

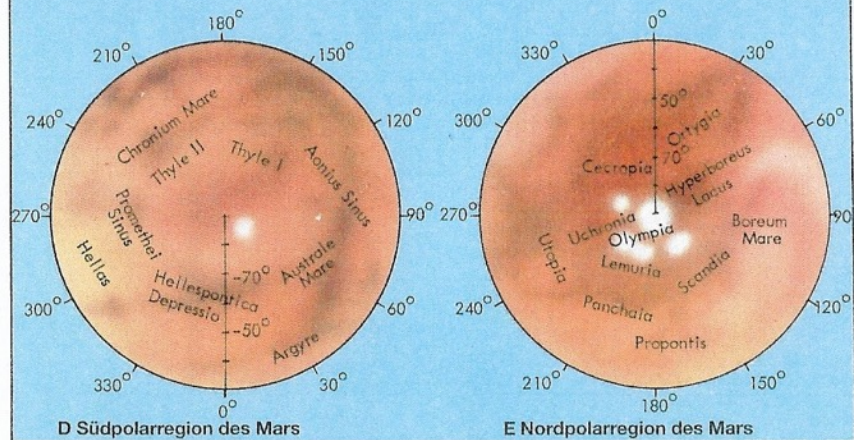
A Mars-Opportunities von 1999-2022. Die Zahlen zwischen den Erd- und Marspositionen bedeuten den Abstand der beiden Planeten in Mill. km.

B Die Marskanäle nach P. Lowell (1895)



