

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Die Kultur der Gegenwart

ihre Entwicklung und ihre Ziele

Astronomie

Hartmann, J.

1921

Physische Erforschung des Planetensystems. Von K. Graff

PHYSISCHE ERFORSCHUNG DES PLANETENSYSTEMS.

VON
K. GRAFF.

I. Erste Anwendung des Fernrohrs auf die Himmelsbeobachtung. Auf keinem anderen Wissensgebiete konnte die um das Jahr 1608 ge- glückte Erfindung des Fernrohrs so bedeutende Umwälzungen hervorrufen wie in der astronomischen Forschung. Die gewaltige, bis dahin unüberwindliche Kluft zwischen der Erde und den Gestirnen war zwar mit der denk- würdigen holländischen Erfindung nicht beseitigt, aber doch so weit über- brückt, daß schon die ersten Himmelsbeobachtungen zu den weitestgehen- den Hoffnungen berechtigten. Das kleine Fernrohr Galileis, das sich dieser lediglich auf Grund einer Beschreibung des neuen, so einfachen Instruments konstruiert, übertrifft bei seiner ersten Anwendung auf den nächtlichen Him- mel alle Erwartungen. Die lichte Wolke der Plejaden löst sich in einen dichten Sternhaufen von mehr als 40 Objekten auf, und in gleicher Weise offenbaren auch der Präsepenebel im Krebs und die Milchstraße ihre wahre Sternnatur. Der Mond zeigt Berge und Täler, Jupiter ist von 4 Monden um- geben, die in regelmäßigen Zwischenzeiten den Hauptkörper umkreisen, der strahlende Morgenstern und der merkwürdige rote Mars zeigen Phasen, die ähnlich wie beim Monde mit ihrer räumlichen Stellung zur Sonne zusammen- hängen und deutlich die Kugelgestalt dieser Wandelsterne verraten. Am äußersten bekannten Planeten, Saturn, erkennt man eine zunächst unerklär- liche, veränderliche Henkelgestalt, und selbst die Sonne, bis dahin das Ideal- bild ungetrübter Reinheit, zeigt größere und kleinere Flecken, die sie mit herumschwingt bei ihrer ständigen Umdrehung um eine fest im Raume ge- legene Rotationsachse.

Eine erdrückende Fülle von neuen Tatsachen der Himmelskunde fordert eine genaue Untersuchung und Einfügung in den Schatz bisher erlangter Erkenntnis. Urplötzlich, mit einem Schlage, war eine Reihe neuer natur- wissenschaftlicher Wunder dem menschlichen Auge enthüllt. Zu der Astro- nomie des Altertums und des Mittelalters, die, von einzelnen Spekulationen abgesehen, sich fast nur mit der Bewegung der Gestirne befaßte und be- fassen konnte, trat jetzt ein vollständig neuer Zweig hinzu — die Erforschung der physischen Eigentümlichkeiten der Himmelskörper, in erster Linie von Sonne, Mond und Planeten, da schon die ersten Versuche Galileis keinen

Zweifel darüber ließen, daß im Bereiche der unendlichen Fixsternwelt das neue Instrument wohl dicht nebeneinanderstehende Objekte trennen und schwächere Sterne dem Auge sichtbar machen, dagegen direkt kaum irgend etwas von ihren physischen Eigentümlichkeiten entschleiern würde.

Die Lehre des Kopernikus, die nach Ablauf von dreiviertel Jahrhunderten erst im Kreise einer kleinen Zahl von Fachmännern sich Geltung und Anerkennung verschafft hatte, die Lehre, die in dem Satze, die Erde ein Planet, jeder Planet eine Erde, gipfelte, konnte jetzt, nach Beseitigung der letzten Zweifel kaum noch einem überzeugten Widerspruch begegnen. Mit dem gesteigerten Interesse erweitert sich dabei ganz von selbst das Forschungsgebiet und damit auch der Jüngerkreis der Himmelskunde, deren Pflege bis dahin in der Obhut einzelner hochbefähigter Gelehrter gelegen hatte. Die Erforschung der kosmischen Gesetze, insbesondere der Bewegung der Planeten, mußte ja auch fernerhin als Kernpunkt astronomischer Rechen- und Beobachtungstätigkeit bestehen bleiben; das nicht zu unterschätzende geistige Band zwischen dem Fachgelehrten und dem gebildeten Laien ist aber ohne Frage erst in dem Moment geknüpft worden, als das Fernrohr dem leiblichen Auge einiges von den Weltmysterien offenbarte, nach denen sich das geistige schon seit Jahrtausenden gesehnt hatte.

Langsames
Fortschreiten
der ersten
Arbeiten am
Fernrohr.

Wie bei allen großen Entdeckungen und Erfindungen der Geschichte mußte auch beim Fernrohr erst eine geraume Zeit vergehen, ehe man die Anwendungsmöglichkeit des Instruments in der Astronomie vollkommen erfaßt und auf Grund der praktischen Erfahrungen das zielbewußte Sehen durch das Instrument, also das, was wir heute als Beobachtung bezeichnen, gelernt hatte. Es ist daher ein müßiges Beginnen, nachträglich darüber nachzugrübeln, welche Fülle astronomisch äußerst wichtiger Arbeiten bereits mit den bescheidenen Instrumenten jener Zeit hätte ausgeführt werden können, besonders wenn man neben den Planeten auch den Fixsternen, ihrer Katalogisierung, Größenschätzung usw. die gebührende Aufmerksamkeit gewidmet hätte. Bei solchen Betrachtungen ist auch nicht zu vergessen, daß die ersten Fernrohre große Mängel aufwiesen und bei ihrer Benutzung an die Geduld der Beobachter so große Anforderungen stellten, daß neben begeisterten Verkündern ihrer Leistungen auch Stimmen laut wurden, die vor der Überschätzung der mit ihnen erzielten Ergebnisse warnten. Auch als Meßinstrument erfuhr das Fernrohr wegen gewisser ihm noch anhaftender Mängel zum Teil mit Recht zunächst eine direkte Ablehnung, um erst nach und nach im 18. und 19. Jahrhundert die Würdigung zu erhalten, die ihm in dieser Hinsicht zukommt. Alle diese Umstände haben bewirkt, daß die Ausbeute an neuen wissenschaftlichen Tatsachen, die uns das Fernrohr in den ersten Jahrzehnten nach seiner Erfindung vermittelt hat, nicht besonders groß ist und sich fast ausschließlich auf physische Untersuchungen im Sonnensystem beschränkt, also auf die Feststellung solcher Tatsachen, die lediglich eine bloße Betrachtung der betreffenden Himmelsobjekte in dem neuen Instrument ergeben konnte.

Jedenfalls ist die Geschichte der Planetenforschung in den ersten beiden Jahrhunderten nach Erfindung des Fernrohrs gleichzeitig auch eine Geschichte dieses Instruments, denn erst die Erfolge Herschels auf dem Gebiete der bis dahin stiefmütterlich behandelten Erscheinungen der Fixsternwelt lenken zu Beginn des 19. Jahrhunderts das Interesse der Beobachter auf andere Bahnen. Die allerletzten Jahre haben dann wieder der Planetenkunde neue Freunde und sehr wesentliche Erfolge gebracht.

Die Erforschung der gelegentlich im Sonnensystem weilenden Kometen hat eine kürzere Geschichte. Über das Wesen dieser bis in das 18. Jahrhundert hinein mit ehrfurchtsvoller Scheu betrachteten ephemeren Gestirne hat das Fernrohr als solches wenig Klarheit gebracht. Die positiven Kenntnisse, über die die Himmelskunde hier verfügt, verdankt sie fast ausschließlich der Spektralanalyse und der Photographie, also durchaus modernen Disziplinen.

Es wird im folgenden auseinanderzusetzen sein, wie sich das Bild von der physischen Beschaffenheit der dunklen, von der Sonne erleuchteten Weltkörper unserer nächsten Nachbarschaft im Weltall schließlich gestaltet hat. Daß an dem Zustandekommen dieses Bildes gerade die letzten Jahrzehnte astronomischer Forschung erheblich mitgewirkt haben, wird sich aus den Darlegungen der Beobachtungsergebnisse als ein hoffnungsvoller Ausblick für die Zukunft ganz von selbst ergeben.

II. Die physische Erforschung der Planeten. Man bezeichnet die Planeten Merkur und Venus, die sich innerhalb der Erdbahn um die Sonne bewegen, als untere Planeten. Aus ihrer geringen Distanz von der Sonne folgt, daß sie sich nie über einen bestimmten Winkelabstand hinaus von der Sonne entfernen, niemals der Sonne gegenüber am Nachthimmel erscheinen können. Der Winkelabstand dieser Planeten von der Sonne oder ihr Längenunterschied gegen diese wird Elongation genannt, und sein Grenzwert, die „größte Elongation“, ist offenbar gleich dem von der Erde aus gesehenen scheinbaren Radius der betreffenden Planetenbahn. Infolge der Exzentrizität dieser Bahnen unterliegt die größte Elongation, namentlich beim Merkur, nicht unmerklichen Schwankungen; im Mittel beträgt sie für Merkur 23° , für Venus 46° . Man kann daher die unteren Planeten nur in der Abend- bzw. in der Morgendämmerung beobachten, wenn man nicht vorzieht, sie auf Grund ihrer genau bekannten Stellung mit Hilfe eines Fernrohrs am Tage aufzusuchen, was wegen ihres großen Glanzes keine Schwierigkeit bereitet. Die volkstümliche Bezeichnung Abend- und Morgenstern paßt sich somit den Sichtbarkeitsbedingungen der beiden unteren Schwestergestirne der Erde gut an.

Die unteren
Planeten.

Eine andere Besonderheit ergibt sich noch aus der Bahnlage der unteren Planeten, nämlich die Möglichkeit eines Vorüberganges vor der Sonne oder eines sog. Planetendurchganges. Da die pendelnde Bewegung der unteren Planeten um das Tagesgestirn nichts anderes ist als das Ergebnis einer über-

aus schrägen Projektion ihrer Bahn auf die Himmelskugel, so ist es klar, daß diese Planeten vom irdischen Standpunkte aus bald jenseits (obere Konjunktion) bald diesseits der Sonne (untere Konjunktion) stehen müssen. In der oberen Konjunktion sind sie um ihren vollen Bahnradius mehr, in der unteren um ebensoviel weniger von der Erde entfernt. Befindet sich der Planet zur Zeit der unteren Konjunktion hinreichend nahe an der Ebene der Erdbahn, d. h. in der Nähe seiner Knotenlinie, so kann die Verbindungslinie von der Erde zum Planeten in ihrer Verlängerung die Sonnenscheibe treffen, und man sieht ihn dann als schwarzes Scheibchen die Sonne von Osten nach

Westen durchqueren: man beobachtet einen Merkur- bzw. Venusdurchgang.

Eine einfache Überlegung zeigt, daß die Nähe der unteren Konjunktionen für die Beobachtung dieser Weltkörper wegen der geringen Erdentfernung am günstigsten wäre, wenn nicht die unteren Planeten gerade um diese Zeit uns ihre dunkle Hemisphäre zuekehrten. Merkur und Venus erscheinen also im günstigsten Falle, bei größtem scheinbarem Durchmesser als schmale Sicheln, deren Beobachtung auch

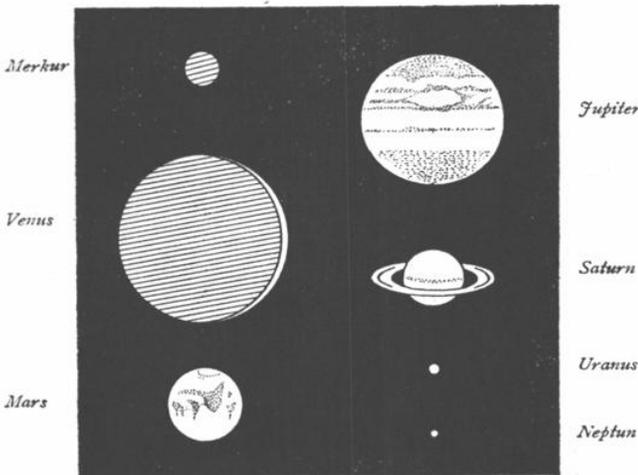


Fig. 16. Scheinbare Größe der Planeten von der Erde aus gesehen bei günstigsten Entfernungsverhältnissen.

bei größter Aufmerksamkeit und Sorgfalt nur wenig Erfolg verspricht (Fig. 16). Man braucht sich nur einen so reich gegliederten Weltkörper wie unseren Mond unmittelbar vor und nach Neumond mit bloßem Auge oder in einem schwach vergrößernden Fernglase anzusehen, um zu erkennen, wie wenig versprechend der Versuch sein muß, aus dem erleuchteten mit Projektionsfehlern behafteten schmalen Randstreifen eines kugelförmigen Weltkörpers Schlüsse über die ganze Oberflächenbeschaffenheit zu gewinnen. Die Schwierigkeiten werden nahezu unüberwindlich, wenn die betreffenden Planeten, wie es bei Merkur und bei Venus der Fall zu sein scheint, eine kaum merkliche Oberflächengliederung in hellere und dunklere Gebiete aufweisen, und wenn ihre kosmische Lage in ständiger Nähe der Sonne eine dauernde Überwachung ausschließt. Alle diese Schwierigkeiten müssen berücksichtigt werden, wenn man die auch heute noch recht geringen Kenntnisse über die physische Beschaffenheit der beiden unteren Planeten richtig beurteilen will.

Merkur.

Schon für die Betrachtung mit bloßem Auge galt von jeher der Planet Merkur als ein ganz besonders schwieriges Objekt, und noch heutzutage ist er den größeren Kreisen gelegentlicher Himmelsbeobachter unserer Gegen-

den fast unbekannt, obwohl er zu gewissen Zeiten den Glanz des hellsten Fixsterns, des Sirius, erreicht und dann auch ohne Schwierigkeit unmittelbar nach Sonnenuntergang oder kurz vor Sonnenaufgang gesehen werden kann. Rechnet man allerdings die Stunden zusammen, während deren Merkur ein deutliches, leicht erkennbares Objekt am gestirnten Himmel darstellt, so würde kaum mehr als ein Dutzend im Jahre herauskommen. Ist doch die größte Zwischenzeit, die zwischen dem Durchgang der Sonne und des Planeten durch die Horizontlinie verfließt, durch knappe $1\frac{1}{2}$ Stunden bemessen, wobei noch die Trübungen, die unsere Atmosphäre in der Nähe des Horizontes fast das ganze Jahr hindurch aufweist, störend einwirken.

In Anbetracht dieser Schwierigkeiten kann es kaum verwundern, daß die ersten Fernrohrbeobachter angesichts der viel interessanteren Aufgaben, die ihnen das Reich der übrigen Planeten darbot, Merkur sehr bald aus ihrem Arbeitsprogramm beseitigten. Bis in die Neuzeit hinein ist daher Merkur von den Astronomen fast ausschließlich zum Zwecke von Messungen im Fernrohr eingestellt worden. Mikrometrische Bestimmungen ergaben dabei für den Durchmesser dieses relativ sehr kleinen Planeten 4770 km, also wenig mehr als den dritten Teil des Erddurchmessers, ohne Andeutung einer Abplattung. Um bei dieser Gelegenheit auch die anderen kosmischen Verhältnisse des Merkur zu erledigen, sei erwähnt, daß sein Abstand von der Sonne 58 Millionen km, der Umlauf, also das Merkurjahr, 88 Tage beträgt. Die kosmische Stellung des Planeten zur Sonne wiederholt sich also regelmäßig in dem eben genannten Zeitintervall. Die relative Lage zur Erde, also z. B. die Aufeinanderfolge der Konjunktionen und Elongationen, ist naturgemäß auch von der Ortsänderung des Beobachters abhängig. Wegen der gleichen Bewegungsrichtung der Erde um die Sonne erfordert die Wiederholung dieser Erscheinungen eine längere Zeit, die man auch als synodischen Umlauf zu bezeichnen pflegt. Diese Periode beträgt bei Merkur 116 Tage; bei Beobachtung einer günstigen Stellung des Planeten läßt sich somit der nächste Termin ähnlicher Sichtbarkeitsbedingungen in einfacher Weise berechnen.

Beobachtungen des Planeten Merkur, die eine Erforschung seiner Oberfläche nach bestimmten Gesichtspunkten zum Ziele hatten, sind im vergangenen Jahrhundert eigentlich nur von Schröter in Liliental und später in den achtziger Jahren von Schiaparelli in Mailand ausgeführt worden. Sie hatten in erster Linie die astronomisch sehr interessante Frage nach der Umdrehungszeit des Planeten zum Ziel. Es kann nicht behauptet werden, daß die Bemühungen zu einem einwandfreien Resultate geführt hätten. Man darf aus den angefertigten Skizzen und Zeichnungen der beiden Astronomen sowie aus den Mitteilungen gelegentlicher sonst zuverlässiger Merkurbeobachter lediglich entnehmen, daß um die Zeit der Elongationen, also zu denjenigen Zeiten, wo der Planet der Erde in Viertelphase erscheint, in guten Fernrohren und bei günstigen Luftverhältnissen auf seiner Oberfläche einige schwache, sehr diffuse Schattenzüge mit großer Mühe und Anstrengung wohl

Rotationsfrage.

zu erkennen sind. Sie sind aber weder genauer zu beschreiben noch anders als in den größten Zügen zeichnerisch darzustellen. Immerhin glaubte Schiaparelli aus der Unveränderlichkeit des Planetenanblicks an einigen aufeinanderfolgenden Tagen den Schluß ziehen zu dürfen, daß Merkur sehr langsam, wahrscheinlich in derselben Zeit sich um die Achse dreht, in der er einen vollen Umlauf um die Sonne ausführt. Dieses Resultat ist nicht unwidersprochen geblieben, und die ganze Frage nach der Achsendrehung des innersten Planeten muß nach wie vor offen bleiben.

Physische
Beschaffenheit.

Eine der Umlaufszeit gleiche Rotationszeit würde bei Merkur auf ähnliche physische Verhältnisse hinweisen, wie wir sie bei unserem Erdmonde kennen, und die durch das gänzliche Fehlen von Luft und Wasser sowie durch eine rauhe, stark zerklüftete Oberfläche charakterisiert sind. Es ist nun recht interessant, daß alle anderen indirekten Versuche, über den Planeten nähere Einzelheiten zu gewinnen, tatsächlich darauf hindeuten, daß ein Vergleich dieser kleinen Planetenwelt mit unserem Monde durchaus angebracht erscheint. Es muß hier vorausgeschickt werden, daß von dem Phasenwechsel des Mondes genaue Helligkeitsbestimmungen vorliegen, aus denen sich zunächst die sog. Albedo ableiten läßt, d. h. die Prozentzahl der Helligkeit, die der betreffende Himmelskörper von dem auffallenden Sonnenlicht zurückzustrahlen vermag. Diese Albedo ist für den Mond zu 0,13 gefunden worden, d. h. der Mond vermag im Durchschnitt von der Einheit des auffallenden Sonnenlichtes nur 0,13 zu reflektieren. Weiterhin ist festgestellt worden, daß die Struktur der Oberfläche unseres Trabanten das Licht der Phasen wesentlich beeinflußt, insofern, als durch den starken Schattenwurf in den Viertel- und Sichelphasen eine Dämpfung der Helligkeit gegenüber den Verhältnissen bei einer idealen glatten Kugel eintritt. Es ist nun ohne Frage merkwürdig, daß auch bei Merkur Albedo und Phasenwechsel nahe die gleichen photometrischen Effekte ergeben, wie wir sie beim Erdmonde vorfinden. Insbesondere kann der gefundene Albedowert von 0,14 innerhalb der unvermeidlichen Beobachtungsfehler als völlig identisch mit der oben für den Mond genannten Zahl gelten. Die Annahme ähnlicher physischer Verhältnisse bei den beiden Weltkörpern hätte also ohne Frage eine wissenschaftliche Begründung.

Atmosphäre.

Neben der Photometrie ist auch die Spektralanalyse auf den Planeten angewendet worden, obwohl gleich hier betont werden muß, daß wir uns von ihr bei dunklen, in reflektiertem Lichte leuchtenden Körpern nicht die großen Erfolge versprechen dürfen, an die wir uns auf dem Gebiete der Stellarastronomie gewöhnt haben. Was die prismatische Zerlegung des Planetenlichtes zu enthüllen vermag, ist lediglich das Vorhandensein einer dichteren Atmosphäre. Ist letztere sehr dünn und vielleicht obendrein von ähnlicher Zusammensetzung wie die unsrige, so werden die Ergebnisse höchst unsicher, da das direkte und das von der Planetenoberfläche reflektierte Sonnenlicht dann keinen merklichen Unterschied der Zusammensetzung zeigen. In dem speziellen Falle des Merkur ist z. B. der Nachweis einer Atmo-

sphäre spektroskopisch noch nicht erbracht worden, und man darf daher auf dem Planeten höchstens mit einer sehr dünnen Lufthülle rechnen. Daß in dieser Atmosphäre, wenn sie überhaupt vorhanden ist, keine intensivere Wolkenbildung stattfindet, beweist schon der geringe Prozentsatz des zurückgestrahlten Sonnenlichtes, den die erwähnten photometrischen Messungen ergeben haben.

Das physische Bild des Merkur scheint nach den obigen Darlegungen ^{Ähnlichkeit mit dem Monde.} trotz des Fehlens direkter Oberflächeneinzelheiten greifbare Formen zu gewinnen. Eine tote, erstarrte Welt mit rauher Oberfläche ohne dichtere Atmosphäre mit einer Rotation, die bei senkrechter Achsenlage zur Bahnebene für die eine Halbkugel dauernden Tag bei fast ungeänderter Sonnenstellung, für die andere aber dauernde Nacht bedingen würde. Freilich dürfen auch die dieser Vorstellung weniger förderlichen Argumente nicht mit Stillschweigen übergangen werden. Was zunächst die Gleichheit von Rotations- und Revolutionszeit anbelangt, wie wir sie bei unserem Monde vorfinden, so lassen sich die gewichtigen theoretischen Gründe, die für diese Gleichheit bei unserem Erdtrabanten sprechen, bei weitem nicht mit der gleichen Beweiskraft auf das System Sonne-Merkur anwenden. Ferner erwartet man bei einer ähnlichen Charakteristik zweier Weltkörper auch die ungefähre Übereinstimmung in einer Eigenschaft, die wir bei irdischen Gegenständen als spezifisches Gewicht bezeichnen und bei Metallen, Gesteinen usw. auch direkt als Hauptmerkmal anzusehen pflegen. Dieses spezifische Gewicht oder die Dichte beträgt bei unserem Monde nur 0,61 der Erddichte. Merkur dagegen zeichnet sich unter allen in dieser Hinsicht bisher untersuchten Weltkörpern durch seine sehr beträchtliche Dichte aus, die das 1,1 fache derjenigen der Erde, somit nahe das Zweifache des beim Monde gefundenen Wertes beträgt. Ist auch die mittlere Dichte eines Weltkörpers, wie unsere Erde selbst am deutlichsten zeigt, für die Dichte der Oberfläche durchaus nicht maßgebend, so ist hier der Unterschied doch groß genug, um zwischen den beiden Welten gewisse physische Verschiedenheiten vermuten zu lassen, über die wir allerdings vorläufig nichts Näheres anzugeben vermögen.

Die Ergebnisse, die die physische Beobachtung des Planeten Venus im ^{Venus.} Laufe der drei Jahrhunderte seit Entdeckung des Fernrohrs gezeitigt hat, sind trotz der wesentlich günstigeren Sichtbarkeitsbedingungen dieses hellsten aller Planeten kaum vollständiger als das, was uns die Merkur Oberfläche enthüllt hat. Tatsächlich ist der enorme Glanz dieses populärsten aller Planeten der Beobachtung eher hinderlich als förderlich. Den hellsten Fixstern des Himmels, Sirius, übertrifft die Venus unter den günstigsten Lichtverhältnissen um volle 2 Größenklassen, d. h. um das 6- bis 7fache. Trotz des starken Phasenwechsels bleibt die Gesamthelligkeit unseres nächsten Nachbarplaneten ziemlich unveränderlich. Während er sich von der oberen Konjunktion zur östlichen Elongation bewegt, wird die Zunahme des scheinbaren Durchmessers durch die Abnahme des beleuchteten Teils der Kugel kompensiert, und dieser Ausgleich bleibt auch dann noch bestehen, wenn die

Venus kurz vor und nach der unteren Konjunktion sich auch im kleinen Fernrohr als eine schmale Sichel mit einem Durchmesser von nahe einer Bogenminute dem Auge darstellt.

Helligkeit.

Die Sichtbarkeit der Venus am hellen Tage ist früher als ein besonders interessantes Phänomen angesehen und in Chroniken und geschichtlichen Urkunden wiederholt erwähnt worden. Tatsächlich ist hierzu kaum etwas anderes nötig als ein genügender Abstand des Planeten von der Sonne, ein reiner klarer Himmel und eine ungefähre Kenntnis der Lage dieses Wandelsterns. Treffen diese Bedingungen zu, so gelingt es für gewöhnlich schon einem Durchschnittsauge, ihn auch bei vollem Tageslicht aufzufinden und dann auch ohne besondere Augenermüdung längere Zeit zu verfolgen. Im Fernrohr ist selbst in der Dämmerung bald nach Sonnenuntergang oder vor Sonnenaufgang der Glanz des Planeten bereits derartig störend, daß physische Beobachtungen kaum anders als am Tage zu erzielen sind, wenn man nicht ähnlich wie bei der Sonne zu schwachen Dämpfgläsern seine Zuflucht nehmen will. Aus allen diesen Tatsachen geht hervor, daß die Albedo der Venus einen sehr hohen Wert haben muß. Sie ist tatsächlich zu 0,76 bestimmt worden, entspricht also der Rückstrahlungsfähigkeit von frisch gefallenem Schnee.

