nach außen aufeinanderfolgende Ringzonen relativ zueinander eine Geschwindigkeit aufweisen. Infolge von Reibungsvorgängen bei der Drehung der Ringe wird es an ihren Grenzflächen zur Ausbildung von Turbulenz kommen.

Die erwähnte Titius-Bodesche Regel über die Entfernung der Planeten von der Sonne — nur Bahnen bestimmten Halbmessers treten tatsächlich auf — kann aus dem System der sich in den Ringen ausbildenden Wirbel abgeleitet werden. In diesen sukzessiven Kreisingen um die Sonne sollen jeweils eine Anzahl gleich großer Wirbel umlaufen, deren Drehsinn ebenfalls gleichsinnig ist. In jedem Ring laufen die Wirbel mit nach außen abnehmender Winkelgeschwindigkeit um das Zentrum. Die Grenzkreise der Ringe, an denen Reibung auftreten muß, sind die bevorzugten Zonen der Planetenbildung.

Bei geeigneten Temperaturbedingungen wird es hier zur Bildung von Molekülen und größeren Partikeln kommen. Bereits bei zunächst noch kolloidalen Abmessungen der Partikeln wird es einzelne genügend große geben, die bei Kollision mit anderen, kleineren diese in irgendeiner Weise einfangen, zum Beispiel durch chemischen Einbau, mechanische Anlagerung oder „Schwarmbildung“. Nahezu gleich große werden beim Zusammenstoß jedoch meist zerstäuben. Der Vereinigungsprozeß zu größeren Körpern von Planetenformat ist außerordentlich verwickelt und schwer zu übersehen. Vor allem müssen genügend große Turbulenzelemente, und zwar auch zeitlich ausreichend lange zur Verfügung gestanden haben. Die erforderlichen Zeiten müssen mit dem Sonnenalter und der mutmaßlichen Lebensdauer der Hölle vereinbar sein. Von Weizsäcker unternimmt einige Abschätzungen des naturgemäß mit zahlreichen Hypothesen belasteten von ihm vorgeschlagenen Prozesses.

Um die Planeten, die sich auf den Berührungskreisen bilden, liegen kleinere Gashüllen, die, wie man zeigen kann, ebenfalls rechtsläufig rotieren. Tatsächlich drehen sich die Planeten und die Mehrzahl ihrer Monde rechtsläufig. Ihre Ausbildung mag ähnlich vor sich gegangen sein wie die der Planeten, jedoch läßt sich darüber vorläufig kaum etwas Sicheres aussagen. Die zum Teil hochkomplizierten Satellitensysteme mancher Planeten bieten wie auch der Erdmond noch zahlreiche ungelöste Rätsel.