Siehe die Mars-Opportunities

C Klassische Marskarte nach Fernrohrbeobachtungen

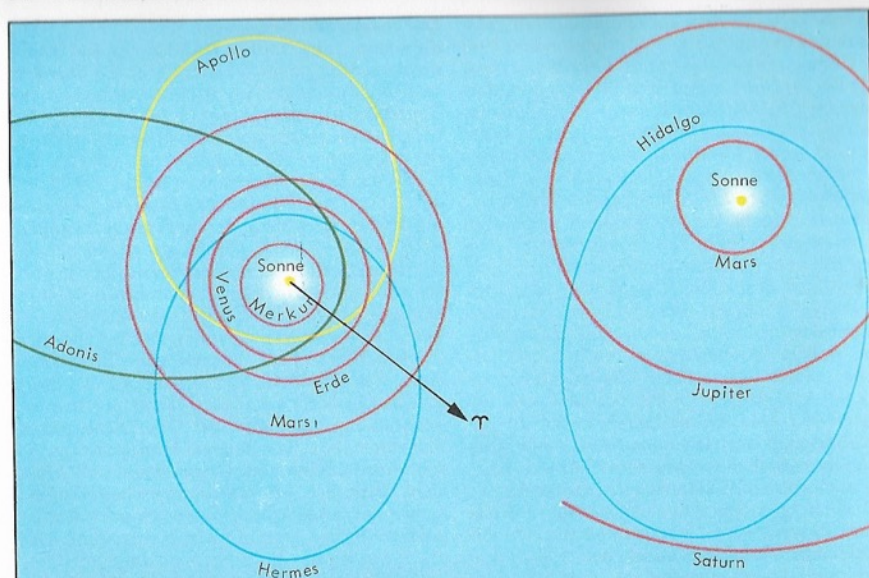


D Südpolarregion des Mars

E Nordpolarregion des Mars

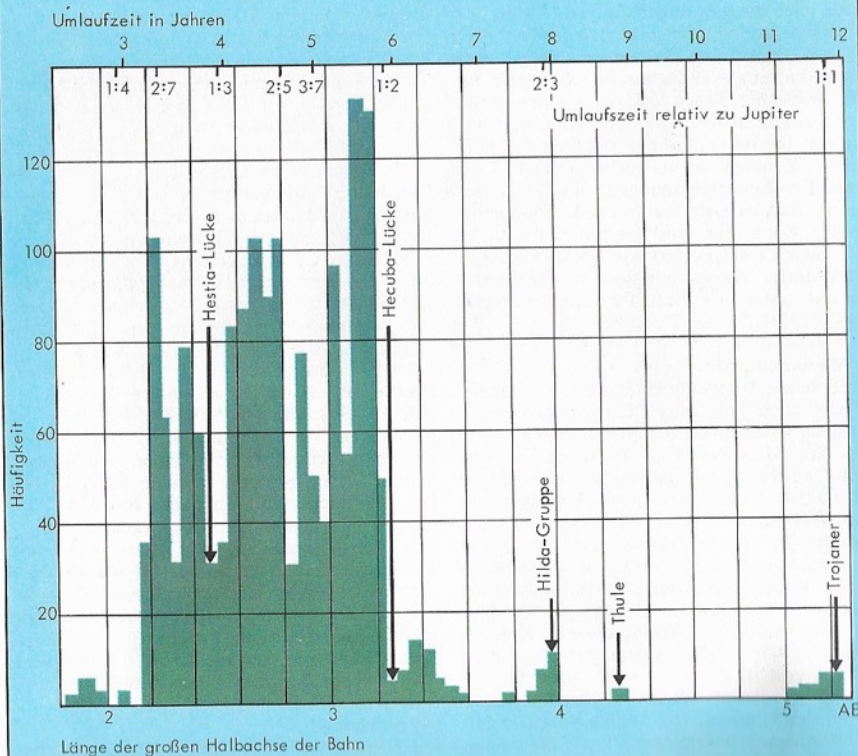


Marskarte nach den Photographien der neuesten Marssonden
Ausschnitt aus der Äquatorzone



A Bahnen erdnaher Kleinplaneten (Beispiele)

B Bahn des Kleinplaneten Hidalgo



Länge der großen Halbachse der Bahn

C Die Kommensurabilitäten im System der Kleinplaneten

innere Mond Phobos schneller als die Marsrotation und läuft für einen Beobachter auf Mars im Gegensatz zu allen anderen Gestirnen von Westen nach Osten. Der Abstand vom Marszentrum beläuft sich auf 9300 bzw. 23200 km, von der Marsoberfläche nur 5900 bzw. 19800 km. Nach Mariner 9-Aufnahmen ist Phobos wie viele Kleinplaneten länglich mit einem größten Durchmesser von 28 km und einem kleinsten von 20 km. Deimos ist wesentlich kleiner. Der Durchmesser beträgt 16 bzw. 10 km. Auf Phobos und Deimos wurden zahlreiche Krater und andere Einzelheiten aufgefunden.

Kleinplaneten

In der Neujahrsnacht 1800/1801 entdeckte G. PIAZZI einen Planeten zwischen Mars und Jupiter: Ceres. Es folgten 1802 Pallas durch OLBERS, Juno 1804 durch HARDING und Vesta 1807 nochmals durch OLBERS. Heute sind fast 100000 Kleinplaneten (Asteroiden oder Planetoiden) mit ihren Bahnen bekannt; aufgefunden wurden schon weit mehr, doch konnten bei weitem nicht alle »gesichert« werden. Insgesamt dürften es viele Millionen sein, rechnet man auch die kleineren bis zu einigen hundert Meter Durchmesser hinzu. Die Gesamtmasse der Kleinplaneten beträgt etwa 0,002 Erdmassen. Selbst die größeren Kleinplaneten sind nicht ganz kugelförmig. Das ergibt sich aus periodischen Helligkeitsschwankungen, die sich als Rotationslichtwechsel deuten lassen. Die Perioden liegen i. a. zwischen etwa 4 und 17 Stunden. Bisher flogen Raumsonden an vier Kleinplaneten vorbei: 1991 Galileo an Gaspra (20 x 12 x 11 km) und 1993 an Ida (56 x 24 x 21 km, mit dem neu entdeckten Satelliten Dactyl 1,2 x 1,4 x 1,6 km) sowie 1997 NEAR an Mathilde (57 x 53 x 50 km) und 1998/2000 an Eros (s. u.).