Was die kosmischen Verhältnisse der Venus anbetrifft, so kommen sie denjenigen der Erde bereits wesentlich näher, als dies bei Merkur der Fall war. Der Abstand von der Sonne beträgt 108 Millionen km, die Umlaufzeit 225 Tage. Der Durchmesser, der ähnlich wie bei Merkur auf vollkommene Kugelgestalt hindeutet, mißt 12420 km, also fast genau ebensoviel wie der Durchmesser der Erde. Auch die Masse und Dichte des Planeten würde zunächst auf erdähnliche Beschaffenheit der Nachbarwelt hindeuten. Die erstere beträgt 0,82, die letztere 0,9 des entsprechenden für unseren Planeten gefundenen Wertes.

Versuche einer Umdrehungsbestimmung.

Die Nachforschung nach Einzelheiten der Venusoberfläche zum Zwecke einer Umdrehungsbestimmung ist fast so alt wie das Fernrohr selbst, denn von jeher erschien kein anderer Wandelstern dem bewaffneten Auge unter einem so bedeutenden scheinbaren Durchmesser wie die Venus. Schon J. D. Cassini, der erste Organisator der Pariser Sternwarte, gab sich um die Wende des 17. Jahrhunderts die größte Mühe, über das Rätsel der Venusrotation Gewißheit zu erlangen, jedoch ohne positiven Erfolg. Die Sichel- und Viertelphasen zeigten wohl zuweilen graue, sehr zarte Schattierungen, aber alles Nachforschen nach einer Bewegung war vergeblich. Glücklicher in dieser Beziehung schienen Cassinis Sohn sowie Bianchini in Rom zu sein, von denen der erstere schließlich zu einer Umdrehungsperiode von $23^h 15^m$, der letztere auf eine solche von $24\frac{1}{3}^d$ (!) geführt wurde. Zwar widersprachen die ein Jahrhundert später angestellten Beobachtungen Herschels dem Ergebnis Cassinis, doch schien es andererseits wiederum eine Bestätigung in dem Zahlenwert zu erhalten, den die 9jährigen Beobachtungen Schröters ergaben. Letzterer glaubte sogar außer leichten Schattierungen der Venusoberfläche in der Nähe des

Südhorns des Planeten Bergschatten wahrgenommen zu haben, aus deren wiederholtem Erscheinen sich eine Umdrehungsperiode von $23^{\text{h}} 21^{\text{m}}$ ableiten ließ.

Es würde hier zu weit führen, wollte man auch die weiteren Versuche, für den Planeten Venus eine Rotationszeit zu ermitteln, ausführlicher mitteilen, so die scheinbare Bestätigung des Cassini-Schröterschen Resultates durch De Vico in Rom, daneben Beers und Mädlers sowie Vogels negatives Resultat. Schon die verschiedenen, z. T. stark abweichenden Achsenneigungen, die die verschiedenen Anhänger der Tagesperiode für die Venus finden, und die zwischen 75° und 53° schwanken, deuten darauf hin, daß die Beobachtungen nicht durchweg reell gewesen sein können. Erst recht unklar wurde die Frage nach der Venusrotation, als Schiaparelli in Mailand auf Grund einer im Winter 1877—1878 angestellten Beobachtungsreihe ähnlich wie bei Merkur auch bei der Venus für eine Gleichheit von Rotations- und Revolutionsperiode, d. h. für eine Umdrehung von 225 Tagen eintrat. Bestätigungen und Widersprüche folgten nun rasch aufeinander, und in dem Streit der Meinungen ist es äußerst schwierig, den Wert der Wahrnehmungen nach dem kritischen Urteil und dem guten Auge der Beobachter — zwei Dingen, die man durchaus nicht immer in einer Person vereinigt findet — richtig zu bewerten.

In neuerer Zeit hat man besonders nach Villigers Untersuchung der physiologischen, bei Erleuchtung heller Kugeln eintretenden Phänomene auf die rein visuelle, wenig Aussicht bietende Methode der Umdrehungsbestimmung bei der Venus fast ganz verzichtet und ein anderes direkteres Verfahren eingeschlagen, das trotz der vorläufigen Mißerfolge wenigstens für die Zukunft ein Ergebnis verspricht. Es wird später noch zu zeigen sein, wie man heute bei dem gewaltigen Sonnenball die veränderliche Umdrehungsperiode einer jeden Zone dadurch bestimmen kann, daß man von Punkten des östlichen und westlichen Sonnenrandes genau übereinanderliegende Spektren entwirft und die dabei beobachteten Lageänderungen der Fraunhoferschen Linien im Sinne des Doppler-Fizeauschen Prinzips verwertet. Diese Linienverschiebung kann ihrer

Anwendung des
Dopplerschen
Prinzips.

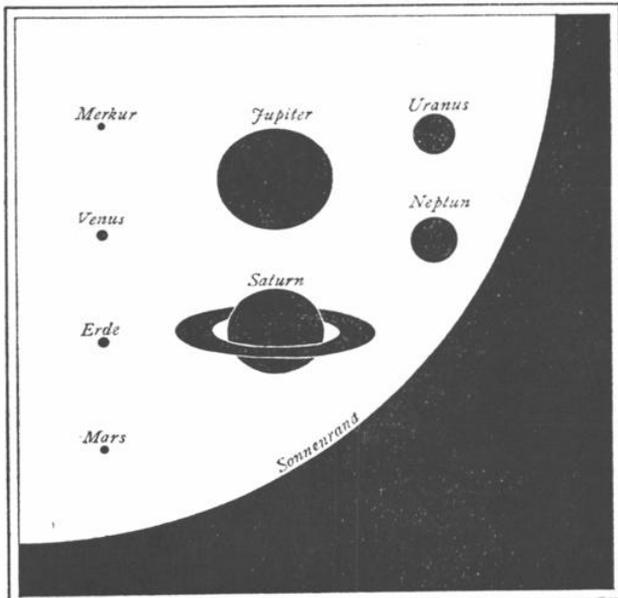


Fig. 17. Wahres Größenverhältnis der Planeten.

Größe nach gemessen und daraus unmittelbar die Bewegung der Lichtquelle in der Blickrichtung, also des einen Randes nach dem Beobachter zu, des anderen von diesem fort, berechnet werden. Die Venus wäre trotz der zu erwartenden äußerst geringen Verschiebungen für den gleichen Versuch wohl geeignet, könnte man auch hier stets mit zwei der Rotation nach entgegengesetzten Rändern und der Kenntnis der ungefähren Achsenlage rechnen, um äquatornahe, d. h. rasch bewegte Punkte des Planeten einstellen zu können. Nun ist aber der eine Rand des Planeten gerade in Erdnähe vollständig dunkel, und bezüglich der Achsenlage herrscht völlige Ungewißheit. Kein Wunder, daß die mit Hilfe des Dopplerprinzips erzielten Resultate, soweit sie überhaupt reell sind, sehr auseinandergehende Rotationswerte ergeben. Der russische Astronom Belopolski gelangte z. B. auf diesem Wege zu einer 12stündigen, Lowell gemeinsam mit Slipher zu einer 30tägigen Umdrehung, es sind also bei dem Planeten eigentlich sämtliche Möglichkeiten einer Rotationsdauer von wenigen Stunden bis zu einigen hundert Tagen erschöpft, ohne daß der Fachmann heute imstande wäre, für diese oder jene Vermutung entschieden einzutreten. Die bis dahin angestellten Versuche zeigen jedenfalls, welche Schwierigkeiten sich oft der Lösung von scheinbar einfachen wissenschaftlichen Problemen entgegenstellen. Daß gerade solche Jahrhunderte alten Versuche besonderes Interesse und Popularität genießen, lehrt die tägliche Erfahrung. Sie werden trotz der früheren Mißerfolge immer wieder aufgegriffen, und so wird man ohne Zweifel auch über die Venusrotation früher oder später auf irgendeinem Wege ein positives Urteil gewinnen, obwohl nicht zu verkennen ist, daß es sich dabei um eine der schwierigsten astronomischen Aufgaben handelt.

Nachweis einer
Atmosphäre.

Mit der von Schiaparelli befürworteten ewigen Nacht der einen und einem ebenso langen Tage der anderen Planetenhalbkugel nicht recht vereinbar ist das Vorhandensein einer dichten Atmosphäre auf der Venus. Schon der hohe Glanz des Planeten und das anscheinend vorübergehende Vorkommen von zarten Schattierungen auf seiner Oberfläche lassen auf eine dichte Wolkenhülle schließen. Ebenso ist auf Grund von spektroskopischen Beobachtungen das Vorhandensein einer der irdischen ähnlichen Lufthülle sehr wahrscheinlich gemacht. Daß eine Dunstschicht über der Venusoberfläche existiert, bedurfte allerdings kaum eines besonderen Beweises, nachdem man bei besonderen Gelegenheiten die Wirkung der atmosphärischen Absorption und Brechung bei unserem Nachbarplaneten unmittelbar beobachtet hatte. Um die Zeit der Sichel- und Viertelphasen läßt sich nämlich, besonders bei Tagesbeobachtungen, eine gewisse Abschattierung der Lichtgrenze gut erkennen, und das gleiche scheint bei den Rändern des Planeten der Fall zu sein. Steht der Planet gar als äußerst feine Sichel am Himmel, so ist zuweilen ein Übergreifen der Hörnerspitzen über die geometrische Lage hinaus, ja selbst ein vollständiges Zusammenschließen des Lichtsaumes zu einem vollständigen Ringe beobachtet worden, dessen Zustandekommen kaum anders als durch Lichtbrechung in der Venusatmosphäre zu erklären

ist. Auf dieselbe Ursache ist vielleicht auch die Wahrnehmung des vollen, dunklen Planetenumrisses bis zu 19 Minuten vor Beginn und nach Schluß der Venusdurchgänge vor der Sonnenscheibe zu schieben, wobei zu betonen ist, daß die Erscheinung hier mehrfach, dagegen nie bei den viel häufiger stattfindenden Vorübergängen des Merkur beobachtet wurde.

In das Kapitel der Dämmerungsphänomene ist vielleicht auch eine ebenso oft bestrittene wie behauptete Erscheinung zu verweisen, die in einem schwachen Leuchten der Nachtseite der Venus besteht und einen ähnlichen Effekt hervorruft, wie bei unserem Monde das Erdlicht vor und nach der Neumondphase. Da Venus, wie wir heute wissen, einen Satelliten nicht besitzt, so muß der Grund des Phänomens im Planeten selbst zu suchen sein, falls es sich nicht überhaupt um eine rein subjektive Wahrnehmung handelt. Nach Messungen der Flächenhelligkeit des grauen Erdlichtes auf dem Monde läßt sich wohl ein Schluß auf eine recht hohe Albedo unseres Planeten ziehen, so daß vielleicht die Erde zur Erklärung der Erscheinung herangezogen werden könnte. In der Tat würde bei gleicher Albedo die Erde der Venus im günstigsten Falle etwa elfmal so hell erscheinen wie die Venus uns Erdbewohnern, doch ist es trotzdem sehr fraglich, ob diese Helligkeit genügt, um den Lichteffect, der sehr oft auch am Tage oder in der Dämmerung beobachtet wurde, zu erklären. Es fehlt auch hier nicht an Deutungen, die sich auf die Analogie mit irdischen Erscheinungen atmosphärischer Elektrizität stützen, jedoch vorläufig durchaus hypothetischen Charakter haben.

Schon ein flüchtiger Blick auf eine schematische Skizze der Planeten-Obere Planeten. bahnen zeigt, daß die physische Erforschung der sog. oberen Gruppe, also der Wandelsterne von Mars an aufwärts, wesentlich günstigere Beobachtungsbedingungen verspricht. Gerade umgekehrt wie bei den unteren Planeten umschließen diese Weltkörper die Erdbahn und erscheinen infolgedessen dann voll von der Sonne erleuchtet, wenn sie der Erde am nächsten, d. h. in der Opposition stehen. In der Nähe der Konjunktionen mit der Sonne sind die Beobachtungsbedingungen wesentlich ungünstiger, doch spielt der Unterschied lediglich bei Mars eine größere Rolle. Von Jupiter an haben wir es bereits mit so gewaltigen Entfernungen zu tun, daß der zwischen dem größten und geringsten Abstand des Planeten bestehende Unterschied von einem Erdbahndurchmesser keine nennenswerte Rolle in den Sichtbarkeitsbedingungen mehr spielt. Aus Jupiterferne und erst recht aus Saturnferne betrachtet, erscheint die Erde lediglich als ein naher Trabant der Sonne, und umgekehrt wäre es für die Beobachtung aller oberen Planeten von Jupiter aufwärts ziemlich gleichgültig, ob wir unseren Standpunkt behalten oder ihn von der Erde auf die Sonne verlegen würden. Damit kommt bei diesen fernen Welten wenigstens der Phasenwechsel, der bei den unteren Planeten so störend auftritt, in Fortfall.

Bei unserem oberen Nachbargestirn im Sonnensystem, dem Planeten Mars. Mars, spielen allerdings die Entfernungsverhältnisse gegenüber der Erde noch eine so große Rolle, daß er bald durch seinen außerordentlichen Glanz die Augen auf sich lenkt, bald unter den schwächeren Vertretern der Sterne

erster Größe ein unscheinbares Dasein führt. Das Licht, das er uns in günstigen Oppositionen zusendet, übertrifft dabei die geringste Helligkeit um mehr als das 60fache. Die dem Planeten um die Zeit des größten Glanzes gewidmete Aufmerksamkeit ist z. T. auch auf seine eigentümliche gelbrote Färbung zurückzuführen, die unter den Planeten einzig dasteht. Nicht mit Unrecht wird er schon im Sanskrit mit einer glühenden Kohle verglichen. Die Albedo des Mars ist verhältnismäßig gering, denn seine Oberfläche vermag nur 0,22 des auf sie auffallenden Sonnenlichtes zurückzustrahlen. Die Venus mit ihrem mehr als dreifachen Albedowert und einer viermal größeren Oberfläche würde, an die Stelle des Mars gesetzt, wie ein kleiner Mond an unserem Nachthimmel strahlen. Der starke Lichtwechsel, dem Mars während seines vollen Umlaufes unterliegt, beschäftigte schon im Altertum die Gemüter, doch gelang der vorkopernikanischen Zeit hier ebensowenig eine Lösung, wie bei dem Versuch einer Deutung der verwickelten Bewegungsverhältnisse des Planeten.

Die Messungen im Fernrohr haben ergeben, daß Mars eine sehr wenig oder gar nicht abgeplattete Kugel von 6780 km Durchmesser bildet, die in 687,0 Tagen die Sonne umkreist. Die mittlere Entfernung von der Sonne beträgt dabei 228 Millionen km, so daß unter Berücksichtigung des Erdbahnradius von 150 Millionen km der Mars während der Konjunktion im Mittel 380 Millionen km, während der Opposition 80 Millionen km von uns entfernt ist. Wegen der Exzentrizität der Marsbahn können diese Mittelwerte bis zu 400 Millionen km ansteigen bzw. bis zu 55 Millionen km abnehmen. Im letzteren Falle erhält man eine sog. Perihelopposition, wie sie sich bei Mars in Zwischenzeiten von durchschnittlich 15 Jahren wiederholen. Diese „großen“ Oppositionen waren es auch, die bisher die meisten Aufschlüsse über die physische Beschaffenheit des Planeten ergeben haben. Im übrigen folgen die Oppositionen regelmäßig in Zwischenzeiten von 2 Jahren und 49 Tagen aufeinander und bieten dann 3—4 Monate hindurch zu physischen Beobachtungen reichliche Gelegenheit. Die Masse des Mars beträgt 0,11 der Erdmasse, woraus hervorgeht, daß sich aus der Erde neun Kugeln von der gleichen Dichte wie Mars gestalten ließen. Dem Rauminhalt nach würde man, wie das aus der Größe des Durchmessers folgt, fast 7 Marswelten aus der Erde formen können. Da der Quotient aus Masse durch Volumen der Dichte entspricht, so folgt aus den Zahlenwerten für Mars nur 0,7 der Erddichte.

Bestimmung der
Rotationszeit.

Wenn auch nähere Aufzeichnungen darüber fehlen, so unterliegt es doch kaum einem Zweifel, daß der rote, von jeher das Interesse der Beobachter erregende Planet zu den ersten im Fernrohr eingestellten Himmelsobjekten zählte. Diese Beobachtungen mögen allerdings wenig ermutigend gewesen sein. Sie konnten kaum mehr feststellen, als daß der Planet im Fernrohr eine Scheibe von merklich wechselndem Durchmesser darbot, die von Zeit zu Zeit, entsprechend der räumlichen Stellung, eine schwache, kaum bis zu $\frac{1}{10}$ des Durchmessers reichende Lichtphase zeigte. Einzelheiten auf

seiner Oberfläche wurden zwar bereits zwischen 1636 und 1660 von Fontana, Zucchi, Bartoldi, Huygens und anderen wahrgenommen, man bemerkte wohl auch, daß diese Flecken ihre Stellung zu der Planetenbegrenzung änderten, doch war es erst J. D. Cassini vorbehalten, für die Umdrehungszeit des Mars einen sicheren Wert abzuleiten. Diese Rotationszeit, die Cassini zu rund $24^h 40^m$ bestimmte, blieb $1\frac{1}{3}$ Jahrhunderte hindurch die einzige wesentliche Errungenschaft der Marsforschung. Einen genaueren Zahlenwert für die Umdrehung sowie eine erste Karte des Planeten lieferten erst um das Jahr 1830 die fleißigen Beobachtungen von Beer und Mädler, denen überhaupt auf dem

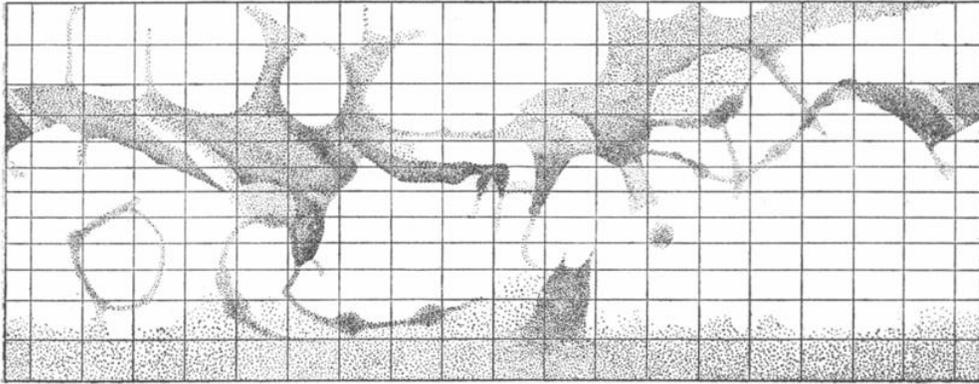


Fig. 18. Übersichtskarte der wichtigsten Umriss der Marsoberfläche (1907–1911).

Gebiete wissenschaftlicher Planetenforschung ein besonderes Verdienst zukommt. Heutzutage ist die Umdrehungszeit des Mars, $24^h 37^m 22,6^s$, bis auf kleine Bruchteile einer Sekunde gesichert, und die wichtigeren Oberflächen-einzelheiten sind auf Grund von Zeichnungen und Messungen genau in Karten festgelegt (Fig. 18).

Neben der Umdrehung des Planeten, deren Periode so auffällig mit dem irdischen Tage übereinstimmt, ist ohne Frage auch die Achsenneigung gegen die Marsbahn, also der Wert, der unserer Schiefe der Ekliptik entspricht und die Verteilung der Jahreszeiten auf einem Weltkörper bestimmt, von Interesse. Nun ist die Richtung der Marsachse nicht nur durch die Fleckenbewegung, sondern auch durch eine weitere Eigentümlichkeit des Mars gekennzeichnet, die ihm im Fernrohr auf den ersten Blick eine große Erdähnlichkeit verleiht: an seinem Nordpol und Südpol bemerkt man je eine weiße Kappe, die bereits Huygens, Maraldi und Cassini aufgefallen war und schon damals mit den Schnee- und Eisgebieten der irdischen Pole verglichen wurde. Die Polflecke zeigen eine wechselnde Ausdehnung, sind auch nicht immer gleichzeitig zu beobachten, denn bei den Periheloppositionen kehrt uns Mars ein wenig den Südpol, bei seinen Apheloppositionen den Nordpol zu. Erst Herschels aufmerksamen Beobachtungen gelang es, diesem Wechsel eine kosmische Deutung zu geben und gleichzeitig den Nachweis zu liefern, daß die Ausdehnung der weißen Marsflecke mit den Jahreszeiten des Planeten zusammenhängt, derart, daß sie bei höherem Sonnenstande zusammen-

Die weißen
Polflecke.

schmelzen, bei niederem sich weiter ausbreiten. Diese Tatsache, in Verbindung mit dem Wert der Schiefe der Marseklptik, den Herschel zu rund 24° fand und der auch heute noch kaum verbesserungsbedürftig ist, sowie die dem Erdentage nahe gleiche Rotationsdauer führten Herschel zu der Ansicht, daß die Marsbewohner, falls es solche gibt, „sich wahrscheinlich einer in vieler Hinsicht ähnlichen Situation wie wir erfreuen.“ Diese Feststellung hat fortan dem Planeten Mars unter allen seinen Geschwistern im Sonnensystem ein besonderes Interesse in physischer Beziehung gesichert.

Deutung der
gelben und
grauen Gebiete.

Waren die weißen, von den Jahreszeiten des Planeten abhängigen Polkappen des Mars kaum anders als im Sinne der irdischen Eisgebiete an den Polen zu deuten, so gestaltete sich die Erklärung der gelben und grauen Flecke der Planetenscheibe weniger einwandfrei. Wir müßten ja mit allen unseren Erfahrungen und Vorstellungen nicht an die Erde gebunden sein, wenn wir nicht eine zweifache Farbentrennung einer Planetenoberfläche in erster Linie als eine Trennung von Land und Wasser auffassen sollten. Solange man die Umrisse dieser Flecken auf Mars genauer erkannt und sie kartographisch festgelegt hat, haben sich die meisten Beobachter dafür ausgesprochen, daß die grauen Gebiete Wasser, die helleren bräunlichen Flecken feste Kontinente darstellen könnten. Da sich über den Anblick der Umrisse der Erdoberfläche für einen im Weltraum befindlichen Beobachter nur Vermutungen anstellen lassen, so kann die genannte Deutung der Marsflecken lediglich den Wert einer Hypothese haben, über deren Berechtigung sich sehr wohl streiten läßt. Wenn wir also heute auf einer Marskarte Bezeichnungen wie Mare Tyrrhenum, Mare Sirenum, Mare Australe, eine Syrtis Major usw., oder „Landgebiete“ wie Aeria, Elysium, Deucalionis Regio und andere vorfinden, so darf nicht übersehen werden, daß diese Namen sich später möglicherweise als unzutreffend, wenn nicht als ebenso absurd erweisen können wie die Nomenklatur des Mondes, die auf dem luft- und wasserlosen längst erstarrten Antlitz unseres Begleiters noch „Meere“ und „Sümpfe“ kennt.

Die heute allgemein gebräuchliche Bezeichnung der Marsformationen, von der soeben einige Beispiele genannt wurden, ist auf den italienischen Astronomen Schiaparelli zurückzuführen, dessen Name im Zusammenhange mit der Erforschung von Merkur und Venus bereits erwähnt wurde. Einem vorzüglichen Auge und einem ebensolchen Fernrohr hatte er es zu verdanken, daß schon seine ersten, im Jahre 1877 angestellten Beobachtungen der Marsoberfläche in bezug auf Reichhaltigkeit der Einzelheiten die hervorragendsten Leistungen aller Vorgänger weit in den Schatten stellten. Auf den Übersichtskarten, auf denen Schiaparelli von dem genannten Jahre an von Opposition zu Opposition die Oberfläche des Planeten mit stetiger Vervollkommnung festgelegt hat, erkennt man zunächst fast alle deutlicheren Angaben der älteren Beobachter wieder. An der Beständigkeit der Grundumrisse der Planetenoberfläche war somit kein weiterer Zweifel mehr möglich. An dieses grobe, durch die Bemühungen von zwei Jahrhunderten gewonnene Um-

rißbild schloß sich jetzt Schiaparellis Detailarbeit an. Jedes kleinste Fleckchen, jede Schattierung wurde sorgfältig verfolgt und, wenn es möglich war, auch mikrometrisch ausgemessen.