Auf den Aufnahmen zeigten sich viele große Aufschlagkrater. Auf Mathilde existieren mindestens zwei Aushöhlungen von sogar 30 bzw. 20 km Durchmesser. Es ist erstaunlich, daß Mathilde bei den Asteroidenaufschlägen, die diese Krater verursachten, nicht völlig auseinanderbrach. Während man bisher für Kleinplaneten Dichtewerte um 3,5 g/cm³ annahm, hat Mathilde eine Dichte von weniger als 2 g/cm³. Man muß daraus auf eine recht poröse innere Struktur schließen. Mathilde zeigt mit 17,4 Tg. auch eine extrem langsame Rotation. Die wichtigsten Typen der Kleinplaneten: C: Sehr dunkel (geom. Albedo unter 0,065, bei Mathilde sogar nur 0,04). Ähnelt den kohlenstoffreichen Chondriten. Häufigkeit etwa 75%. Vorkommen bevorzugt im äußeren Bereich. Weiteres Beispiel: Ceres.

S: Etwas heller (Albedo 0,07–0,23), rötliche Oberfläche. Enthalten Pyroxen und Olivin, vielleicht vermengt mit Eisen. Ähnelt den Meteoriten der Siderolithe oder gewöhnlichen Chondriten (s. S. 135f.). Häufigkeit etwa 15%. Vorkommen bevorzugt im inneren Bereich. Beispiel: Juno.

Im Jahre 1898 wurde der Kleinplanet Eros mit einer ungewöhnlichen Bahnform entdeckt: er bewegt sich weit in das Innere des Planetensystems, überkreuzt die Marsbahn und kommt sogar der Erdbahn auf 22 Mill. km nahe. Später wurden noch weitere derartige erdnahe Planetoiden aufgefunden. Die sog. Apollo-Asteroiden überkreuzen die Erdbahn nach innen, ihre Periheldistanz liegt unter 1,017 AE, ihre gr. Halbachse über 1,0 AE. Bei den Körpern der Atengruppe ist die gr. Halbachse unter 1,0 AE, die Apheldistanz über 0,983 AE. Man fand bei ihrem Vorüberflug schon Mini-Asteroiden, die uns näher kamen als der Mond. Ihr Durchmesser wurde auf nur wenige Meter geschätzt. Phaethon kommt mit 21 Mill. km im Perihel der Sonne am nächsten. Seine Temperatur klettert dabei auf über +600°C.

Ein anderes Extrem bieten Körper im äußersten Sonnensystem (z. B. Hidalgo, s. Abb. B). Hinter der Neptunbahn wurden seit 1992 rund 1000 sog. Kuiper-Objekte entdeckt (s. S. 121). Es sind eigentlich Kometenkerne oder Eisplaneten. Das bisher größte Objekt ist Sedna mit ca. 1500 bis 1800 km Durchmesser in im Mittel 509 AE Sonnenabstand. Im Bereich zwischen Jupiter und Neptun bewegen sich die sog. Centauren, vermutlich aus ihrer ursprünglichen Bahn geworfene Kuiper-Objekte (z. B. Chiron und Pholus).

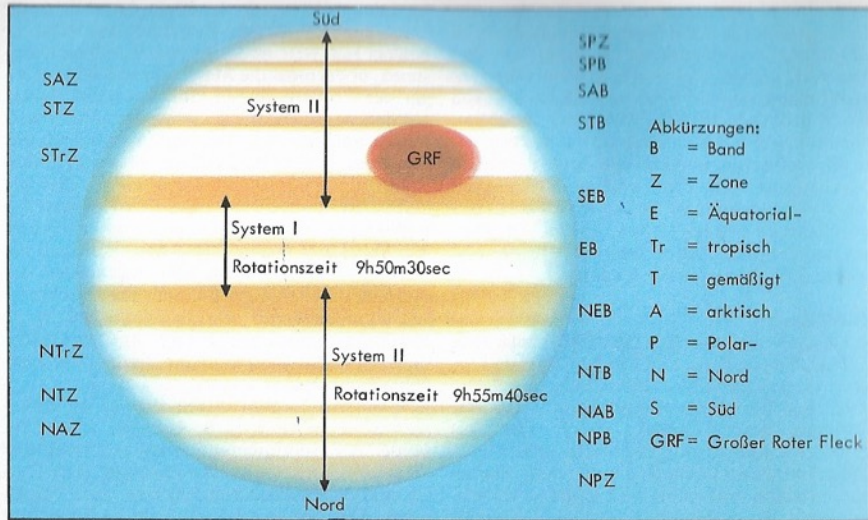
Die vier größten Kleinplaneten und Eros

Name	Durchmesser in km	Mittl. Entf. v. d. Sonne in AE	sid. Umlaufzeit in d	Bahnexzentrizität	Bahnneigung in °
Ceres	1003	2,766	1680	0,079	10,6
Pallas	608	2,771	1685	0,235	34,8
Juno	247	2,668	1592	0,258	13,0
Vesta	538	2,361	1325	0,091	7,1
Eros	23	1,458	643	0,223	10,8

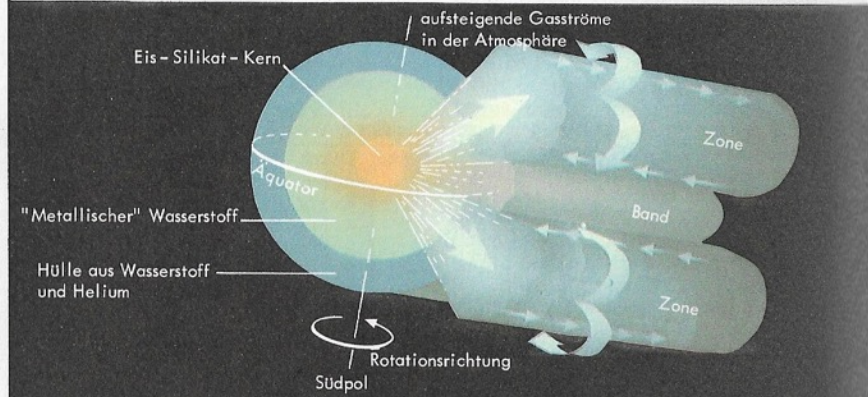
Kommensurabilitäten

Zeichnet man ein Diagramm, das die Häufigkeit der Kleinplaneten für bestimmte mittlere Entfernungen von der Sonne zu erkennen gibt, so stellt sich keine zufällige Verteilung heraus. Vielmehr sind ganz bestimmte Entfernungszonen deutlich ausgespart. Dabei stehen die Umlaufzeiten, die ein Körper in diesen Lücken haben würde, in einem einfachen ganzzahligen Verhältnis zur Umlaufzeit des Jupiter (Kommensurabilität der Umlaufzeiten). Diese Lücken werden allgemein nach ihrem Entdecker D. KIRKWOOD (1867) Kirkwood-Lücken genannt. K. HIRAYAMA fand dagegen zwischen 1918 und 1933 Häufungen von Kleinplaneten bei bestimmten Zahlenwerten der großen Halbachsen, wie die Abb. C zeigt.

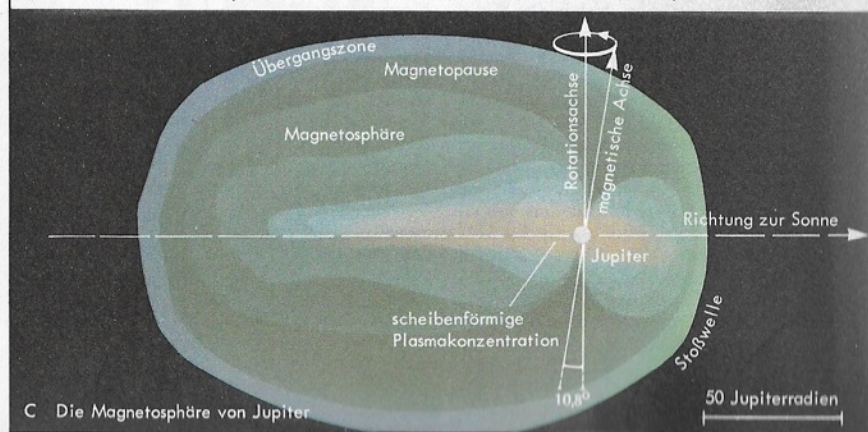
Die Kommensurabilitätslücken erklären sich durch die Störungswirkung des Jupiter: diese Störungen führten zu einer fast vollständigen