Durch eine seltsame Entdeckung erhielten die Schiaparellischen Karten bald eine besondere Bedeutung. Die gelben, hier und da ins Bräunliche spielenden Gebiete, die man bis dahin für Länder und Inseln ansah, erwiesen sich bei günstigsten Luftverhältnissen von grauen Linien durchquert. Was lag näher, als diese Linien für Wasserstraßen anzusehen, die in Gestalt eines weit-

Die sogenannten
Marskanäle.

verzweigten Netzes die Kontinente unserer interessanten Nachbarwelt durchsetzten? Jetzt schien tatsächlich jeder Zweifel an erdähnlichen Daseinsbedingungen auf einem Planeten beseitigt. Sosehr sich die Astronomen auch dagegen wehren mochten, der Planet Mars war mit Schiaparellis Entdeckungen für die nächsten Jahrzehnte jeder Spekulation ausgeliefert. Da vollzieht ein Erdenstern in unserer nächsten Nähe seine Bahn um die Sonne. Sein Tag und seine Nacht, die Lage seiner Jahreszeitenzonen, also die Hauptbedingungen der gegenwärtigen



Fig. 19. Skizze des Mars mit der großen Syrte am 16. Dez. 1911.

Entwicklungsform der Erde, stimmen mit dieser fast vollständig überein. Die Pole dieses merkwürdigen Planeten sind mit einer Eis- oder Schneedecke überzogen, die sich bei höherem Sonnenstande ganz oder teilweise zurückzieht; wir sehen Festländer und Meere, auch Inseln und anscheinend nur zeitweise vom nassen Element überflutete Gebiete. Wenn nun gar von einem der erfolgreichsten und universellsten Himmelsforscher noch Wasseradern festgestellt werden, die geradlinig die Länder durchziehen — wer wollte wohl den Mut finden, gegen die logische Laienfolgerung ernstlich zu Felde zu ziehen, die einen so gestalteten Weltkörper mit vernunftbegabten Geschöpfen bevölkert sehen möchte und von den berufenen Vertretern der Wissenschaft eine entsprechende Entscheidung verlangt?

Es wäre ein müßiges Beginnen, wollte man hier alle Enttäuschungen schildern, die die letzten großen Oppositionen in bezug auf die Bewohnbarkeitsfrage des Mars gebracht haben. Inmitten des Streites vergaß man, daß die von Schiaparelli beobachteten Linien nur wie ein leichter Hauch die Marsoberfläche überlagern und daher kaum anders als in schematischer Form darzustellen sind; man übersah, daß gerade die größten Fernrohre von den Rätseln der Marskanäle sehr wenig erkennen ließen, wohl der beste Beweis dafür,

Neuere
Ansichten über
die „Kanäle“.

wie subjektiv unsere Auffassungen werden, wenn die Empfindung einmal hart an der Grenze der Sinneswahrnehmung liegt.

Wie bei jedem interessanten Ergebnis, das nicht einwandfrei feststeht, hat die Schiaparellische Auffassung der Struktur des Marsantlitzes einerseits kategorische Bestätigung, andererseits energischen Widerspruch erfahren, und die Zweifel sind trotz der ernsten Arbeit, die in den letzten zwei Jahrzehnten in der Erforschung der Marsoberfläche geleistet wurde, auch heute noch nicht vollständig geklärt. Unter den Verfechtern eines geometrischen, auf vernunftbegabte Wesen zurückzuführenden Oberflächenbildes unseres Planeten begegnen wir an erster Stelle dem Amerikaner Lowell, der speziell für die Marsforschung ein Höhenobservatorium in den Anden errichtet und mit seinen Mitarbeitern auch auf anderen Gebieten der Himmelskunde wertvolle Resultate erzielt hat. Die schematische Darstellung des Kanalnetzes hat Lowell von allen Beobachtern wohl am weitesten getrieben. Geradlinige Striche, kreisrunde Flecke, scharfe geometrische Begrenzungslinien der Kontinente und Inseln bilden das charakteristische Merkmal seiner Marskarten, die von Amerika aus ihre Runde durch die Welt gemacht haben. In dieser Auffassung wird bei uns niemand, der den Mars auch nur einmal bei günstigen Luftverhältnissen im Fernrohr gesehen hat, dem amerikanischen Astronomen folgen können. Mit Recht ist darauf hingewiesen worden, daß der wissenschaftliche Wert dieser Skizzen, die das wirklich Gesehene verschleiern und den Laien vollkommen irreführen, sehr gering sei. Gerade bei einer so schwierigen zeichnerischen Aufgabe, wie sie die Marsoberfläche dem Beobachter bietet, kann lediglich die gewissenhafteste Wiedergabe der gesehenen Einzelheiten unter richtiger Einschätzung des Erreichbaren unsere Anschauungen über die Oberfläche einer fremden Welt fördern. Die von Antoniadi am großen Refraktor in Meudon bei Paris während der Oppositionen 1909 und 1911 mit seltenem Geschick hergestellten Abbildungen des Mars kommen anscheinend dem erstrebten Ziel sehr nahe, und es ist heute kaum noch zu zweifeln, daß die komplizierten Marsphänomene schließlich auch ohne Zurückgreifen auf höhere Lebensformen eine sehr natürliche Deutung zulassen werden. Die wichtigsten Umriss der Schiaparellischen und auch der Lowellschen Karten bleiben demnach als reelle Gebilde bestehen, nur an Stelle der scharfen Linien und Streifen tritt eine differentielle Auflösung in dunkle Flecken und Bänder von z. T. sehr unregelmäßigen Umrissen. Gerade die größten und besten Instrumente der Gegenwart sprechen in ihren Ergebnissen für die von Antoniadi vertretene Auffassung. Es gibt ja auch in der Mikroskopie, die sonst unter wesentlich günstigeren Bedingungen arbeitet wie das Fernrohr, Objekte, wie z. B. einzelne zur Prüfung der Auflösungskraft der Objektive gebrauchte Diatomeen, die, je nach der Vollkommenheit der benutzten Optik, eine vollständig verschiedene Struktur zeigen. Es ist wohl bei diesen Beobachtungen statthaft, daran zu zweifeln, ob schließlich die mit den besten optischen Systemen erhaltene Auffassung der wahren Struktur dieser Gebilde entspricht, es wird aber wohl niemand einfallen, ein mit geringerer Optik er-

haltenes Bild als das der Wahrheit näherkommende anzusehen. Von dem gleichen Gesichtspunkte aus betrachtet kann die ganze „Kanalhypothese“ der Marsoberfläche heute bereits als erledigt gelten.

Wohl den besten Beweis für ein durchaus natürliches, wenngleich in seinem inneren Zusammenhange noch durchaus ungeklärtes Aussehen des Marsantlitzes hat übrigens Lowell selbst durch die photographischen Aufnahmen des Planeten geliefert. Diese Photographien, die nach außerordentlich mühseligen, langjährigen Versuchen schließlich erzielt worden sind, stellen kleine Meisterwerke der photographischen Kunst dar und erreichen, nach den letzten Proben zu schließen, in bezug auf Einzelheiten bereits nahezu die Ergebnisse direkter visueller Beobachtungen an den besten Instrumenten der Neuzeit. Letzthin haben auch Hale auf dem Mount Wilson und Barnard auf der Yerkes-Sternwarte bei Chicago hervorragende Resultate in der Marsphotographie erzielt, so daß zur Lösung der alten Zweifel jetzt auch die photographische Natururkunde herangezogen werden kann. Diese Photographien zeigen trotz der gegenteiligen Behauptungen Lowells nicht die geringste Spur einer regelmäßigen Struktur auf dem Mars, sind auch dazu außerstande, da auf den kleinen, nur wenige Millimeter fassenden Negativen schon das Plattenkorn so feine Einzelheiten wie die hypothetischen Kanäle völlig verdecken würde.

Photographische
Aufnahmen des
Mars.

Zum Leben auf unserer Erde gehört in erster Linie Luft und Wasser, und da nun einmal Mars derjenige Planet unseres Sonnensystems ist, der die größte Erdähnlichkeit aufweist, so muß vor allem über das Vorkommen dieser Lebensbedingungen auf seiner Oberfläche Klarheit herrschen, bevor man sich an irgendeine Spekulation heranwagt.

Das Vorhandensein einer Atmosphäre wird allerdings schon durch die geringere Schärfe der Lichtgrenze, durch zeitweilige Trübungen der Details, schließlich durch das Auftreten vorübergehender glänzender Flecke von weißlicher oder gelber Färbung bewiesen, die kaum etwas anderes als Wolken sein können. Die zuweilen beobachteten, nie besonders auffälligen Ausbuchtungen an der Lichtgrenze sind wahrscheinlich nicht auf Bodenerhebungen, sondern gleichfalls auf Wolkengebilde zurückzuführen. Damit, sowie durch die weißen Polflecke wäre auch ein nicht unbeträchtlicher Feuchtigkeitsgehalt der Marsatmosphäre nachgewiesen. Direkte Beweise für das Vorkommen von größeren Wassergebieten in Gestalt unserer Meere besitzen wir natürlich nicht, denn die grauen Flecke lassen auch jede andere Deutung zu und sind auch tatsächlich wiederholt als Vegetationsgebiete angesprochen worden. Aus den zahlreichen mühevollen Versuchen, die Marsluft spektroskopisch einwandfrei festzustellen oder sie gar zu analysieren, kann man nur folgern, daß die Marsatmosphäre erheblich dünner ist als die unsrige, in ihrer Zusammensetzung dagegen dieser gegenüber vielleicht kaum wesentliche Unterschiede aufweist. Genau ebenso, wie es äußerst voreilig war, den Planeten Mars mit Vertretern einer höheren Kultur zu bevölkern, ebenso unwissenschaftlich wäre es daher, wenigstens die Möglichkeit von erdähnlichen Lebensbedingungen auf dem Pla-

Atmosphäre.

neten zu leugnen. Damit müssen wir uns aber vorläufig begnügen, wenn wir den festen Boden wissenschaftlicher Ergebnisse nicht verlassen wollen. Eine Umschau in früheren Erdformationen gibt durch die stets dominierende Stellung des flüssigen Elements, durch die Eisfreiheit der Pole u. a. m. für die Oberfläche des Mars keine besseren Vergleichsobjekte wie die gegenwärtige Entwicklungsperiode unseres Planeten, und die zukünftige Gestaltung der Erde vermag auch die kühnste Phantasie nicht vorauszusagen.

Die kleinen
Planeten
zwischen Mars
und Jupiter.

Die Entfernung, die uns von der nächsten großen Schwesterwelt im Sonnensystem trennt, ist bereits so groß, daß man von vornherein jede Fernrohrbeobachtung in diesem Abstände aufgeben könnte, würde es sich auch hier lediglich um eine Welt von der Größenordnung der Erde oder gar des Mars handeln. Glücklicherweise wird aber von Jupiter aufwärts der Abstand der Planeten durch ihre gewaltigen Dimensionen zum Teil ausgeglichen. Abgesehen von der rein formellen Trennung der Planeten in untere und obere ist somit noch eine weitere Scheidung nach kosmogonischen Gesichtspunkten in eine Gruppe von kleineren Wandelsternen, unter denen die Erde, und eine Gruppe von wesentlich größeren, in der Jupiter durch seine gewaltige Größe dominiert, notwendig. Diese beiden Gruppen werden auch als innere und äußere Planeten unterschieden, eine Trennung, die noch nahe 200 Jahre nach Entdeckung des Fernrohrs auch in einer deutlichen räumlichen Lücke zwischen beiden zu bestehen schien. Heute wissen wir, daß dieser weite, vielumstrittene Raum zwischen Mars und Jupiter von einer großen Schar kleiner Welten bevölkert ist, deren bisher festgestellte Zahl sich bereits dem ersten Tausend nähert. In bezug auf seine Bewegung ist der kleinste dieser Planeten dem größten Riesenkörper im Sonnensystem vollständig ebenbürtig, denn für die kosmische Umlaufbewegung ist es in gewissem Grade gleichgültig, welche Quantität von Materie in einem Planeten vereinigt ist.

Während die kleinen Planeten, wie wir im vorigen Kapitel sahen, in der kosmischen Bewegungs- und Störungstheorie durch die Fülle von Beispielen, die sie liefern, eine sehr wichtige Rolle spielen, kommen sie für irgendeine nennenswerte physische Beobachtung kaum in Frage. Denn wegen ihres geringen Durchmessers erscheinen die meisten derselben auch in den größten Fernrohren fast punktförmig, so daß auf ihrer Oberfläche durchaus keine Einzelheiten wahrgenommen werden können; spektroskopische Beobachtungen, die auch kaum irgendein wichtiges Resultat erwarten lassen würden, sind wegen der Lichtschwäche dieser kleinen Planeten ausgeschlossen, und so bleibt als einziges astrophysikalisches Hilfsmittel nur die Photometrie, die Helligkeitsmessung übrig, die immerhin einige wertvolle Resultate ergeben hat. Die beobachtete Helligkeit ist natürlich nicht konstant, sondern hängt von der wechselnden Entfernung des Planeten von Sonne und Erde und von der Phase der Beleuchtung ab. Der Einfluß der Phase macht sich durch Helligkeitsänderungen, die mitunter bis zu einer vollen Größenklasse gehen, bemerkbar. Einige Asteroiden zeigen auch geringe Helligkeitsschwankungen nach Art der veränderlichen Sterne. Diese Erscheinung wurde zuerst bei

Eros nachgewiesen, dessen Lichtwechsel im Winter 1900—1901 eicht zu erkennen war und vom Minimum zum Maximum gerechnet etwa $2\frac{1}{2}$ Stunden in Anspruch nahm. Später zeigte sich die Veränderlichkeit entweder gar nicht oder nur undeutlich. Derartige periodische Lichtänderungen würden sich bei genügender Beständigkeit durch eine Achsendrehung der Planeten einfach erklären lassen.

Atmosphären scheinen diese Körper nicht zu besitzen. Ihr Vermögen, Licht zu reflektieren, wird daher nur von der Beschaffenheit der Oberfläche und der stofflichen Zusammensetzung der äußersten Schicht abhängen. Wenn nun auch gewiß nicht alle Asteroiden denselben Bruchteil des sie treffenden Lichtes wieder aussenden, d. h. nicht dieselbe Albedo besitzen, so scheinen doch die photometrischen Messungen bei verschiedenen Phasenwinkeln die Annahme zu rechtfertigen, daß die Albedo der Asteroiden im allgemeinen innerhalb enger Grenzen liegt, die ungefähr der Albedo des Merkur (0,14) und der des Mars (0,22) entsprechen.

Wird die Albedo eines Asteroiden von bekannter Bahn als gegeben betrachtet, so läßt sich aus der Oppositionshelligkeit der scheinbare und wahre Durchmesser des Körpers berechnen. So bestimmte G. Müller (Potsdam) aus seinen photometrischen Messungen unter der Annahme der Albedo 0,22 die folgenden Durchmesser:

Planet	Nach Müller, für Albedo 0,22		Nach Barnards mikrometrischen Messungen	
	scheinbarer Durchmesser in mittlerer Entfernung	wahrer Durchmesser	wahrer Durchmesser	Albedo
Ceres.	0,38"	758 km	768 km	0,22
Pallas	0,28	564 "	489 "	0,24
Vesta.	0,44	754 "	385 "	0,31
Juno	—	—	193 "	—
Eunomia	0,14	274 "	—	—
Lutetia	0,08	226 "	—	—
Daphne.	0,06	114 "	—	—

Direkte Bestimmungen des Durchmessers dieser kleinen Planetenscheibchen sind nur mit den allerbesten Hilfsmitteln möglich gewesen. So hat Barnard mit den großen Refraktoren der Lick- und der Yerkes-Sternwarte die in der Tabelle aufgeführten Durchmesser der vier größten Planetoiden gemessen, aus deren Vergleichung mit den photometrisch abgeleiteten Dimensionen hervorgeht, daß die Fehler der Albedoannahme sehr stark in das Endergebnis eingehen. Bei der Unsicherheit der direkt wie indirekt erhaltenen Dimensionen können die Zahlenwerte der Tabelle kaum mehr als eine ungefähre Vorstellung von der Größe der bedeutenderen kleinen Planeten vermitteln. Die große Mehrheit der Asteroiden hat Durchmesser, die weit unter 100 km liegen, und ihre Gesamtmasse ist so gering, daß sie zusammen genommen noch nicht den dritten Teil einer Weltkugel von den Dimensionen des Merkur ergeben würden.

Jupiter.

In nächster Nachbarschaft dieser winzigen Himmelskörper kreist um die Sonne das bei weitem bedeutendste Mitglied unserer Planetenfamilie, der Planet Jupiter. An Helligkeit wird er von Venus trotz seines mehr als siebenmal größeren Sonnenabstandes im Durchschnitt nur etwa um eine Größenklasse übertroffen, doch wird der geringe Unterschied durch seine Sichtbarkeit in dunkler Nacht fast vollkommen wett gemacht. Nur wenn beide Planeten einmal nebeneinander am Abend- oder Morgenhimmel zu finden sind, wird man auf den Unterschied des Glanzes aufmerksam.

Der Abstand des Jupiter von der Sonne beträgt im Mittel 778 Millionen km, und 11 Jahre 315 Tage verfließen, ehe er den weiten Weg um das Tagesgestirn vollendet hat. Alle 13 Monate 8 Tage gelangt er in Opposition zur Erde und kann, einmal aufgefunden, von Jahr zu Jahr im nächstfolgenden Tierkreisbilde beobachtet werden. Sein Durchmesser beträgt 139 000 km, so daß sein Rauminhalt denjenigen der Erde um das 1360fache übertrifft (vgl. Fig. 17). Dafür ist seine Masse gegenüber der Größe relativ gering, denn nur 315 Erdkörper wären nötig, um diesem Riesen das Gleichgewicht zu halten. Dementsprechend ergibt sich die Dichte des Planeten zu 0,23 der Erddichte, d. h. die Verhältnisse im Sonnensystem würden fast ungeändert bleiben, wenn an Stelle des Jupiter ein Wasserball von gleichen Dimensionen seine Bahn um das Zentralgestirn vollzöge. Die vorhin genannte Zahl für den Durchmesser ist lediglich ein Mittelwert, denn schon ein kleines Fernrohr zeigt deutlich die sehr auffällige Abplattung des Planeten. Was bedeuten auch die 43 km Unterschied zwischen dem äquatorialen und polaren Durchmesser der Erde, wenn sich dieselben Größen beim Jupiter um 10 000 km unterscheiden!

Wolkengebilde.

Die Albedo des Jupiter beträgt 0,62, ist also recht beträchtlich. Schon daraus erkennt man, daß wahrscheinlich wenig von der eigentlichen Oberfläche zu sehen ist, sondern daß wir im wesentlichen das Sonnenlicht von einer stark reflektierenden Wolkenhülle zurückerhalten. Gegenüber dem Planeten Venus, bei dem diese Hülle vollständig detaillos erscheint, erkennt man indessen in der Wolkendecke des Jupiter eine deutlich ausgesprochene Struktur, die sich viel leichter beobachten und auch besser zeichnerisch darstellen läßt als z. B. die matten Schattierungen der Marsoberfläche. Hier haben wir endlich einen Planeten vor Augen, bei dem jede verkehrte Deutung der größeren Oberflächeneinzelheiten völlig ausgeschlossen erscheint. Schon die ersten Beobachter bemerkten, daß die Jupiterscheibe senkrecht zu der Rotationsachse dunkle und helle Streifen, gewissermaßen helle und dunkle Zonen zeigt. Man bemerkte auch, daß diese Streifen stets eine geradlinige Begrenzung zeigen, woraus sich ohne weiteres ergab, daß die Umdrehungsachse des Jupiter nahe senkrecht auf seiner Bahn stehen müsse. Die Unbequemlichkeiten, die durch die verschiedene Achsenneigung des Mars zur Erde und die damit verknüpfte fortwährende Änderung der Projektion seiner Oberflächenteile auftreten, fallen somit bei Jupiter gänzlich fort, und es lassen sich daher Veränderungen seiner Oberfläche mit viel größerer Sicherheit als solche erkennen. Seit der ersten

Anwendung des Fernrohrs auf Jupiter durch Galilei, Fontana und Zucchi sind die Streifenformen und ihre Änderungen das Hauptbeobachtungsobjekt auf dem Planeten geblieben. Es ist daher notwendig, auf die Hauptergebnisse dieser Beobachtungen kurz einzugehen.

Für gewöhnlich kann man nach einer allgemeinen Orientierung auf der Planetenscheibe eine auffallend helle Äquatorialzone (vgl. Fig. 20) unterscheiden, die nach Norden und nach Süden zu von einem dunklen bräunlichen Streifen begrenzt wird. Es ist wohl nie ernstlich daran gezweifelt worden, daß dieser helle Gürtel des Jupiter an der Stelle der größten Rotationsgeschwindigkeit eine dichte Wolkenzone darstellt, während nördlich und südlich davon der Blick offenbar tiefer in die atmosphärische Hülle des Planeten dringt. Daß es nicht die Oberfläche des Planeten selbst ist, die hier in bräunlicher Färbung durchschimmert, erkennt man sofort daran, daß innerhalb dieser dunklen Bänder noch zahllose Flecke und Streifen sich erkennen lassen, die starken Veränderungen unterliegen. Nur in einigen wenigen Fällen konnte eine längere, ganze Jahre hindurch anhaltende Beständigkeit einzelner Gebilde der Jupiteroberfläche festgestellt werden.

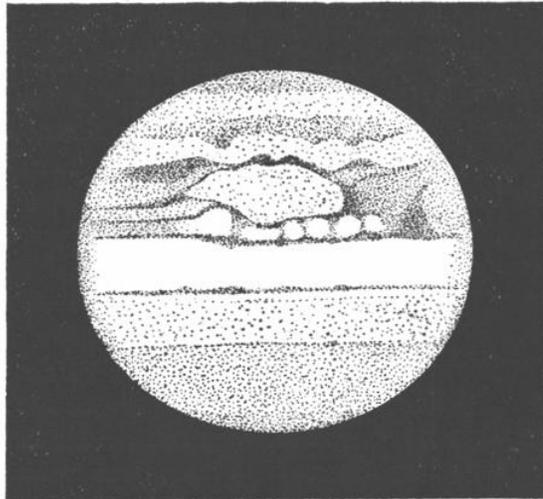


Fig. 20. Jupiter mit dem „roten Fleck“ am 27. April 1910.

Unter diesen Umständen erscheint ein besonderer Nachweis einer Atmosphäre bei Jupiter kaum erforderlich, läßt sich aber auf Grund direkter und spektroskopischer Beobachtungen leicht beibringen. Wie es bei dem Vorhandensein einer dichteren Gashülle nicht anders möglich ist, erscheint der Planet am Rande, d. h. dort, wo die Sonnenstrahlen den größten Weg durch die Atmosphäre zurücklegen müssen, wesentlich matter, ja in unmittelbarer Nähe des Randes werden Einzelheiten überhaupt nicht mehr sichtbar. Bei Einstellungen des Planeten am Tage oder in heller Dämmerung ist der Lichtabfall nach dem Rande zu besonders deutlich wahrnehmbar. Es ist dann auch nicht schwer zu erkennen, daß der der Sonne abgekehrte Rand matter ist als der entgegengesetzte — eine Wirkung der Phase, die bei den äußeren Planeten von Jupiter aufwärts kaum noch im Fernrohr bemerkbar ist. Das Spektrum des Jupiter zeigt unzweideutig eine Verstärkung der sog. tellurischen, d. h. der der Erdatmosphäre gehörenden Linien, daneben auch andere, insbesondere ein für alle äußeren Planeten charakteristisches dunkles Band im Rot, etwa mitten zwischen der roten Wasserstoff- und der gelben Natriumlinie. Es geht daraus hervor, daß die Atmosphäre des Jupiter im

wesentlichen der Erdatmosphäre gleicht, daneben aber noch mindestens ein unbekanntes Gas oder eine gasförmige Verbindung enthält, die unsere Luft-hülle nicht besitzt.

Veränderliche
Achsen-
umdrehung.