A Die Nomenklatur der Zonen und Bänder auf Jupiter (z. B. südliche tropische Zone=StrZ) sowie die Rotationszeiten



B Innerer Aufbau von Jupiter (links) und vertikale Strömungen in seiner Atmosphäre (rechts)



C Die Magnetosphäre von Jupiter

Verdrängung von Körpern, die sich ursprünglich in diesen Zonen bewegt haben mögen. Die stärkste Störung wäre für den Fall zu erwarten, daß ein Kleinplanet eine Umlaufzeit hat, die mit der des Jupiter genau übereinstimmt (1:1). Eine Ausnahme bilden aber die Trojaner, die sich nahe der Librationspunkte L₄ und L₅ (s. S. 60f.) aufhalten. Sie gehen Jupiter in der Bahn um 60° voraus oder nach. Strenggenommen führen sie um die Librationspunkte noch langperiodische Schwingungen aus.

Jupiter als Riesenplanet

Der weitaus größte Planet unseres Sonnensystems ist Jupiter. Seine Oppositionen folgen jeweils in Abständen von etwa 13 Monaten. Da er in einer günstigen Perihelopposition der Erde auf 591 Mill. km nahe kommt, wächst sein Scheibendurchmesser am Äquator auf fast 50" an. Bereits mit kleinen Fernrohren sieht man die starke Abplattung des Planeten und auf seiner Scheibe bänderartige Strukturen, die parallel zum Äquator verlaufen. Bei diesen Einzelheiten handelt es sich um Wolkengebilde in einer dichten Atmosphäre, die nach spektroskopischen Untersuchungen sowie Beobachtungen bei Sternbedeckungen durch Jupiter allerdings eine von der irdischen Atmosphäre völlig abweichende Zusammensetzung hat: die Hauptbestandteile sind Wasserstoff und Helium. Beimengungen Ammoniak und Methan. Die Maximaltemperaturen liegen für die beobachtbare Schicht bei -150° bis -145° C.

Auf Jupiter wechseln hellere Zonen und dunklere Bänder wechselseitig nach einem Schema ab, das auf S. 96 A wiedergegeben ist. Doch wird dieses Schema häufig nicht streng eingehalten. Zunächst ist der Dunkelheitsgrad der Bänder starken Schwankungen unterworfen, zeitweise verschwinden bestimmte Bänder in den höheren Breiten völlig, das nördliche und südliche Äquatorband vereinigen sich gelegentlich und die helle Äquatorzone verschwindet. Innerhalb der Grundstruktur zeigen sich ferner zahllose weitere Einzelheiten: Weißliche, graue oder sogar rötliche Flecken, Aus- und Einbuchtungen, Kerben, dunkle Brücken zwischen den Bändern, die quer über die hellen Zonen verlaufen usw.

Diese Details lassen sich zur optischen Bestimmung der Rotationszeit heranziehen. Die Äquatorzone rotiert dabei in 9h 50m 30s (System I), die höheren Breiten in 9h 55m 40s (System II). Die raschere Rotation der Äquatorzone scheint ihre Erklärung darin zu finden, daß dort eine starke atmosphärische Strömung in der Rotationsrichtung, also von Westen nach Osten vorliegt. Heute weiß man, daß die hellen Wolkenbereiche (Zonen) am kältesten und höchsten sind. Sie bestehen wohl aus Ammoniak-Eiskristallen. Hier ist der atmosphärische Druck niedrig. In etwas tieferen Schichten wird der Schmelzpunkt von Ammoniak erreicht. Hier findet man farbige Bestandteile. Noch tiefer dürfte Wasser als Eis vorkommen, noch wei-

ter unten sogar als Tröpfchen. Die Rot- und Braunfärbung verschiedener Jupiterwolken geht vielleicht auf Beimengungen von Schwefel- und Phosphorverbindungen, organische Moleküle und Komplexe anorganischer Polymere zurück.

Besonders seltsam ist das Verhalten des sog. »Großen Roten Flecks« (GRF), der erstmals von Lohse am 3. 6. 1878 bewußt aufgefunden wurde. Er existierte aber - wie alte Planetenzeichnungen nahelegen - wahrscheinlich schon sehr viel früher. Der GRF liegt in der südlichen tropischen Zone in etwa 22° südlicher Breite. Nicht immer war er rot, gelegentlich erschien er grau, gelblich oder sogar weiß. Mitunter verschwand er ganz, wie z. B. in den Jahren 1888, 1912, 1916, 1938 und 1944. In den letzten Jahren war er meist außerordentlich kräftig. Im Vergleich zu allen übrigen Einzelheiten auf Jupiter ist der GRF aber ein ziemlich stabiles Gebilde. Er ist heute ca. 30000 km lang und ca. 12000 km breit. Er ist kühler als seine Umgebung. Deshalb muß er auch in höheren Schichten liegen. Er ist eine Antizyklone, was auch die von den Raumsonden festgestellte Strömungsrichtung entgegengesetzt zum Uhrzeigersinn um den GRF zeigt. Eine Rotation dauert etwa 6 Tage. Vermutlich steigen im GRF Materialien aus tieferen Schichten in die Höhe. An den Rändern des Flecks sinken sie wieder ab. Auch der GRF dürfte nur eine begrenzte, aber doch erstaunlich lange Lebensdauer haben. Bisher mögen es schon einige hundert Jahre sein.

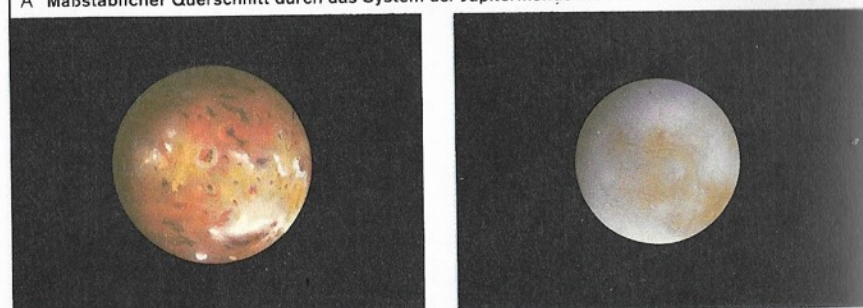
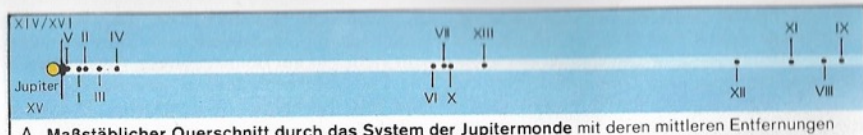
Der innere Aufbau des Jupiter

muß völlig von dem der erdähnlichen Planeten abweichen. Darauf weist bereits seine geringe mittlere Dichte von 1,3 g/cm³ hin. Die modernen Modellvorstellungen gehen etwa dahin, daß sich unter dem gewaltigen Druck der Atmosphäre deren Bestandteile in größerer Tiefe verflüssigen. Dabei nimmt der Wasserstoff »metallische« Form an, d. h. er wird ein guter elektrischer Leiter. Im Zentrum von Jupiter herrscht eine Temperatur von 30000 K und ein Druck von 100 Mill. Atmosphären. Lediglich ein kleiner Kern mit nicht genau bekanntem Ausmaß besteht aus Gesteinen und Metallen.