Die in besseren Fernrohren bei guter Luft eine Fülle von Einzelheiten aufweisenden äquatorialen Schattierungen des Jupiter ermöglichten sehr bald eine Feststellung der Rotationszeit des Planeten. Selbstverständlich ist eine solche Umdrehungsbestimmung aus Wolkengebilden bei weitem nicht so sicher wie die gleichartigen Beobachtungen bei Mars, doch wird im vorliegenden Falle die Ungenauigkeit der Beobachtung durch die sehr rasche, etwa 10stündige Umdrehungsperiode wieder ausgeglichen. Vergleicht man nun die auf Grund der sorgfältigsten Schätzungen und Messungen bis jetzt erzielten Ergebnisse untereinander, so erscheinen die Zahlenwerte zunächst absolut unvereinbar, sie ergeben nämlich für Jupiter nicht einen einzigen, sondern eine ganze Reihe von stark abweichenden Rotationswerten, je nach dem Winkelabstande der beobachteten Flecken vom Jupiteräquator. Während sich z. B. für die Zonen nördlich und südlich von etwa 11° Planetenbreite eine Umdrehung von rund $9^{\text{h}} 55^{\text{m}}$ lediglich mit Abweichungen von einigen Sekunden ergab, zeigte das helle und 20° breite äquatoriale Gebiet gegen diese Umdrehung ein starkes Vorseilen, denn die hier sichtbaren Wolkengebilde erreichen schon nach $9^{\text{h}} 50^{\text{m}}$ die Mitte der Scheibe wieder. Besonders merkwürdig ist es nun, daß die in den obigen Zahlen ausgedrückte Symmetrie in der Rotation der nördlichen und südlichen Halbkugel durch eine von Williams und Denning festgestellte Zone noch rascherer Bewegung gestört wird. Diese Zone liegt zwischen den nördlichen Jupiterbreiten 24° und 28° und hat eine Rotationszeit von etwas weniger als $9^{\text{h}} 49^{\text{m}}$. Dieses zonenweise Aneinandergrenzen von Strichen rascher und langsamer Umdrehung, ohne eigentliche Übergänge, stellt eine große Merkwürdigkeit des Jupiter dar. Man hat den Versuch gemacht, die Erscheinung mit den Passat- und Gegenpassatströmungen der äquatorialen Erdgebiete zu vergleichen, unter der Annahme, daß in den rasch bewegten Zonen der Jupiteratmosphäre ein absteigender Luftstrom eine höhere Geschwindigkeit in die tieferen Gebiete mitbringt und daher den hier befindlichen Wolkengebilden ständig vorseilt. Es bleibt heute tatsächlich kaum eine andere Erklärung für die Rotationsanomalien des Jupiter übrig, nur ist die Ursache der erwähnten Strömungen vielleicht nicht nur in der Wärmestrahlung der Sonne, sondern auch im Planeten selbst zu suchen. Eine gewisse Analogie in bezug auf die veränderliche Rotation zeigt ja auch die Sonne, nur besteht ein wesentlicher Unterschied darin, daß bei der Sonnenphotosphäre die Abnahme der Winkelgeschwindigkeit nach den Polen ziemlich stetig erfolgt, während bei Jupiter sich geradezu Sprünge bemerkbar machen, deren Überbrückung durch Nachweis vermittelnder Zonen bisher noch nicht gelungen ist. Daß ein fester oder auch nur ein flüssiger Planetenkern an einer so verschiedenartigen Rotation mitbeteiligt sein könnte, erscheint von vorneherein ausgeschlossen, und es fehlt daher nicht an Stimmen, die für den ganzen Jupiterball einen gasförmigen Zustand annehmen möch-

ten. Wahrscheinlicher ist es wohl, daß inmitten der gewaltigen Gashülle, die uns im Fernrohr als Begrenzung des Jupiter erscheint, sich bereits ein richtiger Planet mit dunkler, aber noch nicht völlig erstarrter Oberfläche vorfindet, dem jedenfalls unsere Erde in der Entwicklung weit voraus sein dürfte.

Man hat wohl nicht mit Unrecht die gegen Ende der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts erfolgte Erscheinung eines großen rötlichen Flecks auf der Südhalbkugel des Planeten im Sinne einer Unstetigkeit im Erstarrungsprozeß des Jupiter gedeutet. Der „rote Fleck“ war jahrelang, selbst noch um die Jahrhundertwende ein sehr deutliches Gebilde und schon wegen seiner Farbe bemerkenswert. Die etwas veränderliche Ausdehnung ließ immerhin im Mittel auf ein Objekt von 30 000 km Länge und 15 000 km Breite schließen, also auf ein selbst für die Riesenwelt des Jupiter kein alltägliches Störungsgebiet. Schon auf den Zeichnungen von Cassini und Maraldi findet sich in gleicher Lage ein ähnlicher Fleck vor, es ist also durchaus möglich, daß es sich hier um eine periodische Erscheinung handelt. Gegenwärtig beginnt das inzwischen weißlich gewordene Gebilde allmählich zu verblassen, ist jedoch in seinen Umrisen (Fig. 20) noch deutlich erkennbar.

Roter Fleck.

Nach den sonstigen bei der Jupiterrotation gemachten Erfahrungen erscheint es nicht weiter verwunderlich, daß auch der rote Fleck eine veränderliche, und zwar eine unregelmäßig veränderliche Umlaufsbewegung gezeigt hat. Dieselbe schwankte zwischen $9^{\text{h}} 55^{\text{m}} 34^{\text{s}}$ und $9^{\text{h}} 55^{\text{m}} 42^{\text{s}}$, schloß sich also der langsamen Rotationsbewegung der umliegenden Zone an. Die Beobachtung, daß die ein wenig nördlich, also nach dem Jupiteräquator zu gelegenen Wolkenstreifen den Fleck umschlossen und auch gegenwärtig noch vor ihm gewissermaßen ausweichen, läßt den Gedanken an ein eigentliches Oberflächengebilde des Jupiter nicht aufkommen. Die Beständigkeit der Umrisse und in gewissem Sinne auch der Rotation des Flecks unter Berücksichtigung des geschilderten Verhaltens der benachbarten Wolkengebilde lassen immerhin darauf schließen, daß 1878 an einer Stelle der Planetenoberfläche eine Eruption, etwa ein Gasausbruch od. dgl., stattgefunden hat, bei dem die Dämpfe bis über die höchste Wolkenzone emporgetrieben wurden und für die Dauer der Erscheinung ein ziemlich stationäres Störungsgebiet über dem Eruptionsherd erzeugten. Gerade durch diese Beständigkeit des roten Flecks erscheint die Möglichkeit einer noch völlig gasförmigen oder auch flüssigen Zusammensetzung des Jupiterkerns sehr wenig wahrscheinlich.

Es läßt sich nicht leugnen, daß die Riesenwelt des Jupiter trotz ihrer klaren, deutlichen Details, die sie im Fernrohr dem Beschauer bietet, uns noch eine Fülle von Rätseln aufgibt, so daß sich ein einigermaßen abgeschlossenes Bild von dem Planeten kaum entwerfen läßt. Zweifellos führt uns Jupiter in die Uranfänge geologischer Formationen zurück, in denen vegetabilisches und animalisches Leben auf der Erde noch ausgeschlossen waren. Leider wird uns ein näherer Einblick in diese Entwicklung durch den dichten Schleier, den die Wolkenhülle über den Planeten breitet, unmöglich gemacht.

Saturn. Betrag der Abstand des Jupiter das 5fache der Entfernung der Erde von der Sonne, so müssen wir mit unseren Fernrohren schon den doppelten Raum überbrücken, wenn wir zu Saturn gelangen wollen. Nicht weniger als 1426 Millionen km trennen diese Welt von der Sonne, und $29\frac{1}{2}$ Jahre vergehen, bis wir den matten, schwach rötlichen Wandelstern an derselben Stelle des Tierkreises wiederfinden. Der Äquatorialdurchmesser des Saturn beträgt 118 000 km, der polare 106 000 km. Trotz der etwas geringeren Größe des Planeten beträgt der Unterschied 12 000 km, also noch mehr als bei Jupiter. Saturn ist somit die am stärksten abgeplattete Welt im Planetensystem. Noch durch eine andere Eigenschaft zeichnet er sich unter seinen Geschwistern im Sonnensystem aus, und zwar durch seine außerordentlich geringe Dichte, die den Wert von $0,13$ der Erddichte aufweist, somit nur etwa dem spezifischen Gewicht von Alkohol entspricht. Während also das Volumen des Saturn fast 680 Erden fassen würde, kämen ihm an Gewicht bereits 88 Kugeln von der Masse der Erde gleich.

Physische
Beschaffenheit
und Rotation.

Schon daraus sowie aus der hohen Albedo von $0,72$, die derjenigen der Venus nahekommt, läßt sich hier mit noch größerer Wahrscheinlichkeit wie bei Jupiter auf einen innerhalb einer undurchdringlichen Gas- und Wolkenhülle ständig verborgenen, vielleicht noch nicht völlig erkalteten Planetenkern schließen. Das Spektroskop gibt von Saturn im wesentlichen eine Kopie des Jupiterspektrums wieder, mit dem einzigen Unterschied, daß eine ganze Reihe von Linien, insbesondere das dunkle Band im roten Spektralgebiet, hier noch kräftiger hervortritt.

Im Fernrohr bilden parallel zum Äquator verlaufende Streifen wieder ein charakteristisches Merkmal der Saturnoberfläche, sie zeigen jedoch auch unter Berücksichtigung der wesentlich ungünstigeren Beobachtungsbedingungen bei weitem nicht die hervorragende Schärfe und Definition der Jupiterwolken. Sie ähneln vielmehr grauen, undeutlich begrenzten Schleiern, die nur ausnahmsweise irgendein schärfer begrenztes Objekt enthalten. Während an den Gebilden der Jupiteroberfläche eine fortlaufende Kontrolle der Umdrehungsbewegung stattfinden kann, ist man bei Saturn in dieser Beziehung auf die seltenen und dabei kurzen Perioden der Sichtbarkeit eines auffälligen Flecks beschränkt. Die wenigen bei solcher Gelegenheit in der Nähe

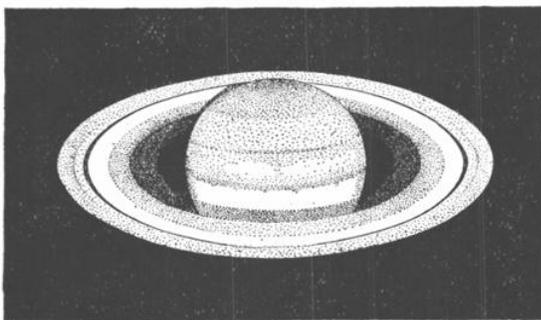


Fig. 21. Saturn bei nahe größter Ringöffnung (1913).

des Saturnäquators angestellten Beobachtungen haben zu einer Umdrehungszeit von rund $10^h 14^m$ mit etwa 1^m Unsicherheit geführt. Dieser Wert war bereits allgemein angenommen, als im Jahre 1903 in etwa 35° nördlicher Saturnbreite eine große, weißliche Wolke auftauchte, die erst nach je $10^h 38^m$ die Mitte der Planetenscheibe erreichte.

Es ist damit der Nachweis geliefert, daß die sichtbare Saturnoberfläche genau ebenso, wie es bei Jupiter der Fall ist, keine konstante Rotationsdauer hat, sondern zonenweise auftretende Unterschiede zeigt, die mindestens $\frac{1}{26}$ der ganzen Umdrehung umfassen. Die für diese Abweichungen bei Jupiter gegebene Erklärung gilt also vielleicht bei Saturn in verstärktem Maße. Daß es hier kaum noch allein die Wärmestrahlung der Sonne ist, die diese Passat- und Gegenpassatströmungen mit einer Geschwindigkeit von mehr als 100 m in der Sekunde aneinander vorüberziehen läßt, liegt auf der Hand; ähnlich wie bei Jupiter muß also wenigstens ein Teil der Ursache in dem unsichtbaren Planetenkern selbst gesucht werden.

Weniger wegen seiner Oberflächeneinzelheiten als wegen seines eigentümlichen, im Planetenreich einzigartigen Ringschmuckes ist Saturn seit 300 Jahren ein bevorzugtes Objekt astronomischer Fernrohrbeobachtung gewesen. Da dieser Ring jedoch, wie die neuesten Forschungen ergeben haben, nichts anderes als eine Anhäufung von unzähligen kleinsten Körpern, also Trabanten des Planeten ist, so soll er weiter unten zusammen mit den übrigen Satelliten besprochen werden.

Hätte Saturn keinen Ring, so würde man ihm angesichts seiner wenig bemerkenswerten Oberfläche kaum ein besonderes Interesse widmen. Denken wir uns nun diesen ringlosen, von einer undurchdringlichen atmosphärischen Hülle umgebenen Planetenball wesentlich verkleinert und in die doppelte, dann in die dreifache Entfernung des Saturn versetzt, so werden wir eine ungefähre Vorstellung davon erhalten, wie wenig uns die äußersten Schwesterwelten der Erde, Uranus und Neptun, im Fernrohr zu bieten vermögen, und die Schwierigkeiten ermessen, die sich der physischen Untersuchung dieser Planeten entgegenstellen.

Der Uranus ist der erste Wandelstern, durch dessen zufällig erfolgte Entdeckung die Zahl der seit drei Jahrtausenden bekannten fünf Planeten in der Neuzeit vermehrt wurde. Seine Auffindung durch den damals noch im Beginn seiner astronomischen Laufbahn stehenden Wilhelm Herschel am 13. März 1781 bildet wohl ohne Frage eine der wichtigsten Entdeckungen des 18. Jahrhunderts. Wie schwer es damals aber selbst den Gelehrten wurde, die seit alters her eingewurzelte Überzeugung von einer beschränkten Planetenzahl aufzugeben, beweist der Umstand, daß der neue bewegte Stern trotz seiner Helligkeit und scheibenförmigen Begrenzung zunächst für einen von der Sonne ungewöhnlich weit entfernten Kometen gehalten wurde. Erst 5 Monate nach der Entdeckung zeigte Laplace, daß der Weltkörper ein neuer Planet jenseits der Saturnbahn sei. Die daraufhin vorgenommene Untersuchung älterer Meridianbeobachtungen hat dann noch gegen 20 Örter des Planeten zutage gefördert, deren unbewußte Bestimmung z. T. bis auf Flamsteed und das Jahr 1690 zurückreicht. Durch Berücksichtigung dieses wertvollen Materials konnte in verhältnismäßig kurzer Zeit über die Bahn des neuen Wandelsterns völlige Klarheit gewonnen werden.

Uranus.

Der Radius dieser Bahn beträgt 2870 Millionen km, die zu ihrer Voll-

endung erforderliche Zeit 84 Jahre 6 Tage. Der Durchmesser der Uranuskugel dürfte etwa 50000 km umfassen, doch ist bei dieser und den folgenden Zahlenangaben zu berücksichtigen, daß Messungen auf einer so winzigen Scheibe, bei der der feinste Meßfaden im Fernrohrokular bereits rund 4000 km verdeckt, außerordentlich schwierig sind. Aus demselben Grunde muß auch die Abplattung, die in verschiedenen Messungsreihen angedeutet ist, als noch nicht endgültig nachgewiesen gelten, obwohl sie wegen der offenkundigen Ähnlichkeit des Uranus mit Jupiter und Saturn sehr wahrscheinlich ist. Die Verwandtschaft mit den vorangehenden beiden Wandelsternen der äußeren Gruppe macht sich insbesondere wieder durch die geringe Dichte des Uranus bemerkbar, die in Erdeinheiten 0,23 beträgt, somit vollständig der Jupiterdichte gleicht. In bezug auf Volumen kommen nach diesen Zahlen dem Planeten etwa 60, in bezug auf die Masse 14 Erdkörper gleich.

Auch in der Albedo des Uranus, die 0,60 beträgt, finden wir eine Wiederholung der für Jupiter gefundenen Ziffer. Fügt man noch hinzu, daß auch die Spektren von Jupiter und Uranus auf eine sehr enge Verwandtschaft der Atmosphären hindeuten, so kann kaum darüber ein Zweifel bestehen, daß uns auch weiter vervollkommnete unter den günstigsten atmosphärischen Bedingungen verwendete Fernrohre nicht viel Neues über die Uranuswelt enthüllen werden.

Versuche, die Umdrehungszeit des Uranus um seine Achse zu ermitteln, sind wiederholt unternommen worden, doch ist erst in neuester Zeit in dieser Beziehung ein positiver Erfolg zu verzeichnen gewesen. Da auch die besten optischen Hilfsmittel bisher keine bestimmteren Einzelheiten auf dem Planeten erkennen ließen, blieb ähnlich wie bei der Venus für die Ermittlung der Rotation lediglich der spektroskopische Weg übrig. Der Einfluß der Phase, insbesondere aber das unsichere Umhertasten nach der Achsenlage, die bei unserem Nachbarplaneten so große Schwierigkeiten bereiten, fallen in gewissem Sinne tatsächlich bei Uranus fort. Die Phase ist auch den genauesten photometrischen Messungen kaum noch zugänglich, und die ungefähre Äquaturlage wird durch die Bahn seiner vier Monde wenigstens genähert angedeutet. Diese Monde haben eine rückläufige Bewegung, und ihre Bahnen stehen nahezu senkrecht auf der Ebene der Uranusbahn. Danach konnte man mit großer Wahrscheinlichkeit darauf schließen, daß die Pole des Planeten in der Richtung senkrecht zu den Satellitenbahnen zu suchen seien. Die sorgfältigen spektrographischen Versuche von Deslandres aus dem Jahre 1901 ließen zunächst nur gemäß der Vermutung auf die Wahrscheinlichkeit einer der abnormen Satellitenbewegung entsprechenden Umdrehung der Uranuskugel von Osten nach Westen schließen. Lowells 10 Jahre später wiederholte Aufnahmen haben dann nach derselben Methode aus den spektralen Linienverschiebungen für die Äquatorgegend eine Rotation von rund $10\frac{3}{4}^h$ ergeben, so daß auch in bezug auf die rasche, von den inneren Planeten so sehr abweichende Umdrehungszeit die Verwandtschaft mit Jupiter und Saturn unzweideutig hervortritt.

Über die denkwürdige Entdeckung des Neptun auf rein theoretischem Wege im Jahre 1846 ist im vorangehenden Abschnitt ausführlicher berichtet worden. Was die physische Beschaffenheit dieses Planeten anbetrifft, so vermag auf dem nahe sternartigen Scheibchen auch das beste Fernrohr ohne Zuhilfenahme der Photometrie und der Spektralanalyse nichts mehr zu entschleiern. Die kosmische Stellung des, soviel wir heute wissen, äußersten Planeten des Sonnensystems ist durch einen Sonnenabstand von 4500 Millionen km und durch eine Umlaufzeit von 164 Jahren 286 Tagen charakterisiert. Dementsprechend ist auch die scheinbare Ortsänderung des teleskopischen Planeten im Tierkreise ungemein langsam, und 13 Jahre hindurch beherbergt ihn ein jedes der 12 Zodiakalbilder. In seinen räumlichen Dimensionen übertrifft er vielleicht Uranus, ist jedenfalls diesem mindestens gleich. Seine Dichte liegt unterhalb der Uranus- und Jupiterdichte, übersteigt aber mit ihrem Betrage von 0,20 die durchschnittliche Dichte des Saturn noch wesentlich. Während somit im Neptunvolumen wieder mindestens 60 Erden Raum finden würden, kommt seine Masse oder die in Neptun enthaltene Quantität der Materie nur 12 Erden gleich.

Von den physischen Ergebnissen, die mit Hilfe der Photometrie und Spektralanalyse bisher erzielt worden sind, erscheint zunächst die Albedo- und Spektrumbestimmung von besonderem Interesse. Die erstere liegt tiefer als bei den vorangehenden Planeten und beträgt nur 0,52, woraus man wohl auf eine das Licht stärker absorbierende Atmosphäre schließen darf. Im Spektrum findet sich das rätselhafte Band der Jupiteratmosphäre wieder, sowie die anderen Bänder, die sich schwächer schon bei Uranus zeigen. Es unterliegt jedenfalls keinem Zweifel, daß zwischen diesen Atmosphären und der Lufthülle der Erde in bezug auf die Zusammensetzung bereits ein beträchtlicher Unterschied besteht. Im Zusammenhange mit der Tatsache, daß wir Uranus sowohl wie Neptun in eine außerordentlich frühe Entwicklungsperiode der Erde zu versetzen gezwungen sind, ist diese Feststellung von besonderem Interesse. Man hat bereits wiederholt die unzweideutig nachgewiesenen Klimaschwankungen der Erde, die mit ihnen Hand in Hand gehenden Formationsänderungen u. a. m. mit Veränderungen in der Zusammensetzung unserer Atmosphäre in Verbindung gebracht, und es hat den Anschein, als ob man tatsächlich einige besonders seltsam und rätselhaft erscheinende Perioden in der Entwicklung des Erdballs, wie die Steinkohlenformation, die Eiszeit usw., tatsächlich auf diesem Wege am einfachsten erklären und verständlich machen könnte. Es ist also durchaus nicht ausgeschlossen, daß in dieser Beziehung die Gashüllen der anderen Planeten auch dem Geologen einmal Anhaltspunkte dafür geben werden, in welcher Richtung diese zunächst noch völlig hypothetischen Atmosphärenänderungen der Erde vor sich gegangen sind.

Durch die kopernikanische Planetentheorie haben die Wandelsterne die ihnen bis dahin zugeschriebene Abhängigkeit von der Erde eingebüßt. Jetzt erlangen sie in anderem Sinne eine große Bedeutung für die Wissenschaft

insofern, als wir aus ihrer Konstitution Winke über die Vergangenheit und Zukunft unseres irdischen Wohnsitzes zu erhalten hoffen dürfen. Damit gewinnen die durch das neue Weltsystem ein wenig gelockerten Beziehungen zwischen der Erde und ihren einstigen Planetentrabanten einen festeren Boden und das mehr oder weniger ähnliche Entwicklungsschicksal eines jeden Wandelsterns schlingt um ihre Gesamtheit noch enger das Band, das sie als Angehörige der Sonnenfamilie schon ohnehin umschließt.

III. Der Erdmond und die Trabanten der übrigen Planeten. Unter den kosmischen Vergleichsobjekten für bestimmte Entwicklungsphasen der Erde dürfen wir den Erdmond nicht vergessen; ist er doch neben der Sonne der einzige Weltkörper, der schon dem bloßen Auge einen merklichen Durchmesser und dabei deutliche Einzelheiten von Oberflächenschattierungen zeigt. Die wichtige Rolle, die seine Bewegung am Himmel in der Zeitrechnung aller Völker und bei den wichtigsten Fragen der theoretischen Himmelskunde spielt, ist bereits in den ersten Abschnitten behandelt worden, wobei auch die zum Verständnis dieser Bewegung erforderlichen Zahlenwerte mitgeteilt wurden. Wir können uns also hier fast ausschließlich auf die Darlegung der Beziehungen beschränken, die ihn als dunklen erstarrten Weltkörper rein physikalisch mit der Erde verbinden. Von den Daten, die seine kosmische Stellung bestimmen, sollen hier nur die wichtigsten mitgeteilt werden.

Kosmische
Verhältnisse
des Erdmondes.

Die Entfernung des Mondes von der Erde beträgt in mittlerer Stellung 60,3 Erdhalbmesser oder 384 400 km. Gegenüber dem Abstand der uns zunächst gelegenen großen Planeten ist diese Entfernung außerordentlich gering, und tatsächlich gehören nur sehr schwache optische Hilfsmittel dazu, um seine Oberfläche und ihre Einzelheiten genauer beobachten und studieren zu können. Während die für die Zeitrechnung allein maßgebliche synodische Umlaufzeit um die Erde, die mittlere Zwischenzeit zwischen zwei Neumonden, $29^d 12^h 44^m 3^s$ beträgt, braucht der Mond zur Vollendung eines siderischen Umlaufs — bezogen auf eine feste Richtung im Raume — nur $27^d 7^h 43^m 11,5^s$, und in genau derselben Zeit vollführt er auch eine vollständige Umdrehung um seine Rotationsachse, die gegen die Normale der Ekliptik nur die Neigung von $1^\circ 32'$ aufweist. Infolge der Übereinstimmung zwischen der Revolutions- und Rotationszeit zeigt uns das Antlitz des Mondes stets die gleichen Umriss und lediglich die elliptische Bewegung um die Erde sowie die wechselnde Stellung des Beobachters auf der Erdoberfläche bedingen geringe, dem bloßen Auge für gewöhnlich entgehende Verschiebungen der sichtbaren Hälfte, die man als scheinbare Libration des Mondes zu bezeichnen pflegt. Dieser Libration haben wir es zu verdanken, daß man im Laufe der Zeit nicht nur die Hälfte, sondern im ganzen 0,59 der Mondoberfläche übersehen kann. Der scheinbare Durchmesser der Mondscheibe am Himmel wechselt mit der Entfernung des Mondes vom Beobachter und beträgt im Mittel etwas mehr als $31'$; sein wahrer Durchmesser ist 3480 km und entspricht also etwa der direk-

ten Entfernung von Hamburg bis zur Südspitze von Grönland. Das Volumen unseres Trabanten kommt genau $\frac{1}{50}$ des Erdvolumens gleich, während die Masse nahe $\frac{1}{80}$ der Erde beträgt. Demnach ist die Mondichte nur 0,6 der durchschnittlichen Dichte der Erde; sie entspricht dem spezifischen Gewicht 3,4 der irdischen Körper, somit etwa der Dichte unserer schwereren Gesteine.

Es gehört keine besonders lebhaft Phantasie dazu, um dem Erdtrabanten eine feste Oberfläche zuzuschreiben, und tatsächlich finden wir bereits im Altertum neben ganz unmöglichen Vorstellungen auch einzelne durchaus richtige Anschauungen über die physische Konstitution der Mondoberfläche. Daß darunter auch zuweilen die Vorstellung von hohen Bergen auftaucht, erscheint nicht weiter verwunderlich. Sind auch die Abweichungen der Lichtgrenze von einer Kreisprojektion für das bloße Auge sehr unbedeutend, so können sie doch bei einiger Aufmerksamkeit in bestimmten Phasen erkannt werden. Immerhin erscheint ohne Mitwirkung des Fernrohres irgendeine wissenschaftliche Beobachtung der Mondoberfläche ausgeschlossen, und man kann sich daher die Überraschung vorstellen, die Galilei erlebte, als er sein erstes primitives Fernglas auf den Mond richtete. Genöß er doch als erster unter den Menschen das Glück eines Einblicks in die physischen Verhältnisse eines anderen Weltkörpers, der trotz mancher Verschiedenheiten durch seine Berge und Täler doch lebhaft an unseren irdischen Wohnsitz erinnerte! Die rohen Skizzen einzelner Mondphasen, die der Entdecker der Fallgesetze seinem im Jahre 1610 erschienenen „Sternenboten“ einverleibte, werden auch trotz ihrer geringen wissenschaftlichen Bedeutung stets ein historisches Denkmal menschlicher Kulturentwicklung bleiben.