Die Radiostrahlung

des Jupiter hat verschiedene Ursachen. Man unterscheidet

1. eine schwache sogenannte thermische Strahlung im Zentimeterwellengebiet, die einfach eine Folge der Temperatur dieses Planeten ist. Die Intensität bei etwa 3 cm Wellenlänge entspricht einer Temperatur von -130°C;
2. eine nichtthermische Strahlung im Dezimeterwellengebiet. Sie stammt aus einem symmetrisch um Jupiter angeordneten Gürtel, der eine Ähnlichkeit mit den irdischen Strahlungsgürteln hat. Hier wird eine Synchrotronstrahlung (s. S. 115) erzeugt. Das Magnetfeld von Jupiter ist 10mal stärker als das Feld am Erdboden (Abb. C);



B Jupitermond Io



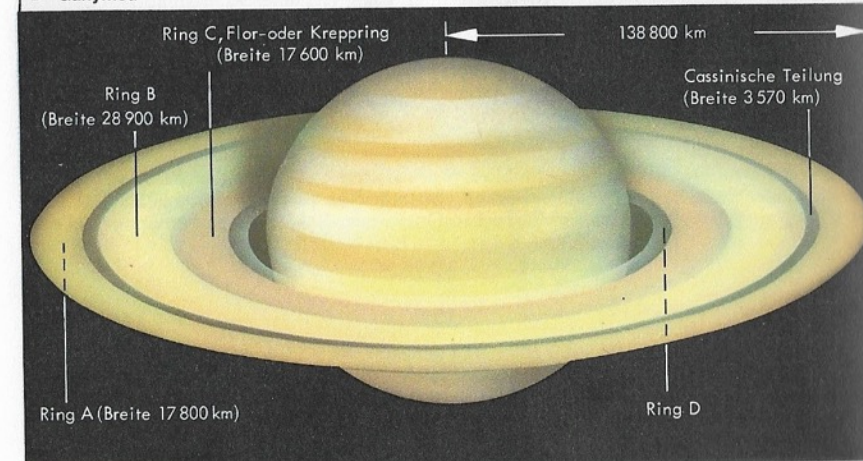
C Europa



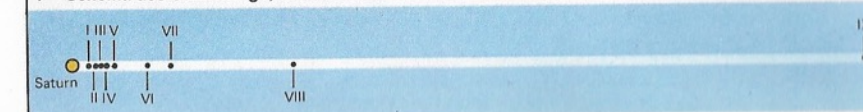
D Ganymed



E Kallisto



F Schema des Saturnrings, wie er von der Erde aus erscheint



G Maßstäblicher Querschnitt durch das System der »klassischen« Saturnmonde

3. eine *Meterwellenstrahlung*, die vor allem bei 15 m Wellenlänge beobachtet wird und kurzzeitige Schwankungen (engl. »bursts«) zeigt. Die Quellen sind eng begrenzte Gebiete wie der GRF oder Gewitterzonen. Die Bursts zeigen auch eine zeitliche Synchronisation mit der Umlaufzeit einiger Jupitersatelliten, vor allem Io. 1979 flogen Voyager 1 und 2 an Jupiter vorbei. Galileo erreichte Jupiter am 7. 12. 1995. Die Abstiegsstufe drang in die Atmosphäre ein, während die Orbiterstufe den Planeten umkreiste.

Die Jupitersatelliten

Die vier größten Jupitersatelliten I bis IV, die auch Io, Europa, Ganymed und Kallisto heißen, wurden bereits von G. GALILEI 1610 und fast gleichzeitig von S. MARIUS entdeckt. Sie übertreffen sogar teilweise noch unseren eigenen Mond im Durchmesser (Abb. S. 100 D). Ihre Helligkeit ist so groß, daß sie bereits mit bloßem Auge sichtbar sein müßten, wenn sie nicht so dicht an dem seine Umgebung überstrahlenden Jupiter stünden. So wird Ganymed selbst in einer mittleren Opposition 5^m1 hell, Io 5^m5, Europa 5^m7 und Kallisto 6^m3. In einer sehr günstigen Perihelopposition liegen diese Helligkeiten sogar noch etwa 0^m2 darüber. Oft schon mit kleinen Fernrohren lassen sich an den klassischen vier Jupitermonden eine Reihe interessanter Erscheinungen beobachten, die in den meisten astronomischen Jahrbüchern vorausgerechnet sind. Dazu gehören besonders

1. **Verfinsterungen:** Der Trabant bewegt sich in den Schatten des Jupiter.
2. **Bedeckungen:** Der Trabant wird von der Jupiterkugel für den Beobachter auf der Erde verdeckt.
3. **Durchgänge:** Der Trabant wandert vor der Jupiterscheibe vorbei
4. **Schattenvorübergänge:** Der Schatten eines Trabanten zieht als pechschwarzes Gebilde über die Jupiterscheibe hinweg.