Für eine ersprißliche topographische Untersuchung des Mondes mit Hilfe des neu erfundenen Instruments fehlte allerdings zunächst die kartographische Unterlage. Trotz der einfachen, durch die dauernde Sichtbarkeit derselben Mondhälfte gegebenen Verhältnisse scheitern doch zunächst alle Versuche einer zeichnerischen Darstellung an der Reichhaltigkeit der Mondformationen. Die Jesuiten Christoph Scheiner, Langrenus und Grimaldi, durchweg tüchtige Beobachter, von denen besonders der erste als Sonnenforscher sich hervorgetan hat, bringen nur rohe Übersichtsskizzen der Mondoberfläche zustande, von anderen weniger bekannten Namen ganz zu schweigen. Als eine wirkliche Mondkarte kann erst die 1647 erschienene Tafelsammlung der Selenographie von Hevelius gelten. Wie alles andere, das uns der Danziger Astronom hinterlassen hat, kennzeichnet das Werk, das eine Karte und 40 Phasenzeichnungen enthält, einen hervorragenden Beobachter und Künstler. Selbst die Resultate, die später Riccioli, Cassini, Lahire u. a. auf dieser Grundlage in mühsamer Arbeit erzielten, können dem von Hevelius hinterlassenen Bild der Mondoberfläche bei weitem nicht gleichgesetzt werden, geschweige denn als ein Fortschritt gelten. Selbstverständlich sind alle diese ersten kartographischen Versuche durch einfache Schätzungen der Lage der Mondformationen gegen die Ränder entstanden. Ein technisch

Entwicklung
der Mond-
kartographie.

immer noch unvollkommenes aber dafür auf mikrometrischen Messungen beruhendes Kartenbild der Mondoberfläche, das bereits für eine mittlere, von der Libration nicht beeinflusste Lage des Mondes zur Erde gilt, entwarf erst Tobias Mayer in Göttingen um das Jahr 1770. Dieser Karte gegenüber muß man selbst die umfangreicheren, etwa 20 Jahre später angestellten Studien Schröters mit ihrer Betonung rein äußerer Momente eher als einen Rückschritt denn als Fortschritt in der Selenographie bezeichnen. Rasch hintereinander liefert dann das 19. Jahrhundert drei hervorragende Musterleistungen der Mondkartographie in vollendeter Ausführung. Die durch den frühen Tod ihres Verfertigers, des Landmessers Lohrmann, leider unvollendet gebliebene, technisch wohl am höchsten stehende Karte begann 1824 zu erscheinen. Im Jahre 1836 liegt die nach ähnlichem Plane gezeichnete Mappa Selenographica von Beer und Mädler fertig vor, die für die Mondforschung fast dieselbe Bedeutung hat wie die Sternkarten der sog. Bonner Durchmusterung für die Fixsternastronomie. Die 1870 erschienene Mondkarte von Schmidt ist schließlich ohne Frage das vollständigste und genaueste Kartenwerk der Mondoberfläche, das wir besitzen. Wenn ihm nicht die gebührende Beachtung zuteil geworden ist, die es verdient, so lag es daran, daß es in einem Moment erschien, in dem bereits die photographische Platte der zeichnerischen Monddarstellung erfolgreich Konkurrenz zu bereiten begann. Heutzutage hat die photographische Aufnahme die Karten vollständig aus dem Felde geschlagen, und eine ganze Reihe von photographischen Mondatlanten, unter denen der große Pariser Mondatlas an erster Stelle zu nennen ist, ermöglichen jedem Beobachter einen direkten Vergleich mit den beobachteten Einzelheiten. Trotz ihrer großen Treue und der z. T. hervorragenden Technik der Reproduktion haben die photographischen Mondbilder den Wunsch nach einer guten Karte nicht verstummen lassen. Bei stärkerer Vergrößerung tritt auch bei den schärfsten Aufnahmen das Korn der Platte sehr störend hervor, so daß bei guten Luftverhältnissen schon mittlere Instrumente dem Auge einen weit tieferen Einblick in die Einzelheiten der Mondoberfläche vermitteln als die beste Photographie. Auch für rein statistische Arbeiten ist eine Darstellung der Struktur unseres Trabanten in den konventionellen Zeichen der Erdkarten unentbehrlich, so daß der Photographie trotz ihrer unbestrittenen Erfolge das selenographische Arbeitsfeld vorläufig noch nicht ausschließlich eingeräumt werden kann.

Fehlen von
Wasser und Luft.

Es darf wohl als bekannt vorausgesetzt werden, daß die von Galilei und Kepler vermutete, von Hevelius bereits angezweifelte Teilung der Mondoberfläche in Land- und Wassergebiete der genaueren wissenschaftlichen Untersuchung nicht standgehalten hat. Obwohl die alte, auf Riccioli († 1671) zurückgehende Nomenklatur, die in den hellen Gebieten des Mondes durchaus richtig Berge, in den dunkleren dagegen ohne jede Berechtigung Meere erblickte, auch heute noch beibehalten ist, so kann es doch keinem Zweifel mehr unterliegen, daß Wasser und der Träger jeder Feuchtigkeit, die Atmosphäre, auf dem Monde vollkommen unbekannt Begriffe sind. In Wirklich-

keit erweisen sich die „Meere“ und „Ozeane“, die für den naiven Beobachter aller Zeiten zu den rohen Umrissen eines menschlichen Antlitzes zusammenschmolzen, im Fernrohr als weite, von Gebirgen scharf begrenzte Ebenen mit zahllosen Höhenunterschieden und mannigfachen unveränderlichen Einzelheiten der Schattierung. Trotz der genauesten Beobachtungen ist auf der Mondoberfläche noch kein Fleckchen gefunden worden, das man auch nur entfernt mit einem See oder auch nur mit einem flachen Wassertümpel der Erde vergleichen könnte, und noch nie ist die Wahrnehmung irgendwelcher Einzelheiten durch Nebel oder Wolkenbildung über der Mondoberfläche verteilt worden. Schwarz und ohne jeden Halbschatten verläuft die Lichtgrenze, unheimlich scharf bilden sich in dem grellen Sonnenlicht die Umrisse der Bergschatten auf dem Mondboden ab; die Sterne, die der Erdtrabant bei seinem Umlauf zuweilen bedeckt, verschwinden ohne jede Brechung und Lichtabnahme an seinem scharfen Rande, kurz, es genügt ein Blick durch ein gutes Fernrohr, um zu erkennen, daß uns die Natur gerade hier, wo wir einen tieferen Einblick in die Lebensbedingungen eines anderen Weltkörpers zu erhalten hofften, ein Gestirn vorführt, das vom Standpunkte irdischer Entwicklungsgeschichte seine Rolle längst ausgespielt hat und einer bedeutenderen Veränderung sicher kaum noch fähig ist.

Das Fehlen einer Atmosphäre auf dem Monde läßt sich auch durch theoretische Erwägungen begründen. Nach den von Clausius um 1890 aufgestellten und begründeten Gesetzen der sog. kinetischen Gastheorie kann man aus dem spezifischen Gewicht und der Temperatur eines Gases die mittlere Geschwindigkeit seiner in fortwährender Bewegung befindlichen Moleküle ableiten. Andererseits ist aus der Massenanziehung eines Weltkörpers die Anfangsgeschwindigkeit leicht zu ermitteln, die man einem Körper erteilen müßte, um ihn der Anziehungssphäre des betreffenden Gestirns zu entrücken. Derartige Zahlensammenstellungen für die verschiedenen Gase haben nun ergeben, daß die Erde z. B. Wasserstoff und Helium nur in sehr beschränktem Maße festzuhalten vermag. Beim Monde, der eine wesentlich geringere Anziehungskraft ausübt als die Erde, spielen die merklich schwereren Bestandteile unserer Atmosphäre, Sauerstoff und Stickstoff, etwa dieselbe Rolle hinsichtlich des dauernden Bestandes wie für uns der Wasserstoff oder das Helium, d. h. die Geschwindigkeit der molekularen Bewegung der meisten Gase wird dort durch die Anziehung so wenig kompensiert, daß eine Atmosphäre, auch wenn sie einmal auf dem Monde vorhanden war, in kurzer Zeit in den Weltraum diffundiert sein muß.

Nach dieser Auffassung hätte man auch eine Erklärung dafür, weshalb auf dem kleinen Merkur alle Anzeichen einer Lufthülle fehlen und der zweitkleinste Weltkörper der Planetenreihe, Mars, gegenwärtig bereits mit einer sehr dünnen Atmosphäre haushalten muß, während die großen äußeren Planeten mächtige Gashüllen besitzen. Entspricht die Theorie vollständig den wirklichen Verhältnissen, so ließe sich damit behaupten, daß nicht nur unser Begleiter — und mit ihm auch alle anderen Wandelstern-

trabanten — sondern sicherlich auch die kleinen Planeten zwischen Mars und Jupiter keine Atmosphäre besitzen und daher nach dem Abschluß ihres Erstarrungsprozesses für die Entwicklung höherer Lebensorganismen kaum in Frage gekommen sind.

Orographische
Verhältnisse.

Sieht man sich den Mond im Fernrohr etwas genauer an, so fällt sehr bald der große Unterschied zwischen der irdischen und lunaren Oberflächenbildung auf. Nur wenige Gebirgszüge der Mondoberfläche, wie die Apenninen, Alpen oder der Kaukasus, haben mit Kettengebirgen der Erde entfernte Ähnlichkeit, alles andere ist ein einziges gewaltiges Kratermeer, das durch eine unregelmäßige Zone dunkler getönter Tiefen unterbrochen wird. Um eine Vorstellung von der Zahl der Krater zu geben, genügt es, darauf hinzuweisen, daß man bereits in einem mittleren Instrument gegen 40000 dieser Gebilde von 500 m bis zu 200 oder 300 km Durchmesser zählen kann, eine Ziffer, die die Schar der mit bloßem Auge sichtbaren Sterne der Himmelskugel fast um das Zehnfache übertrifft. Die Krater, über deren Aussehen und Eigentümlichkeiten heutzutage auch dem Laien eine jede gute Photographie Auskunft erteilt, beherrschen so sehr das ganze Bild der Mondoberfläche, daß wir in erster Linie diesen Bildungen gerecht werden müssen, wenn wir einen Einblick in die geologische oder richtiger in die selenologische Vergangenheit des Mondes gewinnen wollen. In dieser Frage käme allerdings mit wesentlich größerem Rechte der Geologe als der Astronom zu Worte.

Die in ihren Dimensionen so außerordentlich verschiedenen Krater der Mondoberfläche haben gewisse gemeinsame Eigenschaften, von denen der meist unter dem äußeren Niveau gelegene Boden, ein geringer äußerer und sehr beträchtlicher innerer Böschungswinkel sowie das häufige Vorkommen von Zentralbergen an erster Stelle zu nennen wären. Bei den kleinen Kratern von wenigen Kilometern bis zu etwa 300 m Durchmesser, die uns bei guter Luft die Fernrohre eben noch zeigen, sind Einzelheiten des Aufbaues wesentlich schwieriger zu gewinnen, doch wäre es zweifellos absurd, ihnen eine wesentlich andere Entstehungsursache zuzuschreiben wie den größeren Ringgebirgen. Der einzige Unterschied, der abgesehen von den Größenverhältnissen hier hervortritt, liegt lediglich in der zeitlichen Entwicklung dieser Gebilde, insofern, als die größten Ringgebirge wahrscheinlich einer älteren, die kleinen Krater dagegen einer jüngeren Periode des Entwicklungsganges der Mondoberfläche angehören.

Der naheliegende Satz, daß gleiche Formen auch durch gleiche Kräfte entstehen, läßt sich nicht ohne wesentliche Einschränkungen von der Erde auf den Mond übertragen. Der Vulkanismus der Erde hat selbst in der Zeit seiner höchsten Entwicklung bei der Gebirgsbildung nur eine recht untergeordnete Rolle gespielt. Die Krater, die er geschaffen hat, sind fast ohne Ausnahme keine Erhebungs-, sondern Aufschüttungsgebilde, erzeugt durch die Auswurfsprodukte eines vulkanischen Durchbruchkanals durch die auf dem Urgestein ruhenden Sedimente. Schon nach der Verteilung der irdischen Vulkane auf Bruchspalten der Erdkruste darf man sie gewisser-

maßen als eine letzte äußere Erscheinungsform der glutflüssigen Herde des Erdinnern ansehen. Ganz anders auf dem Monde. Die Verteilung, die Nebeneinanderlagerung, das Ineinandergreifen der Kreiswälle, ihre z. T. riesige Öffnung gegenüber der Wallhöhe (Fig. 22) u. a. m. schließt ihre Entstehung aus herausgeschleuderten Aschen, Sanden und Gesteinstrümmern vollkommen aus. Es unterliegt keinem Zweifel: für das gewaltige Schlackenfeld unseres Trabanten kann der rein schematische Vergleich mit irdischen Vulkanen keine Erklärung bringen, ohne daß man in stände wäre, die Analogie vollständig zu entbehren.

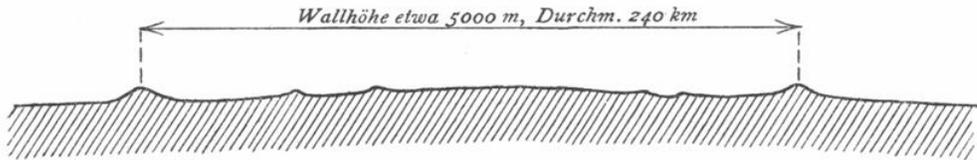


Fig. 22. Profil der Wallebene Clavius auf dem Monde im richtigen Längen- und Höhenverhältnis.

Eine Anschauung, die die Entstehung der Mondgebilde auf den Einsturz gewaltiger, durch keine Atmosphäre gehemmter Meteore zurückführen wollte, hat heute unter den Selenologen nur noch sehr wenige Anhänger, man muß also schon wohl oder übel bei den inneren Kräften bleiben. Tatsächlich läßt sich auch aus der Fülle aller im Laufe der Zeit geäußerten Ansichten über die Entstehung der Mondformationen ein Bild zusammenfügen, das vielleicht auch in dieser Form den wirklichen Verhältnissen nicht vollständig entspricht, aber den Vorzug hat, daß es ohne besondere Hypothesen auf geologisch bekannte Erscheinungen zurückgeht.

Mutmaßliche
Entstehung
der Krater

Da die Wälle aller Mondkrater nahe kreisförmig sind und von der Oberfläche des Planeten senkrecht emporsteigen, so kann tatsächlich kaum ein Zweifel darüber bestehen, daß der Sitz der Kräfte, die die Ringgebirge erzeugten, im Inneren unseres Trabanten zu suchen ist. Weiterhin kann als sicher angenommen werden, daß die Kraterbildung auf unserer Nachbarwelt einsetzte, als diese erst eine dünne elastische Kruste besaß, im Gegensatz zur Erde, wo erst in einem stark vorgeschrittenen Alter des Planeten die Gase und das Magma des Inneren sich durch das Urgestein und die Sedimente einen Weg an die Oberfläche zu bahnen suchten. Trotz der bereits hervorgehobenen Unterschiede zwischen den Erd- und Mondkratern ist das Anfangsstadium der vulkanischen Tätigkeit auf beiden Planeten vielleicht doch nicht unähnlich gewesen. Man braucht nur an den jedem Geologen bekannten terrestrischen Vorgang der Lakkolithbildung in Verbindung mit den Einsturzerscheinungen der sog. Rückzugskalderen zu erinnern, um etwa zu der folgenden Vorstellung von der Entstehung der wichtigsten Mondformationen zu gelangen.

Auf dem erkaltenden Weltkörper bildet sich eine festere Kruste. In einem bestimmten Stadium der weiteren Entwicklung bahnen sich Gase und Laven durch Tausende von größeren und kleineren Kanälen den Weg an die Oberfläche und wölben, meist ohne einen eigentlichen Durchbruch zu

erzielen, den Boden blasenartig auf (Lakkolithe). Ein Hin- und Herpulsieren der magmatischen Materie zwischen der Pyrosphäre und den Ausflußkanälen verursacht den Einsturz der meisten kuppenförmigen Aufwölbungen (Rückzugskalderen) und erzeugt den Grundstock der heutigen uns sehr merkwürdig anmutenden Mondringgebirge. Der Boden der Krateröffnungen wird späterhin vom empordringenden Magma noch wiederholt überschwemmt; hier und da quillt die Lava aus dem zentralen Herde oder aus peripherischen Ausbruchsstellen empor und erzeugt unter starker Entgasung die Zentral-

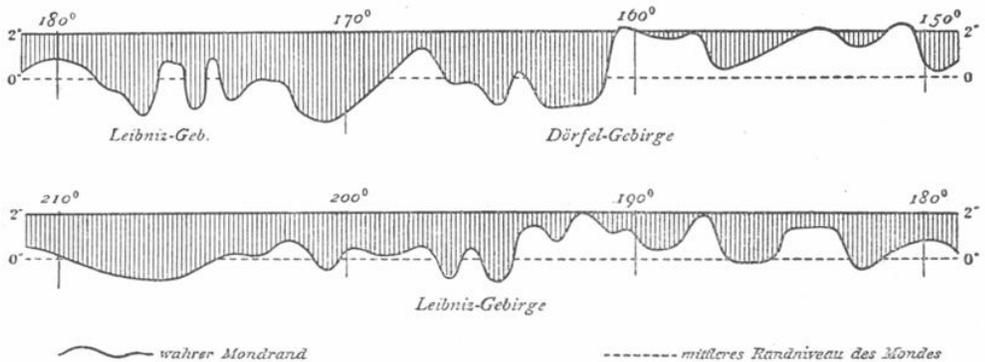


Fig. 23. Profilumriß des Mondrandes in der Nähe des Mondspüdpols (10fach überhöht).

berge und die zahlreichen parasitischen Krateröffnungen, von denen die Gebirgsgegenden der Mondoberfläche wie übersät erscheinen. Der beträchtliche Glanz einiger dieser hochgelegenen kleinen Krater ließe sich durchaus im Sinne der terrestrischen Fumarolen- und Solfatarenbildung durch Ausströmungen von sauren Dämpfen oder auch durch Auswürfe von weißer Asche erklären.

Entstehung der
Mareebenen.

Die von hohen, eigentümlich zerrissenen Gebirgen umgebenen Mareflächen des Mondes lassen sich unter Zugrundelegung der oben angenommenen starken Umwälzungen bei der Erstarrung unseres Trabanten am einfachsten als Aufschmelzungsherde der Mondrinde auffassen. Ein Teil der Oberfläche des erstarrenden Weltkörpers wird wieder flüssig und bildet einen riesigen Lavasee, der einen Teil der ursprünglichen Ringwallandschaft vernichtet und an seinen Ufern hier und da ausgesprochene Kraterruinen übrig läßt. Nach und nach bilden sich an den Rändern dieser magmatischen Gebiete wieder feste Schollen, die moränenartig beiseite gedrängt werden und hier die wenigen echten Gebirgszüge erzeugen, die wir heute noch auf dem Monde erblicken. Nach dem Erkalten ist indessen die Marefläche keine vollkommene Ebene geblieben. Deutlich gewahren wir Anzeichen mehrfacher Überflutungen durch dunkle Massen der nicht mehr feststellbaren peripherischen Eruptionsherde. Die weitere Erstarrung und Abkühlung des Mondkörpers verursacht schließlich in den Ebenen, diesen jüngsten Bildungen seiner Lithosphäre, starke Senkungen, die an dem Profil des äußersten Mondrandes sich besonders gut studieren lassen.

Die Strahlen-
systeme.

Einige Schwierigkeiten bereitet die Erklärung der merkwürdigen hellen Streifen, die um die Vollmondszeit meridianartig von einigen Kratern, ins-

besondere von dem Ringgebirge Tycho ausstrahlen und, ohne die geringste Niveaustörung zu verursachen, sich über Berg und Tal bis auf Entfernungen von 1800 km Länge erstrecken. Bei niedrigem Sonnenstande, also z. B. um die Zeit der Viertelphasen, sind sie kaum erkennbar und verschwinden an der Lichtgrenze vollständig. Diese Streifen gewähren den Eindruck, als wenn eine in ihrer Richtung wechselnde, von den betreffenden Kratern ausgehende Luftströmung feine weiße Asche über den Boden der Mondoberfläche gestreut hätte. Die Struktur der Streifen erinnert, ins Kleine übertragen, lebhaft an die Figuren, die ein leichter Wind hervorzaubert, wenn er Schnee oder die Quarzkörnchen feinen Dünsandes vor sich herjagt. Obwohl die Vermutung eines „äolischen“ Ursprungs der Strahlensysteme nicht alle Eigentümlichkeiten, insbesondere nicht die an ihnen betrachtete Regelmäßigkeit und speziell im Fall des Tycho nicht den dunkleren Ring zu erklären vermag, der den Ursprungskrater umgibt, läßt sich heute noch keine andere plausible Deutung für diese seltsamen Gebilde aussprechen. Die sonst naheliegende und noch heute häufig vertretene Anschauung, daß diese rätselhaften Streifen als ausgefüllte, von den Explosionszentren ausgehende Sprünge der Mondkruste aufzufassen seien, widerspricht zu sehr der direkten Anschauung und wird von keinem aufmerksamen Beobachter geteilt werden.

Wo sich auf dem Monde tatsächlich Spalten und Risse gebildet haben, sind sie auch heute noch in Gestalt der sog. Rillen deutlich als solche zu erkennen. Diese Furchen, die Krater und Ebenen durchsetzen, zeigen durchaus den Charakter von äußerlichen Sprüngen der Mondrinde. An der Grenze der Mareebenen erscheinen sie am häufigsten und zeigen oft einen zur benachbarten Uferlinie konzentrischen Verlauf. Diese höchstens 1 bis 2 km breiten Spalte sind wahrscheinlich bei der Senkung der Mareebenen entstanden, wobei vielleicht der gewaltige Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht eine nicht unwesentliche Hilfsrolle gespielt hat. Folgt doch auf unserem Trabanten der intensiven, durch keine Lufthülle gemilderten Tagesstrahlung von 14 Tagen eine ebenso lange Nacht, in deren Verlauf einzelne Teile der Mondoberfläche bis auf die Temperatur des Weltraumes sich abkühlen mögen!

Die Rillen.

Da die gegenwärtigen kosmischen Verhältnisse dem Monde sicher bereits seit vielen Jahrtausenden, wenn nicht gar seit Jahrtausenden eigentümlich sind, ist auf dieser Welt ohne Wetter und Jahreszeit kaum die Wahrnehmung einer größeren Veränderung zu erhoffen. Die wild zerklüfteten Gipfel und Hänge der Krater, die nach Beobachtungen der Schattenlängen oder nach direkten Messungen im Randprofil oft aus Depressionen von über 4000 m Tiefe bis zu Höhen von gleicher Größenordnung emporsteigen, zeigen so viele Einzelheiten, daß selbst ein gewaltiger Bergsturz nur einmal ganz zufällig, etwa bei stereoskopischer Vergleichung von zwei photographischen Mondaufnahmen, zu entdecken wäre. Die Feststellungen von Neubildungen oder von Anzeichen einer Fumarolentätigkeit innerhalb der Krater, die

früher wiederholt bekannt gegeben wurden, sind auch größtenteils verstummt, seitdem die Photographie uns unparteiische Naturkunden des Mondantlitzes verschafft und den Beweis seiner wenigstens in den gröberen Zügen unveränderlichen Beschaffenheit erbracht hat.

Mineralogische
Untersuchungen.

Das hier skizzierte Ergebnis der selenographischen Forschung wäre unvollständig, wollte man nicht wenigstens beiläufig auch den Versuchen einige Worte widmen, die darauf hinausgehen, Anhaltspunkte für die Zusammensetzung der mineralischen Stoffe der Mondoberfläche zu gewinnen.

Zunächst ist hervorzuheben, daß die Vergleichsobjekte, wie man vielleicht glauben möchte, durchaus nicht unter den hellen Gesteinen der Erde zu suchen sind. Der Mond ist im Gegenteil ein relativ sehr dunkler Körper. Seine Albedo beträgt 0,13, d. h. seine Oberfläche reflektiert im Mittel nur 13% der auffallenden Sonnenstrahlen. Das entspricht unter irdischen Gesteinen vulkanischer Herkunft etwa der Albedo von Trachyt und Basalt, während unter den Graniten der Quarzporphyr als Vergleichsobjekt an erster Stelle zu nennen wäre. Der Polarisationswinkel der Gesteine der Mondoberfläche deutet allerdings in erster Linie auf die Verwandtschaft mit vulkanischen Gebilden hin. Die mittlere Mondichte (3,4 im Vergleich mit Wasser) läßt an seiner Oberfläche leichte poröse Gesteine, vielleicht von bimssteinartiger Struktur vermuten, so daß alle bisherigen Beobachtungen, so verschiedenartig ihr Ausgangspunkt auch sein mag, sich immer mehr zu einem geschlossenen, wenngleich kosmogonisch wenig interessanten Bilde zusammenschließen: der Mond ist, darüber kann kaum ein Zweifel bestehen, zu einem Schlackenfeld erstarrt, ohne je den Schauplatz einer höher organisierten animalischen Entwicklung gebildet zu haben.

Die Trabanten
der anderen
Planeten.

Durch die großen Dimensionen ihres Trabanten steht die Erde in der Reihe der inneren Planeten völlig vereinzelt da. In der Umgebung des Merkur und der Venus hat man nach der Entdeckung des Fernrohrs und auch später bei jeder bedeutenderen Vervollkommnung seiner optischen Bestandteile vergebens nach einem Begleiter gesucht, und bei Mars hat erst das Jahr 1877 die Entdeckung von zwei winzigen Satelliten gebracht, die sich in ihren Dimensionen auch nicht entfernt mit unserem Monde messen können. Erst die Riesenwelten, die in der fünffachen Erdentfernung von der Sonne beginnen, sind gleichzeitig auch Mittelpunkte von recht bedeutenden Trabantenfamilien. So finden wir mit Jupiter 4 große und 5 kleine, mit Saturn neben dem Ringsystem 8 große und 2 kleine Satelliten kosmisch verbunden. Um Uranus bewegen sich 4, um Neptun 1 großer Mond, doch würde die Entdeckung von weiteren kleinen Satelliten hier keinerlei Überraschungen bringen. In der Verteilung der Begleiter auf die einzelnen Planeten herrscht jedenfalls eine eigenartige Willkür, für die uns vorläufig eine Erklärung fehlt. Tatsächlich ist es bisher keiner Theorie gelungen, auch nur eine Andeutung für die Ursache der Kräfte zu finden, die den einen Planeten mit einer ganzen Schar oder gar wie bei Saturn mit einem Ring von Trabanten, einen anderen

benachbarten dagegen mit wenigen oder nur mit einem Satelliten ausgestattet hat.

Alle Planetentrabanten erscheinen von der Erde, wie kaum besonders betont zu werden braucht, unter einem so kleinen Winkel, daß jede sichere Wahrnehmung von Einzelheiten ausgeschlossen erscheint. Nur einzelne Jupitermonde, die in ihren Dimensionen den Planeten Merkur z. T. an Größe wesentlich übertreffen, scheinen eine deutlichere Oberflächenstruktur zu besitzen, obwohl sich auch hier, wie nicht anders zu erwarten ist, die einzelnen Wahrnehmungen mehrfach widersprechen. Es bleiben somit für die Behandlung der Stellung der Trabanten im Planetensystem lediglich ihre kosmischen Verhältnisse übrig, deren möglichst zusammenhängende Darlegung den Inhalt der nächsten Zeilen bilden soll.

Die geregelten Bewegungsverhältnisse des Sonnensystems finden sich ganz entsprechend auch in seiner Trabantenwelt verkörpert. Hier wie dort erfolgen die Revolutionen nach dem Massen- und Entfernungsgesetz der Newtonschen Gravitation. Der besondere Fall einer fast kreisförmigen Bahnellipse, der nahe übereinstimmenden Neigungen usw. wird auch bei den größeren Trabanten angetroffen, während die in den letzten Jahrzehnten entdeckten kleinen Satelliten, wahrscheinlich auch die einzelnen Teilgebilde des Saturnringes, ähnlich wie die Asteroiden im Planetensystem auch bezüglich ihrer Bahnen eine Sonderstellung einnehmen.

In einer gewissen Hinsicht lassen freilich auch die Trabantenbewegungen einen Rückschluß auf die physische Beschaffenheit der Körper, mit denen sie verbunden sind, zu. Genau ebenso, wie die Bewegungen der Planeten Zahlenwerte für das Gewicht oder die Masse der in der Sonne verkörperten Materie liefern, ebenso gestatten auch die Trabantenbewegungen einen sicheren Rückschluß auf die Masse der von ihnen umkreisten Planeten. Damit erhält man auch für die physische Beschaffenheit derselben Anhaltspunkte, ohne die unsere Vorstellung von diesen Welten eine empfindliche Lücke aufweisen würde. Der in dem dritten Keplerschen Gesetze ausgesprochene mathematische Zusammenhang zwischen den Massen, Abständen und Umlaufzeiten wurde bereits auf Seite 231 mitgeteilt, auch wurde dort als Beispiel die Berechnung der Massen der Erde und des Jupiter ausgeführt.

Massenbestimmung der Planeten aus der Trabantenbewegung.

Unter den Trabanten der inneren Planeten verdienen die Monde des Mars trotz ihrer Kleinheit wegen der eigenartigen Stellung, die sie zum Hauptplaneten einnehmen, ein besonderes Interesse. Mehr als $2\frac{1}{2}$ Jahrhunderte ist der rote, alle zwei Jahre in besonders hellem Glanze am Sternenhimmel leuchtende Planet mit Fernrohren jeder Größe beobachtet worden, ohne daß man die Existenz seiner Monde auch nur geahnt hätte. Einem der älteren optischen Meisterwerke des Amerikaners Clark, dem durch die Entdeckung des Siriusbegleiters bekannt gewordenen Refraktor der Sternwarte in Washington, und dem geübten Auge von Asaph Hall war es vorbehalten, unsere Kenntnisse in dieser Beziehung zu erweitern. Die von Hall im August 1877 entdeck-

Die Marstrabanten.

ten Marstrabanten Phobos und Deimos bilden wegen ihrer Lichtschwäche und ihres geringen Abstandes vom Planeten außerordentlich schwierige Beobachtungsobjekte. Ihre Größe läßt sich lediglich aus der Helligkeit schätzen, und die darauf beruhende Annahme von 10 km für ihren Durchmesser dürfte noch eher zu hoch als zu tief gegriffen sein. 9200 bzw. 23000 km oder 2,7 bzw. 6,7 Marshalbmesser trennen Phobos und Deimos von der Marsmitte, und dieser geringen, noch leicht vorstellbaren Entfernung entsprechend ist auch ihre Bewegung um den Planeten außerordentlich rasch. Sie erfolgt in $7^{\text{h}} 39^{\text{m}}$ bzw. in $1^{\text{d}} 6^{\text{h}} 18^{\text{m}}$, so daß der innere Mond der Rotationsbewegung des Planeten um den dreifachen Betrag vorausseilt. Für einen Marsbeobachter taucht somit dieser Mond als ein heller Stern nicht mit den anderen Gestirnen am östlichen, sondern am westlichen Horizonte auf, um in raschem Laufe die Sphäre ostwärts zu überschreiten. Bei dem zweiten Monde kommt dagegen die Bewegung der Umdrehungszeit des Planeten so nahe, daß er der normalen Bewegung der Sphäre von Osten nach Westen nur langsam folgt; in etwa fünf Marstagen geht Deimos nur einmal auf und unter, während Phobos an jedem Marstage dreimal auf- und untergeht. Unter dem Einfluß dieser Monde muß die Zeitrechnung etwaiger Marsbewohner eine von unserer irdischen ganz abweichende Form angenommen haben, und die Schwierigkeiten unserer Längenbestimmungen aus Mondbeobachtungen würden bei der 90mal rascheren Bewegung des innersten Marstrabanten vollständig wegfallen. Da man nach den Ergebnissen der letzten Jahrzehnte auch bei dem innersten Saturnring und bei einigen spektroskopischen Doppelsternen außerordentlich kurzen Umlaufzeiten begegnet, so kann die geringe Distanz des Phobos als ein besonderer Ausnahmefall im Kosmos nicht mehr gelten.

Die vier alten
Jupitermonde.

Der starke Sprung in den Dimensionen, der sich unter den Planeten zwischen Mars und Jupiter bemerkbar macht, ist auch in ihren Trabantenwelten vorhanden, insofern, als hier auch die winzigsten und die größten Satelliten des Sonnensystems einander gegenüberstehen. Schon als Galilei am 7. Januar 1610 sein primitives Fernrohr auf Jupiter richtete, bemerkte er um den Planeten eine Reihe von vier Sternen, deren mehrtägige Verfolgung keinen Zweifel darüber ließ, daß es sich um Monde handle, die in geordneten Bahnen den Planeten umkreisen. Seitdem haben die vier alten Jupitertrabanten der Astronomie hervorragende Dienste geleistet. Ihre mannigfachen Erscheinungen, insbesondere die Verfinsterungen, können im voraus berechnet und für rohe Längenbestimmungen verwertet werden, ein Gedanke, dessen Ursprung gleichfalls bereits auf Galilei zurückzuführen ist. Die Beobachtung dieser Finsternisse — wohl eines jeden angehenden Astronomen erste Beobachtungstätigkeit am Fernrohr — hat dann die Vorstellung von der unmeßbaren Lichtgeschwindigkeit im Raume zerstört und uns einen ausgezeichneten Maßstab für die Dimensionen der vom Lichtstrahl in der Zeiteinheit zurückgelegten Strecke gegeben, lange bevor noch jemand daran denken mochte, der Frage auf Grund terrestrischer Versuche näherzutreten.

Die kosmischen Verhältnisse, die in der Welt der alten großen Jupitertrabanten herrschen, mögen der besseren Übersicht halber in einer Tabelle Platz finden.

Trabant	Abstand in Jupiterradien	Abstand in km	Umlaufzeit	Durchmesser in km	Helligkeit in Sterngrößen
1.	5,9	427 000	1 ^d 18 ^h 28 ^m	3 950	5,6
2.	9,4	679 000	3 13 14	3 290	5,7
3.	15,0	1 084 000	7 3 43	5 730	5,0
4.	26,4	1 906 000	16 16 32	5 380	6,3

Die Analogien, die beim Vergleich dieser Daten mit den entsprechenden Planetenelementen hervortreten, sind ganz auffällig. Hier wie dort bemerkt man eine gemeinsame Bahnebene der Schwesterwelten, eine Zunahme der Abstände nach einer ähnlichen Regel, schließlich eine deutliche Gruppierung in kleinere und größere Weltkörper, wobei auch der Sinn der Anordnung erhalten bleibt. Die Ähnlichkeit zwischen der Jupiterwelt und dem Sonnensystem, die bereits Galilei auffiel, ist also nicht nur eine rein äußerliche; auch der Werde- und Entwicklungsgang der Haupt- und der Nebenplaneten des Sonnensystems ist ohne Frage nahezu der gleiche gewesen.

Von der wissenschaftlichen Bedeutung der Verfinsterungen der Jupitermonde war bereits vorhin die Rede. Wegen der Größe des Hauptplaneten, wegen seines langen Schattens und vor allem wegen der geringen Neigung der Trabantenbahnen zur Jupiterbahn ereignen sich bei den drei inneren Monden diese Finsternisse regelmäßig während eines jeden Umlaufs; nur der vierte Satellit kann längere Zeit hindurch oberhalb bzw. unterhalb des Jupiterschattens vorübergehen, ohne ihn zu durchqueren. Neben den Finsternissen sind die Vorübergänge der Satelliten und ihrer Schatten vor der Jupiterscheibe sowie die Bedeckungen der Monde durch Jupiter von Interesse, da auch hier lediglich die genaue Zeit der Erscheinung genügt, um die Feststellung der Lage des betreffenden Mondes im Raume, also eine exakte astronomische Positionsbestimmung zu ermöglichen. Die meisten älteren über die Satellitenbahnen des Jupiter gewonnenen Daten sind auch in erster Linie auf dem genannten Wege, weniger durch direkte mikrometrische Messungen erzielt worden.

Keiner der Trabanten erreicht einen scheinbaren Durchmesser von 2'', und es ist daher so gut wie unmöglich, von der direkten Betrachtung der winzigen Scheibchen sich Erfolg in physischer Beziehung zu versprechen, obwohl an einigen großen Instrumenten der Neuzeit, insbesondere am Lickrefraktor, bereits Skizzen der Oberfläche einzelner Jupitertrabanten angefertigt worden sind. Viel eher dürfte eine Verfolgung der, wie man festgestellt hat, ein wenig wechselnden Helligkeitswerte der Trabanten in physischer Hinsicht Resultate versprechen. Schon die mit den Durchmessern nicht harmonisierenden Sterngrößenwerte zeigen, daß die physische Konstitution der Monde nicht die gleiche ist. Aus gewissen Helligkeitsänderungen, die zweifels-

frei nachgewiesen sind, läßt sich fernerhin ein Schluß darauf ziehen, daß die Jupitermonde eine Rotation haben, die, ähnlich wie beim Trabanten der Erde, mit der Revolutionszeit, übereinstimmt.

Die neuen
Jupitermonde.

Eine besondere Stellung nehmen im Jupitersystem die neuen in den letzten Jahrzehnten entdeckten kleinen Monde ein, deren Entfernungs- und Bewegungsverhältnisse die nachstehenden Zahlenwerte veranschaulichen:

Trabant	Abstand in Jupiterradien	Abstand in km	Umlaufzeit	Helligkeit in Sterngrößen	Entdeckungsjahr
5.	2,5	184 000	0 ^d 11 ^h 57 ^m	13	1892
6.	160	11 570 000	251 ^d	14	1904
7.	167	12 070 000	265	16	1905
8.	330	23 860 000	739	16	1908
9.	345	24 900 000	800	19	1914

Abgesehen vom 5. Monde, dem man im Jupitersystem eine ähnliche Rolle zuschreiben könnte wie dem Merkur unter den Planeten, ist die Stellung der vier äußersten Trabanten völlig abnorm und durch die ungeheure Entfernung und die damit verknüpfte lange Umlaufzeit gekennzeichnet. Tatsächlich war man auch bezüglich des 8. Mondes längere Zeit im unklaren, ob man es mit einem kleinen Planeten oder

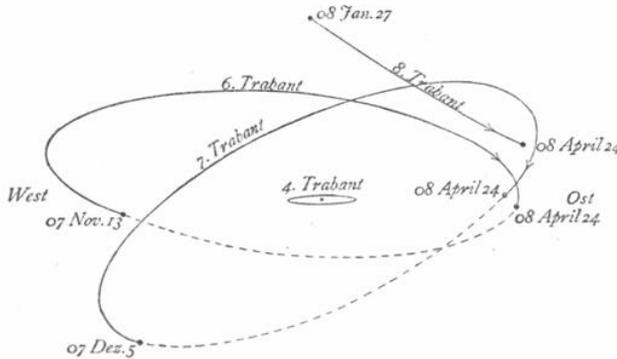


Fig. 24. Bahnlage des 4., 6., 7. und 8. Jupitermondes 1907—1908.

einem Begleiter des Jupiter zu tun habe. Die Schwierigkeit, die dabei vorlag, wurde noch durch den Umstand vergrößert, daß dieser Mond eine rückläufige Bewegung zeigt, und daß infolge seines großen Jupiterabstandes die Bewegung der Erde im Raume seine scheinbare Stellung von Jupiter abweichend beeinflusst, so daß die fortlaufenden Beobachtungen eine sehr komplizierte, mit dem Zentralkörper scheinbar gar nicht mehr zusammenhängende Bewegung dieses Satelliten unter den Sternen ergaben (Fig. 24). Auch kosmogonisch wird man den vier äußersten Trabanten eine Sonderstellung einräumen müssen. Nachdem durch die Beobachtungen der letzten Jahre die Grenzen des Asteroidenringes schon ein wenig über die Jupiterbahn hinaus ausgedehnt worden sind, hätte der Gedanke an die dauernde oder vorübergehende Gefangennahme eines kleinen Planeten durch Jupiter sehr viel Wahrscheinlichkeit für sich, wenn nicht auch der äußerste Saturntrabant in dieselbe Kategorie von Planetenbegleitern einzureihen wäre. Die Vermutung läßt sich also vorläufig nicht ohne weiteres in bejahendem Sinne entscheiden.

Die Monde des
Saturn.

Mehrere Jahrzehnte hindurch bildeten die Jupitertrabanten neben dem Erdbegleiter die einzigen bekannten Satellitenwelten im Sonnensystem. Die

größte Merkwürdigkeit des nächsten Planeten, der Ring des Saturn, hatte nach Erfindung des Fernrohrs so lange die ausschließliche Aufmerksamkeit der Beobachter in Anspruch genommen, daß erst Huygens, zu einer Zeit, als die Ringe nur in Gestalt dünner Lichtfäden den Planeten kreuzten (1655), auf den hellsten Saturnmond Titan aufmerksam wurde. Während der nächsten beiden Perioden der Unsichtbarkeit der Ringe fand dann Cassini zwischen 1670 und 1685 vier weitere Monde, zu denen schließlich durch die sorgfältigen Nachforschungen Herschels und Bonds im 18. und 19. Jahrhundert drei weitere hinzukamen. Die wichtigsten Bewegungsverhältnisse dieser acht sowie der neuerdings hinzugekommenen zwei neuen Trabanten sind ähnlich wie bei Jupiter in der nachstehenden Übersicht wieder tabellarisch zusammengestellt:

Trabant	Abstand in Saturnradien	Abstand in km	Umlaufszeit	Helligkeit in Sterngrößen
Mimas	3,1	181 000	0 ^d 22 ^h 37 ^m	13
Enceladus	3,9	232 000	1 8 53	12
Tethys	4,9	288 000	1 21 18	11
Dione	6,2	369 000	2 17 41	11
Rhea	8,7	515 000	4 12 25	10
Titan	20,2	1 193 000	15 22 41	9
Themis	24,2	1 427 000	20 20 24	18
Hyperion	24,5	1 445 000	21 6 38	14
Japetus	58,9	3 476 000	79 7 56	11
Phoebe	214,4	12 650 000	550 10 35	17

Themis und Phoebe, die beiden neuen photographisch entdeckten Monde, weisen jeder für sich besondere Eigentümlichkeiten auf, der erste insbesondere dadurch, daß er nahezu in der Bahn des Hyperion seinen Weg um Saturn beschreibt, der letzte durch den großen Abstand und eine rückläufige Bewegung, die ihm eine genau analoge Stellung im Trabantensystem des Saturn einräumt, wie sie auch der äußerste Begleiter des Jupiter innehat. Aber auch die älteren Monde bieten theoretisch für den Astronomen außerordentlich viel Interessantes, in erster Linie durch die Störungen, die sie aufeinander ausüben. Man überzeugt sich leicht, daß z. B. die doppelte Umlaufszeit des Mimas der Revolution des Tethys gleichkommt. Verdoppelt man in gleicher Weise die Umlaufszeit des Enceladus, so kommt man auf die Revolutionsdauer der Dione usf. Die vier inneren Monde, die übrigens mit dem fünften genau die gleiche Bahnebene teilen, zeigen also ein sog. kommensurables Umlaufsverhältnis; ihre gegenseitigen Stellungen zueinander und damit auch ihre gegenseitigen Störungen wiederholen sich bereits nach wenigen Umläufen, wodurch eine Summierung der gegenseitigen Anziehungswirkungen und damit auch starke Änderungen der Bahnelemente hervorgerufen werden.

Die bei den Jupitertrabanten wahrgenommenen Helligkeitsänderungen treten im Saturnsystem z. T. noch auffälliger hervor. Besonders merkwürdig und schon von Cassini im 17. Jahrhundert festgestellt ist der Lichtwechsel

des Japetus, der bei westlicher Elongation die größte, bei östlicher die geringste Helligkeit aufweist. Der Betrag der Änderung umfaßt 1,7 Größenklassen, so daß die Oberfläche dieses Mondes zwei durch große Albedover-schiedenheit getrennte Halbkugeln aufweisen dürfte. Da die Periode der Lichtänderungen mit der Umlaufszeit vollständig übereinstimmt, so kann es kaum einem Zweifel unterliegen, daß Japetus dem Saturn genau ebenso wie unser Mond der Erde stets dieselbe Seite zukehrt.

Der Ring.

Der merkwürdigste Begleiter des Saturn ist ohne Frage sein Ring oder vielmehr die Schar von Ringen, die ihn umgibt. Es ist bereits S. 285 angedeutet worden, daß diesem Ring nur äußerlich in der Welt der Nebenplaneten eine Sonderstellung zukommt, da er in Wirklichkeit aus einer ungeheuer großen Trabantenschar besteht. Dieses System von äußerst flachen Ringen, das den Planeten in seiner Äquatorialebene umgibt, hat Galilei und seinen Nachfolgern viel Kopfzerbrechen bereitet, da die ersten unvollkommenen Instrumente des 17. Jahrhunderts von der räumlichen Lage des Ringes keine richtige Vorstellung gaben, sondern ihn

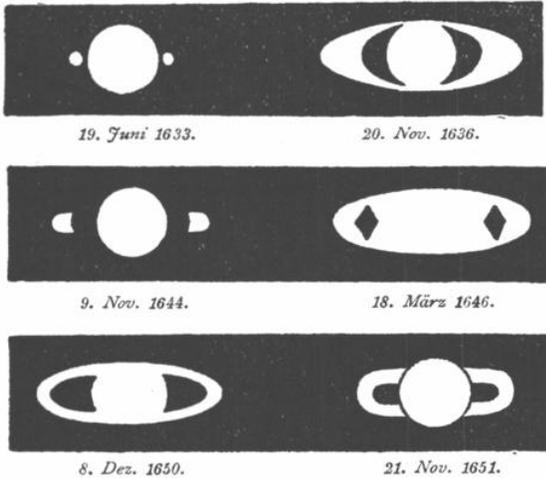


Fig. 25. Zeichnungen des Saturn aus dem 17. Jahrhundert.

in Henkelform, am Planeten gleichsam festsitzend, abbildeten. In Fig. 25 sind nach einer Abbildung in Gassendis gesammelten Werken die merkwürdigen Formen wiedergegeben, in denen sich diesem Beobachter Saturn zwischen 1633 und 1651 darstellte.

Selbst in einer Zeit, in der kosmische Überraschungen an der Tagesordnung waren, mochte niemand an einen freischwebenden und doch den im Raume fortschreitenden Planeten dauernd begleitenden Ring denken. Hierzu kam eine in Wirklichkeit scheinbare, zunächst aber für wirklich gehaltene periodische Veränderung im Anblick des Ringes, die uns heute vollkommen natürlich erscheint, damals aber selbst auf so klare Geister wie Galilei geradezu verblüffend wirkte. Die bis dahin wiederholt beobachteten Anhängsel des Planeten verschwanden nämlich 1612 vollständig, um dann bald wiederzuerscheinen, ein Phänomen, das sich während eines Saturnumlaufs zweimal wiederholt, jedoch vor der Erkenntnis der Ringnatur der Henkel mit Recht für paradox erklärt wurde und dem Florentiner Astronomen einen Teil der Entdeckerfreude geraubt zu haben scheint.

Die Lösung des Saturnrätsels verdanken wir Huygens, der um 1654, also ein halbes Jahrhundert nach Entdeckung des Fernrohrs, endlich feststellen konnte, „daß Saturn von einem freischwebenden dünnen, gegen die Ekliptik

geneigten Ringe umgeben sei“. Genau ebenso, wie die Erde infolge ihrer Achsenneigung beim Umlauf um die Sonne dieser im Sommer den Nord-, im Winter den Südpol zukehrt, ebenso erblicken wir Erdbewohner — für den fernen Saturn die nächsten Nachbarn der Sonne — infolge der Achsenneigung des Planeten von 28° bald seinen Nord-, bald seinen Südpol, d. h. es ist uns damit auch in der einen Hälfte des Umlaufs die nördliche, in der anderen die südliche Fläche des Ringes zugeneigt. Während einer kurzen dazwischenliegenden Zeit ist von dem Ring nur die Kante sichtbar, die so dünn ist, daß sie dann, wie zur Zeit Galileis und zuletzt 1907, auf mehrere Wochen ganz verschwindet.

Von Huygens bis in die neueste Zeit hinein haben die Astronomen dem Saturnring ihre besondere Aufmerksamkeit zugewendet. Im Jahre 1675 glückte zunächst Cassini der sichere Nachweis einer Trennungslinie zwischen einem schmalen äußeren Ring A und einem breiteren inneren B. Das folgende, 18. Jahrhundert, in dem die physische Planetenkunde überhaupt stark vernachlässigt wurde, brachte auch bei Saturn keine neuen Ergebnisse. Erst im Jahre 1837 bemerkte Encke einen weiteren feinen Schattenriß auf dem Ring A, doch ist bis heute noch nicht entschieden, ob diese zarte, zuweilen nur schwer sichtbare Linie eine wirkliche Unterbrechung im Sinne der Cassinischen Spalte ist. Auch auf dem Ring B stellte man bald einige Einzelheiten fest, insbesondere einen starken Helligkeitsabfall nach dem Planeten zu. An der Stelle, wohin alle bisherigen Beobachter die innere Kante des Ringes versetzten, fand endlich Bond in Cambridge (Mass.) um 1850 einen dritten Ring C, der relativ sehr matt und dunkel ist und daher auch als Flor- oder Kreppring bezeichnet wird. Er ist von dem Nachbarring B nur durch einen Sprung in der Helligkeit, wahrscheinlich aber durch keine räumliche Lücke getrennt (Fig. 21).

Die Summe der Ringbreiten entspricht etwa dem äquatorialen Planetenhalbmesser und beträgt genauer 68000 km. Auf Ring A entfallen hiervon 18000, auf die Cassinische Trennung 3500, auf den Ring B 29000, auf C 17500 km. Die Dicke des flachen Ringsystems ist tatsächlich unmeßbar klein, und in den Zeitmomenten, in denen die Ringebene genau durch die Erde ging, hat man auch in großen Fernrohren den Planeten vollkommen ringlos beobachtet. Hieraus läßt sich vielleicht nur der Schluß ziehen, daß die Dicke des Ringes den Betrag von 100 km kaum erreichen dürfte.

Zu dem Rätsel, das der Saturnring als solcher den ersten Beobachtern am Fernrohr bot, gesellte sich im 18. Jahrhundert ein neues, als man anfang, die Daseinsbedingungen dieses eigentümlichen Planetenschmuckes etwas genauer zu prüfen. Im Weltall sind alle stabilen Erscheinungen der Körper in erster Linie durch ihr Massen- und Entfernungsverhältnis bedingt. Man folgerte somit ganz richtig, daß sich schon aus dem ungestörten Bestehen der Ringe auf theoretischem Wege Anhaltspunkte über den Aggregatzustand dieser Gebilde gewinnen lassen mußten. „Wenn man“, so bemerkt Clerk Maxwell, „jenen großen über dem Äquator des Planeten ohne sichtbaren Zusammenhang

Physische
Beschaffenheit
des Saturn-
ringes.

ausgespannten Bogen einmal wirklich gesehen hat, so kommt der Geist nicht wieder zur Ruhe. Wir können nicht einfach erklären, daß es sich so verhält, und ihn als eine Beobachtungstatsache der Natur beschreiben, die keine Deutung zuläßt oder verlangt. Wir müssen entweder seine Bewegung nach den Prinzipien der Mechanik erklären oder eingestehen, daß im Bereiche der Saturnwelt eine Bewegung nach Gesetzen vor sich geht, die zu entschleiern wir nicht imstande sind.“

Es ist sehr merkwürdig, daß bereits einer der ersten ernsteren Saturnbeobachter, der bereits mehrfach genannte Cassini, wenigstens in Form einer Hypothese die Möglichkeit der Trabantennatur der Ringe aussprach, doch scheint die nur beiläufig zum Ausdruck gebrachte Vermutung allmählich vergessen worden zu sein, da selbst die kräftigsten Instrumente des 18. und 19. Jahrhunderts den Ring zwar ein wenig abgeschattiert, aber sonst völlig strukturlos zeigten. Aufmerksame Beobachtungen ergaben allerdings schon frühzeitig einige Anzeichen für eine meteorische Konstitution des Ringes. Um die Zeit des Durchganges der Ringebene durch die Erde bemerkte man in dem dann fadenförmigen Bilde der Ringe Lichtfaden, der die Kugel durchquerte, gewisse Unregelmäßigkeiten von sehr veränderlicher Form. Die Enckesche dunkle Linie sowie die Helligkeitsabstufungen der Ringe schienen trotz der Schwierigkeit der Beobachtungen gleichfalls einem Wechsel zu unterliegen. Schließlich wurde der dunkle, halb durchsichtige innere Flurring aufgefunden und mit ihm ein Beweis gegen die feste Natur wenigstens dieses Gebildes geliefert. Alle diese Argumente konnten jedoch nicht eher zur Geltung kommen, bis theoretisch und praktisch die Unmöglichkeit eines festen, einen Planeten frei umschwebenden Ringes erwiesen war.

Theoretische
Untersuchungen
über die Stabili-
tät des Ringes.

Die Untersuchungen, die in dieser Beziehung von Laplace, Roche, Maxwell und Hirn angestellt worden sind, bezogen sich auf die Stabilitätsverhältnisse des im Saturn uns von der Natur gegebenen Beispiels. Zwar wurde hier z. T. auf gänzlich verschiedenen Wegen der Nachweis geführt, daß die bestehenden Naturgesetze ausschließlich auf einen meteorischen Saturnring führen, doch boten diese Arbeiten trotz ihres hohen Wertes der Praxis zunächst keinen Weg, auf dem eine Entscheidung zu erreichen war. Erst das Studium der Beleuchtungsverhältnisse im Saturnsystem, das wir Seeliger verdanken, brachte die Frage ihrer Lösung um einen Schritt näher. Da der Ring auf alle Fälle sein Licht von der Sonne erhält, so muß ja zunächst seine Gesamthelligkeit sich stets mit der Stellung des Planeten zum Tagesgestirn in Verbindung bringen lassen. Ein flacher, einheitlich fester Ring wird aber dabei sich anders verhalten als ein dichter Meteorkranz, bei dessen Beleuchtung sich sofort die Wirkung der Phase, der gegenseitigen Beschattung usw. geltend macht. Es war also lediglich nötig, die Abhängigkeit der Gesamthelligkeit des Saturn von der Ringöffnung für die beiden Hypothesen festzustellen und an dem vorhandenen Material die Gültigkeit der einen oder der anderen Annahme nachzuweisen. Da das Ergebnis keinen Zweifel darüber ließ, daß die Beobachtungen nur mit einem Staubring in Einklang zu

bringen sind, so war damit für die Fachwelt die Angelegenheit so gut wie entschieden.

Ein endgültiger, auch für weitere Kreise verständlicher Nachweis für die meteorische Konstitution des Saturnringes ist dann um die letzte Jahrhundertwende durch Anwendung des Dopplerschen Prinzips erzielt worden, womit auch für die bis dahin unentschiedene Rotation des Ringsystems numerische Zahlenwerte gewonnen worden sind. Die spektroskopischen Aufnahmen, die Keeler, Deslandres und Belopolski von Saturn und dessen Ring um 1895 ausgeführt haben, ließen zweifellos erkennen, daß der Ring eine Bewegung um den Hauptplaneten ausführt, jedoch nicht mit unveränderlicher Winkelgeschwindigkeit, wie sie noch Herschel annahm und ein fester Ring auch besitzen müßte. Die lineare Bewegung der einzelnen Ringteilchen erwies sich vielmehr als um so größer, je näher diese dem Planeten stehen; jedes Ringelement vollführt mithin um Saturn eine eigene Bewegung, was nur möglich ist, wenn der Ring aus einzelnen, getrennten Bestandteilen zusammengesetzt ist. Die beobachtete Ortsänderung entspricht dabei vollkommen den Anforderungen des 3. Keplerschen Gesetzes, so daß man jetzt für jeden Punkt des Ringsystems die zugehörige Umlaufgeschwindigkeit im voraus berechnen kann. In guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Bewegungen im Visionsradius findet man für die Revolution der äußersten Randzone des Ringes 14^h bis 15^h , während die innersten Teilchen des untersuchten hellen Ringes schon in 7^h bis 8^h den Planeten umkreisen. Für die Innenkante des dunklen Florrings darf eine etwa doppelt so rasche Bewegung angenommen werden wie für die darunter befindlichen Teile der Planetenoberfläche, wodurch sehr ähnliche Verhältnisse geschaffen sind wie beim ersten Marssatelliten.

Direkter
Nachweis der
meteorischen
Zusammen-
setzung.

Wie man einsehen wird, hat die Ergründung der Natur des Saturnringes diesem einzigartigen Gebilde in unserem Planetensystem die alte Bedeutung, die ihm die Kant-Laplacesche Hypothese als Vorläufer der Satellitenbildung zuschrieb, entzogen. Nach unseren heutigen Kenntnissen ist der Ring nicht als ein Urstadium künftiger Monde, sondern als eine den anderen Begleitern Saturns ebenbürtig zur Seite stehende, vollständig entwickelte große Trabantenfamilie anzusehen. Die einstige Entstehung dieses flachen Meteorgürtels, der uns den Eindruck eines Ringes vortäuscht, ist natürlich heute noch ebenso unklar wie die Bildung der ihm im Wesen ähnlichen, wenngleich viel dünner gesäten Asteroidengruppe zwischen Mars und Jupiter.

Gegenüber den interessanten Verhältnissen im Bereiche der Satellitenwelt von Jupiter und Saturn erwecken die Monde der beiden äußersten Planeten nur noch ein beschränktes Interesse. Von den im Laufe der Zeit durch Herschel und Lassell aufgefundenen Trabanten des Uranus sind vier gesichert; ihre Zahl ist trotz eifriger Nachforschungen durch neue Schwesterwelten nicht bereichert worden. Sie sind sämtlich merklich kleiner als der Erdmond und zeigen entsprechend der bedeutenden Masse des Uranus trotz ihres z. T. größeren Abstandes vom Zentralkörper durchweg kürzere Umlaufzeiten:

Die Uranus-
monde.

Trabant	Abstand in Uranusradien	Abstand in km	Umlaufzeit
Ariel	7,0	177 000	2 ^d 12 ^h 29 ^m
Umbriel	9,9	249 000	4 3 28
Titania	16,1	405 000	8 16 56
Oberon	21,5	542 000	13 11 7

Die Bewegung dieser Monde erfolgt rückläufig, und zwar in einer Ebene, die die Uranusbahn unter 98° , also nahe senkrecht, schneidet. Im Gegensatz zu den sonstigen scheinbaren Bewegungen der Satelliten, die wir ausschließlich in starker Projektion zu sehen und zu beobachten gewohnt sind, erblickt man somit die Bahnen der Uranusmonde während des 84jährigen Umlaufs des Planeten zweimal in senkrechter Aufsicht, ähnlich wie bei einigen Doppelsternen, deren Bahnen lotrecht auf der Blickrichtung stehen. Auf die Übereinstimmung in der Rotationsrichtung des Uranus und der Umlaufbewegung seiner Monde ist bereits früher kurz hingewiesen worden.

Der Trabant
des Neptun.

Einen Satelliten von recht ansehnlicher Größe, die etwa den Dimensionen unseres Erdmondes nahekommen mag, weist noch der letzte Planet des Sonnensystems, Neptun, auf. Der Neptuntrabant hat von seinem Zentralkörper einen Abstand von 15 Radien oder rund 454 000 km und vollzieht seinen Umlauf in $5^d 21^h 2^m$. Ein großer Teil der für die Bahnbestimmung erforderlichen Messungen dieses schwachen Lichtpüchchens, das Neptun auf seiner weiten Reise um die Sonne dauernd begleitet, ist photographisch ausgeführt worden, schon aus dem Grunde, weil der Trabant auf die photographische Platte merklich intensiver einwirkt als bei visueller Beobachtung auf das Auge. Da bei Neptun eine solche Abweichung des photographischen vom visuellen Helligkeitswerte nicht besteht, ist damit ein gewisser Unterschied der physischen Beschaffenheit zwischen Planet und Mond erwiesen.

IV. Die physische Beschaffenheit der Kometen. Mit den Kometen, die von Zeit zu Zeit gänzlich unerwartet, zuweilen in erschreckend großer Gestalt, doch stets nur für wenige Wochen sichtbar, am Himmel auftauchten, wußte das ganze Altertum und Mittelalter nichts anzufangen. Nach der Lehre des Aristoteles, die bis ins 17. Jahrhundert Geltung behielt, waren die Kometen keine Himmelskörper, unter die sie sich wegen ihres unregelmäßigen Erscheinens ja auch sehr schwer einreihen ließen, sondern Ausdünstungen der Erde, die sich in den höchsten Schichten der Atmosphäre entzündeten. Dieser Auffassung lag eine durchaus zutreffende Beobachtung zugrunde. Die Haupteigentümlichkeit der Kometen besteht nämlich in dem stets von der Sonne abgewandten Schweife. Da sich nun die Kometen in ihrem größten Glanze nur in nächster Nähe der Sonne zeigen, so werden die auffälligsten Erscheinungen des Abends kurz nach Sonnenuntergang und des Morgens kurz vor Sonnenaufgang zu sehen sein, und zwar wird dann nach dem eben ausgesprochenen Gesetze der Schweif stets von der unter dem Horizont stehenden Sonne weg, d. h. nach oben gerichtet sein, wodurch ganz naturgemäß eine

gewisse Ähnlichkeit mit einer aufsteigenden Flamme (Fig. 26) hervorgerufen wird.

Bei dem das ganze Altertum beherrschenden Glauben an himmlische Vorzeichen mußten, wie schon im ersten Abschnitte dieses Werkes ausgeführt wurde, selbstverständlich auch die oft überwältigend großartigen Kometenerscheinungen als besonders eindringliche Verkünder der Zukunft aufgefaßt werden, und zahllose Schriften beschäftigten sich mit der Deutung dieser Himmelszeichen. Aber auch dieser Aberglaube hat sein Gutes gehabt. Er bewirkte, daß die auffälligen Kometenerscheinungen, allerdings zum Teil phantastisch ausgeschmückt, aber doch im allgemeinen nach Ort und Zeit zutreffend, in den Chroniken verzeichnet wurden und uns auf diese Art überliefert worden sind. Für zahlreiche der älteren Kometen sind diese Berichte ausreichend gewesen, um wenigstens näherungsweise eine Berechnung ihrer Bahn zu ermöglichen. So ist es z. B. gelungen, die Erscheinungen des Halley'schen Kometen lückenlos bis zum Jahre 989, mit einigen Unterbrechungen sogar bis in das 2. Jahrhundert v. Chr. zurück zu verfolgen.

Trotz einer ganzen Anzahl durchaus neuzeitlich anmutender Anschauungen über die Kometen, die wir schon im Altertum bei dem Dichter Manilius, bei Seneca u. a. vorfinden, enthalten die älteren astronomischen Bücher, insbesondere die Werke von Ptolemäus und Kopernikus über die Kometen noch nicht das Geringste. Erst der Nachweis einer sehr kleinen Parallaxe, den die Messungen von Regiomontanus, Tycho und Kepler für einige Kometen erbrachten, sicherte ihnen die kosmische Stellung. Damit war nach Lösung der komplizierten Planetenbewegung im Sinne der kopernikanischen Theorie auch die Erforschung und Berechnung der Kometenbahnen nur noch eine Frage der Zeit geworden, und schon die nächsten helleren, längere Zeit sichtbaren Schweifsterne mußten in dieser Beziehung die Entscheidung bringen.

Im vorhergehenden Abschnitt wurde die Entwicklung der Bahnbestimmung der Kometen von der ersten durch Hevelius ausgesprochenen Hypothese einer parabolischen Bahnkrümmung bis zu der endgültigen Lösung des

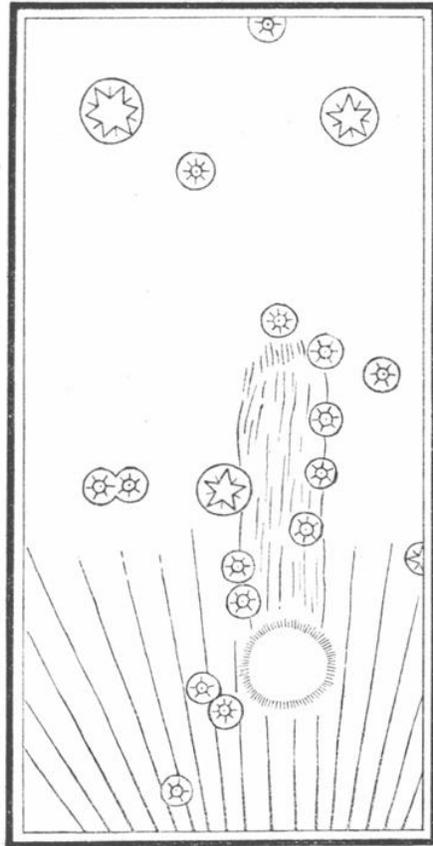


Fig. 26. Halley'scher Komet im Jahre 1066 nach seinem Austritt aus den Sonnenstrahlen (nach Lubieniecki, *Theatrum Cometicum*).

Ältere
Anschauungen
über die
Kometen.

Problems durch Dörfel, Newton und Halley eingehend behandelt. Nachdem die kosmische Stellung der Kometen hierdurch festgestellt war, wandte sich auch ihrer physischen Erforschung größeres Interesse zu. Diese hat jedoch große Schwierigkeiten bereitet und den Astronomen manche Rätsel aufgegeben, deren Lösung auch heutigentags noch nicht in allen Einzelheiten gelungen ist.

Gegenüber der individuellen Behandlung aller anderen Weltkörper ist man bei den Kometen mit den wenigen Ausnahmen der durchweg lichtschwachen periodischen Schweifsterne auf eine summarische Beschreibung ihrer Eigentümlichkeiten angewiesen. Nicht etwa, als ob alle Kometen im wesentlichen dasselbe Aussehen zeigten. Im Gegenteil, jeder Schweifstern bildet nicht nur durch seine Bahnelemente, sondern auch durch seine physischen Eigentümlichkeiten ein Individuum für sich, und gerade die Fülle des Materials verhindert eine selbständige Behandlung der Erscheinungen, die er während seiner kurzen, sich vielleicht erst nach Jahrtausenden wiederholenden Gastrolle im Sonnensystem dem Beschauer dargeboten hat.

Aussehen
der Kometen.

Was uns bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts von physischen Erscheinungen der Kometen überliefert worden ist, bezieht sich ausschließlich auf die Größe und Gestalt der Schweife. Läßt man die älteren, durch die Phantasie der Beobachter verunstalteten Darstellungen außer Betracht, so lassen die Beschreibungen und Abbildungen so gut wie gar keine physikalische Schlußfolgerung zu. Man kann aus ihnen lediglich entnehmen, daß, solange Kometen überhaupt beobachtet worden sind, ihre Schweife von der Sonne abgekehrt waren und ihre größte und schönste Entfaltung um die Zeit des Durchgangs des Gestirns durch die Sonnennähe zeigten. Es werden daneben noch ein- und mehrfache, gerade und gekrümmte, glatte und gestreifte Schweife erwähnt, jedoch fast durchweg in einer Form der Darstellung, die jede weitere Verwertung der Angaben so gut wie ausschließt. Der wissenschaftliche Unwert dieses älteren Materials fällt jedoch nicht allzusehr ins Gewicht. Solange die Beobachtungen ausschließlich auf den Anblick der Kometen im Fernrohr und die zeichnerische Darstellung beschränkt waren, konnte bei der Schwierigkeit aller direkten visuellen Wahrnehmungen an eine tiefere Ergründung der physischen Konstitution dieser Gestirne nicht gedacht werden. Selbst so glänzende Erscheinungen des vergangenen Jahrhunderts, wie die Kometen von 1811, 1843, 1858 und 1861, gingen vorüber, ohne zunächst unsere Kenntnisse über das Wesen dieser Gestirne merklich bereichert zu haben.

Wie seltsam uns auch die Berichte über die Kometenfurcht vergangener Jahrhunderte anmuten mögen, so unterliegt es doch keinem Zweifel, daß die Entwicklung eines großen Kometen noch heute das merkwürdigste Phänomen darstellt, das uns die Natur am gestirnten Himmel darzubieten vermag. Zur Bildung der Planeten und Monde haben sicher Äonen von Jahren gehört, und selbst die Geschichte der obersten Schichten des Erdkörpers zählt nach Jahrmillionen; hier entfaltet sich dagegen oft schon innerhalb weniger

Tage ein Gestirn zu einer alle Augen auf sich lenkenden Erscheinung. Bei seiner Entdeckung als teleskopischer Komet war der Ankömmling oft lediglich im Fernrohr und auch da nur als ein kleiner Nebel mit zentraler Verdichtung sichtbar. Bei wachsender Annäherung an die Sonne hat sich jedoch das Bild völlig verändert. Der Kern und die ihn umgebenden Nebelhüllen haben eine schärfere Begrenzung erhalten, und es tritt der sog. Kopf des Kometen deutlich hervor, aus dem nebelartige Materie nach der Sonne hin ausströmt, doch, von einer eigenartigen von der Sonne ausgehenden Kraft abgestoßen, sofort wieder in der von der Sonne abgewandten Richtung in den Raum hinausfliegt. Der undeutliche verwaschene Nebel hat sich also unter dem Einfluß der Sonne in einen planetenartigen runden oder elliptischen Körper verwandelt. Dieser Körper bildet den Abschluß eines weiten Nebelrohrs, dessen Achse in der Ebene der Kometenbahn liegt und von der Sonne fortgerichtet ist. Untersucht man die Herkunft dieses Nebelrohrs, das uns als Schweif erscheint, etwas genauer, so findet man, daß es seinen Ursprung aus dem Kern selbst nimmt. Die Materie, die den Schweif zusammensetzt, wird nicht nur desto heller, je mehr wir uns dem Kern nähern; sie gewinnt hier auch eine bestimmtere Skulptur in der Form von Hüllen oder fächerförmigen Ausströmungen, die aus dem Kern ihren Ausgang nehmen. Es kann keinem Zweifel unterliegen, daß Hülle und Schweif ein materielles Auflösungsprodukt des eigentlichen Kerns darstellen und für den Kometen selbst unwiederbringlich verloren gehen. Treffend hat man die Schweife mit dem Dampf oder Rauch einer fahrenden Lokomotive verglichen; sie erscheinen wie dieser mit dem Ursprungsherd dauernd verbunden, stellen jedoch in jedem Augenblick eine vergängliche Neubildung dar.

Die für das Auge meist homogene Gestaltung der Kometenschweife verschwindet übrigens in der Regel, wenn man zum genaueren Studium dieser Gebilde die lichtempfindliche Platte verwendet. Hier hat die Photographie in überraschend kurzer Zeit eine hervorragende Bedeutung erlangt, denn ähnlich wie die Nebelflecke enthalten auch die meisten Kometen in erster Linie photographisch wirksame Strahlenarten. Da der Effekt durch eine ausgedehnte Expositionsdauer noch verstärkt werden kann, so ist es möglich, mit den Instrumenten der Neuzeit alle Einzelheiten des Kometen von der Struktur der Kopfumgebung bis zu den feinsten Fasern des Schweifendes photographisch festzuhalten. Die in der Erforschung der Nebelflecken so erfolgreichen Spiegelteleskope haben auch hier eine ungeahnte Fülle von Einzelheiten ans Licht gebracht, so daß die wenig auffälligen Kometenerscheinungen der letzten Jahre uns mehr offenbart haben als alle früheren Jahrhunderte zusammengenommen.

Photographische
Aufnahmen.

Nur selten entsprechen diese Kometenphotographien dem gleichzeitigen direkten Anblick im Fernrohr. Im allgemeinen tritt der Schweif auf dem Plattenbilde wesentlich deutlicher hervor, er stellt auch hier ein ungleich komplizierteres Gebilde dar, das sich aus ganzen Büscheln von geradlinig und gekrümmt, zuweilen sogar wellenartig verlaufenden Strahlen der Kopf-

materie zusammensetzt. In kurzen Zeitabständen aufgenommene Photogramme lassen stärkere Kerneruptionen noch längere Zeit hindurch im Schweif verfolgen und die räumliche Bewegung der ausgestoßenen Materie ableiten. Diese photographischen Bilder ähneln zuweilen ganz auffallend strömenden Rauchwolken und erinnern durch ihre phantastische Gestalt oft an die vergilbten Kometenzeichnungen vergangener Jahrhunderte.

Größe und
geringe Masse
der Kometen.

Die Dimensionen der Kometen, ihrer Köpfe und Schweife grenzen oft ans Fabelhafte. In dem Kopf des berühmten Kometen von 1811 hätten, um nur ein Beispiel zu nennen, rund 350 Kugeln von der Größe des Jupiter Platz gehabt, und sein Schweif erstreckte sich mindestens über einen Raum, der dem Abstände Sonne — Erde, also 150 Millionen km, gleich kam. Um so merkwürdiger ist es, daß diese riesigen Weltkörper in Wirklichkeit kaum mehr als ein „sichtbares Nichts“ darstellen. Im Sinne der Gravitation erscheinen sie vollständig masselos, und bei Bedeckungen lassen sie das Licht der Sterne völlig ungebrochen und ungedämpft hindurch. Selbst ihre Kerne zeigen, wo sich Gelegenheit zu entsprechenden Beobachtungen bietet, noch eine Durchsichtigkeit, die angesichts des oft sehr beträchtlichen Glanzes geradezu verblüffend wirkt. Wenn ein Komet, wie derjenige von 1882, unmittelbar neben der Sonne am hellen Tage sichtbar ist und beim Eintritt vor die Sonnenscheibe vollständig verschwindet, wenn der Lexellsche Komet von 1770 oder der fünfte Komet von 1889 die Schar der Jupitertrabanten durchqueren, ohne hier auch nur die geringste Störung hervorzurufen, so übersteigt der geringe Grad der optischen und mechanischen Dichte dieser Himmelskörper tatsächlich jede Vorstellung. Alle bisherigen Versuche, die Masse eines Kometen aus optischen Eigentümlichkeiten oder aus Störungswirkungen zu bestimmen, sind vollkommen gescheitert.

Nachdem Schiaparelli im Jahre 1866 auf die enge Verwandtschaft zwischen den größeren Meteorschauern und einigen Kometen hingewiesen hatte, sowie nach der klassischen Bestätigung der Theorie durch die stufenweise Auflösung des Bielaschen Kometen in einen Sternschnuppenschwarm glaubte man bereits der Lösung des Kometenrätsels sehr nahe zu sein. Tatsächlich ist nach jenen Feststellungen kaum eine andere Schlußfolgerung möglich, als daß die Kometen, zum mindesten ihre Kerne, aus Meteoriten bestehen. Solange ein Komet noch teleskopisch erscheint und sich in größerem Abstände von der Sonne befindet, entspricht auch sein Aussehen durchaus dieser Annahme. Man braucht sich dann nur die Einzelteilchen in genügend großen Abständen vorzustellen, um auch die geringe Masse der Kometen verständlich zu finden. Die Veränderungen, die diese Gestirne bei größerer Annäherung an die Sonne erleiden, sind jedoch so elementar, so katastrophenartig, daß hier nur die sorgfältigste schrittweise Untersuchung aller vorkommenden Phänomene zum Ziele führen kann.

Photometrische
Untersuchungen.

Beginnen wir mit der scheinbar einfachsten Erscheinung, der Lichtzunahme bei der Annäherung und der Lichtabnahme eines Kometen bei seiner Entfernung von Sonne und Erde, so stößt man schon hier auf eine große

Schwierigkeit, insofern, als sich der zuverlässigen Schätzung oder Messung eines helleren Kometen fast unüberwindliche Hindernisse in den Weg stellen. Während das Gestirn bei größerer Sonnenferne in kleinen Instrumenten oder mit freiem Auge nach seiner Gesamthelligkeit geschätzt wird, tritt in der Nähe der Sonne eine Differenzierung ein. Es entwickeln sich Kern, Haube und Schweif, und eine Vergleichung der älteren Helligkeitsangaben mit den neueren wird daher fast unmöglich gemacht. Nur für die kurze Zeitspanne, während der mindestens die Kern- und die volle Kopfhelligkeit getrennt meßbar sind, läßt sich zahlenmäßig entscheiden, ob der Komet uns in erster Linie eigenes oder von der Sonne entliehenes Licht zusendet. Daß bei hellen Kometen, die der Sonne sehr nahekommen, das Eigenlicht vorwiegt, beweist allerdings schon ihr hoher Glanz, während das Fehlen jeglicher Phase an ihren Kernen sich schon ganz natürlich aus der Zusammensetzung aus unzählbaren kleinen Partikeln erklären würde. Da reflektiertes Licht stets mehr oder weniger polarisiert ist, so könnten hier ähnlich wie bei der Sonnenkorona entsprechende Beobachtungen von Nutzen sein, besonders dann, wenn man das Auge durch die photographische Platte ersetzt. Versuche in dieser Richtung liegen bereits vor, doch haben sie bei der Lichtschwäche bzw. kurzen Sichtbarkeitsdauer der in letzter Zeit erschienenen Kometen keine neuen Gesichtspunkte zutage gefördert. Die im Planetensystem so wichtige Aufschlüsse ergebende Albedobestimmung findet jedenfalls in der Kometenastronomie ein völlig unfruchtbares Feld. Aus demselben Grunde ist es meist so gut wie unmöglich, für einen eben entdeckten und berechneten Kometen die künftige Gesamthelligkeit anders als näherungsweise durch Berücksichtigung des quadratischen Gesetzes für Sonnen- und Erdabstand anzugeben.

Glücklicherweise hat die Anwendung der Spektralanalyse wesentlich günstigere Ergebnisse zu verzeichnen. Die erste spektroskopische Untersuchung eines Kometen ist bereits von Donati im Jahre 1864 ausgeführt worden. Es wurde dabei durch den italienischen Astronomen das Vorhandensein von drei auffälligen, nach dem Violett zu verwaschenen, hellen Bändern auf kontinuierlichem Grunde festgestellt. Die Beobachtungen der nächstfolgenden größeren Kometen bestätigten im wesentlichen das Resultat, und bereits im Jahre 1868 konnte Huggins die Identität dieser Bänder mit denen des Kohlenwasserstoffes nachweisen, dessen blaue Flamme in jedem Bunsenbrenner und in jedem Kerzenlicht zu finden ist. Die beiden an der Sonne besonders nahe vorübergegangenen glänzenden Kometen des Jahres 1882 haben dann noch die ersten Beispiele dafür geliefert, daß um die Perihelzeit unter teilweiser Zurückdrängung der Kohlenwasserstoffbänder auch die Natrium- und einige Eisenlinien im Kometenspektrum hell auftreten können. Durch alle diese Emissionsspektren ist somit das Selbstleuchten der Kometen unzweifelhaft bewiesen. Der kontinuierliche offenbar von der Sonnenbeleuchtung herrührende Hintergrund des Spektrums zeigt bei näherer Betrachtung gleichfalls einen beträchtlichen Wechsel, so daß die äußere

Kometen-
spektra.

Veränderlichkeit der ganzen Klasse von Gestirnen sich auch am Spektrum deutlich offenbart.

Mit Hilfe der Photographie ist es in den letzten Jahren gelungen, die Untersuchung auch auf den unsichtbaren Teil des Spektrums und auf die Kometenschweife auszudehnen. Es sind dabei in Kernen und Schweifen merkwürdige Unterschiede gegen das normale Kohlenwasserstoffspektrum festgestellt worden, die auf Grund von Laboratoriumsversuchen teils durch die Beimengung von Kohlenoxyd und Cyan, teils durch den geringen Druck, unter dem besonders die Schweifmaterie leuchtet, ihre sehr wahrscheinliche Erklärung gefunden haben. Überhaupt muß hervorgehoben werden, daß die Nachbildung der meisten spektralen Kometenphänomene im Laboratorium merkwürdig rasch gelungen ist. Daß dabei in erster Linie elektrische Entladungen in Geißlerschen Röhren Vergleichsobjekte geliefert haben, wirft auf den um die Zeit stärkster Schweifentwicklung der Kometen beobachteten Leuchtprozeß ein unverkennbares Schlaglicht. Es kann heute kaum einem Zweifel unterliegen, daß den meisten kometarischen Phänomenen um die Perihelzeit kein eigentlicher Verbrennungsprozeß, sondern in erster Linie eine elektrische Leuchterscheinung zugrunde liegt. Die gewaltige Ausdehnung der Schweifmaterie, ihre fast unfaßbar dünne Verteilung u. a. m. verliert damit einen Teil des Rätselfaften, das ihm von alters her anhaftete.

Entstehung
der Schweife.

Eine befriedigende, durch die Beobachtungen genügend begründete Theorie der Schweifbildung, des größten Kometenrätsels aller Zeiten, haben uns gleichfalls die letzten Jahrzehnte geliefert. Versuche, die mannigfache Gestalt der Schweife und ihre „Flucht vor der Sonne“ zu erklären, liegen freilich weit zurück. Schon Kepler dachte sich die Schweife als Ergebnis einer abstoßenden Kraft, die ihren Sitz in der Sonne habe, doch konnte erst Bessel nach den Beobachtungen am Kopfe des Halleyschen Kometen im Jahre 1835 eine erste Theorie für die Entstehung dieser seltsamen Gebilde aufstellen. Wohl das Wichtigste an den geistreichen Untersuchungen des Königsberger Astronomen war die unzweideutige Feststellung, daß die Schweife ihren Ursprung aus Ausströmungen des Kerns nehmen, und daß sie ihre Richtung einer in der Sonne zu suchenden Polarkraft verdanken. Während also der Kometenkern selbst im Sinne der Gravitation weitereilt, werden seine Ausströmungen teilweise entgegen dem Anziehungsgesetz in den Raum fortgeschleudert. Die materiellen Teilchen der Kernausströmungen unterliegen hier somit je nach ihrer Beschaffenheit zwei entgegengesetzten Kräften, von denen die eigentümliche Repulsivkraft meist die Oberhand behält.

Über die Natur dieser Repulsivkraft herrschte lange Zeit völliges Dunkel. Heute ist man wohl geneigt, die Schweifphänomene in erster Linie dem Strahlungsdruck zuzuschreiben, dessen Wirkung theoretisch durch Maxwell und experimentell durch Lebedeff, Nichols und Hull genauer untersucht worden ist. Seine Wirkung hängt von der Strahlungsenergie der Lichtquelle und von den Dimensionen der ihm unterliegenden materiellen Teilchen ab.

Letztere müssen, wenn die Repulsivkraft die Gravitationswirkung übertreffen soll, sehr klein sein, dürfen indessen die Grenzdurchmesser von $1,5$ und $0,07 \mu$ nach oben bzw. unten nicht überschreiten, wobei unter μ der tausendste Teil eines Millimeters zu verstehen ist. So winzig diese Teilchen auch sein mögen, gegenüber den Dimensionen der Gasmoleküle erscheinen sie selbst an der unteren Grenze noch als gewaltig groß. Ist somit die experimentell nachgewiesene und heute nicht mehr zu leugnende Lichtdruckerscheinung bei den Kometen tatsächlich wirksam, so hätte man in den Schweifen keine Gase, sondern überaus dünn verteilte diskrete Körperchen von wolken- oder rauchartiger Beschaffenheit zu vermuten.

Dieser Lichtdrucktheorie, die besonders in dem schwedischen Chemiker und Geophysiker Arrhenius einen begeisterten Verfechter gefunden hat, steht

Theorie
von Bredichin.

auch heute noch die wesentlich ältere Zöllnersche Auffassung gegenüber, die von einer elektrostatischen Ladung des Sonnenballes ausgeht und die Wirkung dieser Ladung auf die spektroskopisch in den Kometen nachgewiesenen Gase untersucht. Auf Grund der von Zöllner aufgestellten Theorie, daß die elektrische Abstoßung umgekehrt proportional dem Molekulargewicht eines Gases wirkt, hat Bredichin in den 70er und 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts eine

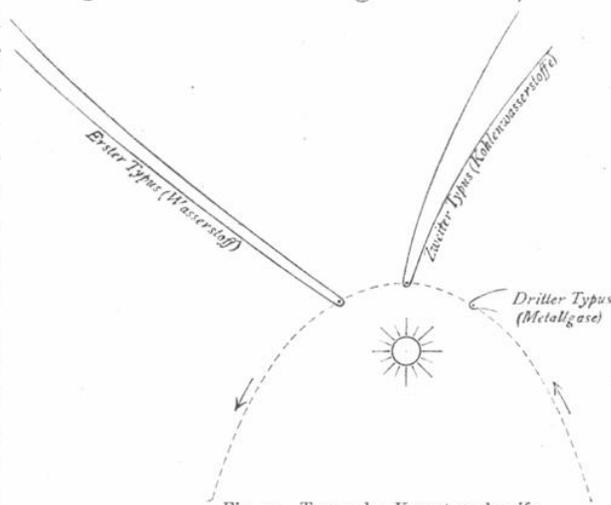


Fig. 27. Typen der Kometenschweife.

große Zahl von Kometen auf die Ausdehnung und Gestalt ihrer Schweife genauer geprüft und hieraus Anhaltspunkte für ihre chemische Zusammensetzung und die Bewegung ihrer Materie zu gewinnen gesucht. Nach den Ergebnissen des russischen Astronomen lassen sich alle Kometenschweife in drei Typen eingliedern (Fig. 27). Beim ersten beträgt die Repulsivkraft rund das Achtzehnfache der Anziehung und erzeugt die gerade genau in der Verlängerung des Radiusvektors fortgeschleuderten dünnen Schweife. Beim zweiten wird die Attraktion schon erheblich schwieriger überwunden; die abstoßende Kraft wirkt hier kaum mit dem doppelten Betrage der Gravitation und schafft merklich hellere aber kürzere und deutlich gebogene Schweife. Der dritte Typus kommt schließlich zustande, wenn die Abstoßung nur $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{10}$ der jeweiligen Gravitationswirkung beträgt, d. h. wenn die letztere nicht überwunden, sondern lediglich geschwächt erscheint. Hier ist nur die Entfaltung kurzer, breiter und dabei gebogener Schweife denkbar. Eine generelle Trennung der Typen ist nur bei schwächeren Kometen möglich; bei den großen Erscheinungen sind meist alle drei Schweif-

erscheinungen in mehr oder weniger ausgeprägter Form vertreten, ja es bilden sich dann zuweilen auch der Sonne zugekehrte Ausströmungen, die Bredichin als anomale Schweife bezeichnet, obwohl sie eigentlich richtiger als ungewöhnliche Verlängerungen der Kopfhaube aufzufassen sind. Nimmt man für die 2. Klasse entsprechend den spektroskopischen Erfahrungen Kohlenwasserstoffe an, so führt die Berechnung der Atomgewichte bei der 1. Klasse auf Wasserstoff, während beim 3. Typus schon Metallgase den Schweif bilden mögen.

Die Frage, ob die Voraussetzung von Lichtdruckkräften oder elektrostatischen Ladungen der Sonne den Vorzug verdient, ist angesichts der fast lückenlosen Darstellung aller beobachteten Phänomene durch beide Theorien schwer zu entscheiden. Die elektrische steht mit den spektroskopischen Untersuchungen besser im Einklang, zumal da bei Erhitzung von Meteorstücken — den einzig greifbaren Resten von Kometen — in luftverdünnten Röhren keine Dampf- oder Raucherscheinungen, sondern die für das Kometenspektrum charakteristische Entwicklung von Gasen, insbesondere von Kohlenoxyd und Kohlenwasserstoff eintritt. Diese Theorie geht indessen von einer hypothetischen, wenngleich recht wahrscheinlichen Energiequelle aus, der auf der anderen Seite die zweifellos nachgewiesene abstoßende Kraft der Strahlen der Sonne gegenübersteht. Man kann also gegenwärtig wohl die Schweife im großen und ganzen auf Grund einer gesetzmäßig wirkenden Repulsivkraft erklären, ist jedoch noch nicht imstande, das Wesen dieser Kraft bis in alle Einzelheiten zu verfolgen.

Ohne Zweifel bieten die Kometen, die verwandte Erscheinung der Sonnenkorona vielleicht ausgenommen, das interessanteste und vielseitigste Problem der kosmischen Physik dar. Wohl harrt noch so manches Rätsel, so mancher Widerspruch einer einwandfreien Deutung und Erklärung. Die bisherige so glückliche Anwendung der neuesten Errungenschaften der Physik auf die Kometen läßt jedoch von der künftigen Erkenntnis der im Schoße der Natur noch schlummernden Kräfte hier noch manches interessante Ergebnis in Gegenwart und Zukunft erhoffen.

Literatur.

Die physischen Eigentümlichkeiten des Mondes, der Planeten und Kometen werden in den meisten volkstümlichen Darstellungen der Himmelskunde, oft unter Zurücksetzung der anderen astronomischen Ergebnisse sehr erschöpfend behandelt. Von größeren Werken dieser Art seien erwähnt: NEWCOMB-ENGELMANN, Populäre Astronomie (letzte Aufl. 1914). Zuverlässigste, jedoch die Planetographie nicht in den Vordergrund rückende Darstellung der Ergebnisse astronomischer Forschung. In M. W. MEYER, Das Weltgebäude (letzte Aufl. 1908) sind die Planeten, der Mond und die Kometen recht erschöpfend und unter Beigabe von zum Teil vortrefflichen Illustrationen, jedoch nicht ohne gelegentliche phantastische und irreführende Ausblicke behandelt. KLEIN, Handbuch der allgemeinen Himmelsbeschreibung (1900) ist weniger verbreitet, aber durch die zahlreichen Literaturnachweise wertvoll. Auch die Himmelskunde von PLASSMANN (Freiburg, 1913) und Der Sternenhimmel von PLASSMANN und POHLE, ersteres mehr didaktisch, letzteres populärer mit zum Teil historisch interessanten Abbildungen, sind zu empfehlen.

Für die Geschichte der Mond-, Planeten- und Kometenforschung erweisen sich von besonderem Wert die Notizen in WOLF, Geschichte der Astronomie (1877), die auf knappem Raum oft mehr und zuverlässigere Angaben enthalten als MÄDLER, Geschichte der Himmelskunde von der ältesten bis auf die neueste Zeit (1873). Die Ergebnisse des vergangenen Jahrhunderts behandelt CLERKE, Geschichte der Astronomie während des 19. Jahrhunderts (1889). Als Quelle für historische Angaben zahlreicher populärer Bücher haben A. von HUMBOLDTS Kosmos und ARAGOS populäre Astronomie gedient.

Wissenschaftliche Zusammenstellungen der rein astrophysikalischen Forschungsmethoden und Resultate geben die von Potsdamer Astronomen verfaßten Fundamentalwerke: MÜLLER, Photometrie der Gestirne (1897), SCHEINER, Spektralanalyse der Gestirne (1890) und desselben Verfassers Photographie der Gestirne (1897), doch sind die beiden letzten in bezug auf die Planeten und Kometen bereits veraltet. Sehr ausführliche Literaturnachweise geben den drei Werken einen besonderen Wert.

In neuerer Zeit sind spezielle Darstellungen der planetographischen Ergebnisse erschienen. PETER, Die Planeten (1909) enthält in knapper, gedrängter Form fast alles Wissenswerte aus diesem Zweig der Himmelskunde, während wir in ANDRÉ, Les planètes et leur origine (1909) eine ausführliche und sehr vollständige Planetographie besitzen. LOHSE, Planetographie (1894) wendet sich mehr an den Beobachter und geht auch auf Messungen an Planetenscheiben und verwandte Aufgaben ein. Im Gegensatz zu diesen drei sehr sachlich gehaltenen Werken findet man in ARRHENIUS, Das Schicksal der Planeten (1911) einige geistreiche, aber durchaus hypothetische Ausblicke auf die Entwicklungsgeschichte der Schwesterwelten der Erde.

Abgesehen von Mars sind Einzeldarstellungen der Planeten verhältnismäßig selten. SCHRÖTER, Hermographische Fragmente (1816) mag als einziges Beispiel einer Merkurmonographie genannt sein. Im Zusammenhange mit den vergeblichen Versuchen einer Rotationsbestimmung der Venus erscheinen von historischem Interesse BLANCHINUS, Hesperii et Phosphori nova Phaenomena (1728), ferner SCHRÖTER, Beobachtungen über die sehr beträchtlichen Gebirge und die Rotation der Venus (1793), sowie desselben Verfassers Aphroditographische Fragmente (1796). Für die Gleichheit von Rotation und Revolution des Planeten tritt SCHIAPARELLI in Considerazioni sul moto rotatorio del pianeta Venere (1890) ein. Aus der umfangreichen Literatur über Mars kann nur eine kurze Auswahl mitgeteilt werden, mit

um so größerer Berechtigung, als das zweibändige Werk von FLAMMARION, *La planète Mars et ses conditions d'habitabilité* (1892 und 1909) jede Opposition, aus der Beobachtungen vorliegen, sehr eingehend behandelt und die Mitteilungen der Beobachter oft im Wortlaut zitiert. Der Unterschied zwischen den älteren und neueren Ergebnissen der Marsbeobachtung kann kaum besser veranschaulicht werden als durch einen Vergleich der beiden umfangreichen Serien von Zeichnungen und Beschreibungen, die die Literatur in SCHRÖTER, *Areographische Beiträge zur genaueren Kenntnis des Planeten Mars* (erst 1881 erschienen) und in SCHIAPARELLI, *Osservazioni astronomiche e fisiche sull'asse di rotazione e sulla topografia del pianeta Marte* (7 Abh. 1878—1910) besitzt. Die unerschütterliche Auffassung LOWELLS über die Bewohnbarkeit des Mars findet ihren Ausdruck in LOWELL, *Mars* (1896) und desselben Autors *Mars as the abode of Life* (1908). Als Muster einer Rotationsbestimmung eines Planeten aus dem vorhandenen Beobachtungsmaterial kann WISLICENUS, *Beitrag zur Bestimmung der Rotationszeit des Planeten Mars* (1886) dienen.

Die veränderlichen Oberflächengebilde des Jupiter verhindern eine summarische Darstellung nach Art der Flammarionschen Marsmonographie, und Saturn, Uranus und Neptun kommen in dieser Beziehung erst recht nicht in Frage. Ein Beispiel der Bearbeitung einer größeren, fast drei Jahrzehnte umfassenden Reihe von Beobachtungen hat LOHSE in seinen Untersuchungen über die physische Beschaffenheit des Planeten Jupiter (1911) gegeben. SCHRÖTERS *Kronographische Fragmente* (1808) stellen den einzigen älteren Versuch einer Saturnmonographie dar. Späterhin konzentriert sich die Literatur in erster Linie auf das Ringphänomen, dessen feste Struktur durch MAXWELL, *Essay on the stability of the motion of Saturns rings* (1859) zum erstenmal als theoretisch unhaltbar nachgewiesen wird. Die SEELIGERSche Theorie des Ringes ist in MÜLLER, *Photometrie der Gestirne* (1897) aus den *Abhandl. der K. Bayr. Akad. der Wiss.* ausführlich mitgeteilt. Eine sehr lesenswerte populäre Darstellung des ganzen Problems findet sich in DARWIN, *Ebbe und Flut* (1902). Über den ersten spektrographischen Nachweis der meteorischen Konstitution des Ringsystems durch KEELER und DESLANDRES ist in Zeitschriften, insbesondere in den ersten Bänden des *Astrophysical Journal* berichtet.

Eine kurze populäre Mondkunde liegt in FRANZ, *Der Mond* (1906) vor. Sie behandelt auch die kosmischen Verhältnisse des Erdtrabanten, kann indessen auf dem knapp bemessenen Raum kaum mehr als eine Übersicht geben. Weit ausführlicher, jedoch veraltet ist das klassische Werk von BEER und MÄDLER, *Der Mond nach seinen kosmischen und individuellen Verhältnissen* (1837). Lediglich die Topographie behandeln ELGER, *The Moon* (1895) und NEISON, *Der Mond* (1878); beide sind mit sehr brauchbaren Karten ausgestattet. Von den älteren Selenographien seien HEVELIUS, *Selenographia sive lunae descriptio* (1647) und SCHRÖTER, *Selenographische Fragmente* (1791 und 1802) genannt, die heute lediglich noch historisches Interesse beanspruchen können. Die ausführlichste Zeichnung des Mondes nach direkten Beobachtungen hat SCHMIDT in seiner *Charte der Gebirge des Mondes* (1878) geliefert, während das photographisch Erreichbare in LOEWY und PUISEUX, *Atlas photographique de la lune* (1896—1910) und dem zugehörigen Text niedergelegt ist. Vortreffliche Stereoskopbilder des Mondes sind von HARTMANN, M. WOLF, LE MORVAN u. a. aufgenommen worden. Um die exakte Ausmessung der Mondoberfläche haben sich in letzter Zeit besonders FRANZ, HAYN und SAUNDER verdient gemacht.

Von geologischem Standpunkte ist der Mond nicht allzu oft behandelt worden. NASMYTH und CARPENTER, *Der Mond als Planet, Welt und Trabant* (1906) versuchen eine vulkanische Deutung der Ringgebirge, während in GÜNTHER, *Vergleichende Mond- und Erdkunde* (1911) unter reichlichem Literaturnachweis auch andere geologische Kräfte herangezogen werden. Sehr beachtenswert in dieser Beziehung ist auch die kleine Abhandlung des Geologen SUESS, *Einige Bemerkungen über den Mond* (1895). Die kosmogonische Stellung des Mondes hat in geistreicher und lichtvoller Darstellung DARWIN in seinem bereits oben erwähnten Werk *Ebbe und Flut* behandelt.

Das Interesse früherer Jahrhunderte für die Kometen spiegelt sich in zahllosen Kometographien wider, unter denen diejenigen von HEVELIUS (*Cometographia* 1668) und LUBIE-

NIECKI (*Theatrum Cometicum* 1681) wohl die berühmtesten sind. Alle erreichbaren Angaben über ältere Kometenerscheinungen hat dann PINGRÉ in seiner wertvollen zweibändigen *Cométographie* (1783) unter Angabe der Quellen zusammengestellt. Als eine kritische *Kometographie* in neuzeitlichem Sinne können HOLETSCHEKS Untersuchungen über die Größe und Helligkeit der Kometen und ihrer Schweife (1896 ff.) gelten. Unter den populären *Kometenmonographien* ist CHAMBERS, *The Story of the Comets* (1909) wohl an erster Stelle zu nennen. Die elektrische Theorie der Schweifphänomene ist enthalten in ZÖLLNER, *Über die Natur der Kometen* (1872). Ihre erfolgreiche Ausbildung hat dann BREDICHIN in seinen umfangreichen *Recherches sur les queues de comètes* (Moskauer Ann. Bd. I u. ff.) und in der Schrift *Über Kometenschweife* (1862, russisch) durchgeführt. In ARRHENIUS, *Werden der Welten* (1908) und RIGHI, *Kometen und Elektronen* (1911) wird die Lichtdruck- bzw. Elektronentheorie in ihrer Anwendung auf die Kometen in allgemeinverständlicher Darstellung behandelt.

Ein Studium der physischen Verhältnisse des Planetensystems, der Kometen usw. ist neuerdings ohne Berücksichtigung der Zeitschriften kaum denkbar. Das *Astrophysical Journal*, die *Monthly Notices der Royal Astronomical Society* und, soweit populäre Orientierung in Frage kommt, das *Bulletin de la Société astronomique de France* berichten zwar über die meisten neuen Errungenschaften auf dem in Frage kommenden Gebiet, in Spezialfragen muß indessen auf die jährlichen Literaturzusammenstellungen des von WISLICENUS begründeten *Astronomischen Jahresberichts* (seit 1899) verwiesen werden.