Zeitliche Beobachtungen an den Verfinsterungen gaben O. RÖMER 1676 einen Hinweis darauf, daß sich das Licht nicht unendlich schnell, sondern mit einer endlichen Geschwindigkeit ausbreiten muß, und zwar mit 214300 km/sec. Die Verfinsterungen verzögerten sich bei großer Entfernung des Jupiter von der Erde und traten andererseits früher ein, wenn sich der Abstand Erde-Jupiter wieder verringerte. Satellit V wurde von E. E. BARNARD 1892 gefunden. VI und VII wurden von PERRINE 1904/05, VIII von MELOTTE 1908, IX bis XII von NICHOLSON 1914, 1938 und 1951, XIII von KOWAL 1974 entdeckt. Raumsonden und Teleskope entdeckten weitere Satelliten, so daß jetzt schon 63 bekannt sind.

Während die inneren Trabanten I bis V nahezu kreisförmige Bahnen in der Äquatorebene des Jupiter beschreiben, sind die Bahnen der äußeren Trabanten stark exzentrisch und gegen die Äquatorebene stark geneigt. Die Satelliten VI, VII, X und XIII bilden dabei eine Gruppe mit

nahezu gleichen mittleren Entfernungen. Die Bahnneigungen sind mit 25° bis 29° (gegen die Jupiterbahnebene) fast identisch. Lediglich die Exzentrizitäten weichen etwas voneinander ab. Die Monde VIII, IX, XI und XII stellen eine weitere Gruppe dar. Ihre Umlaufrichtung erfolgt aber entgegengesetzt zur Rotationsrichtung des Jupiter. Sie sind also rückläufig (retrograd).

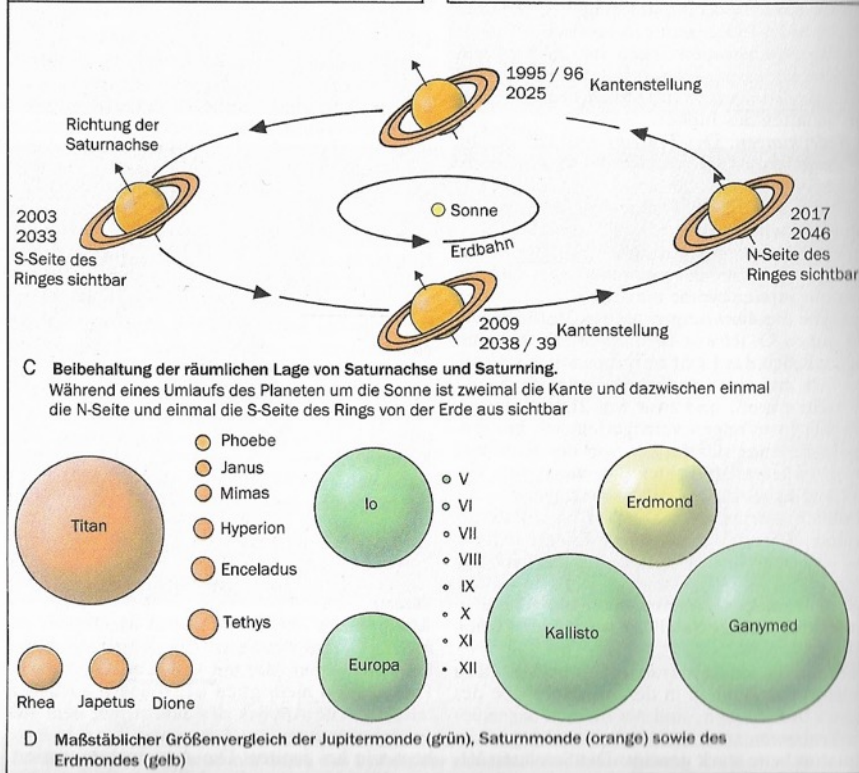
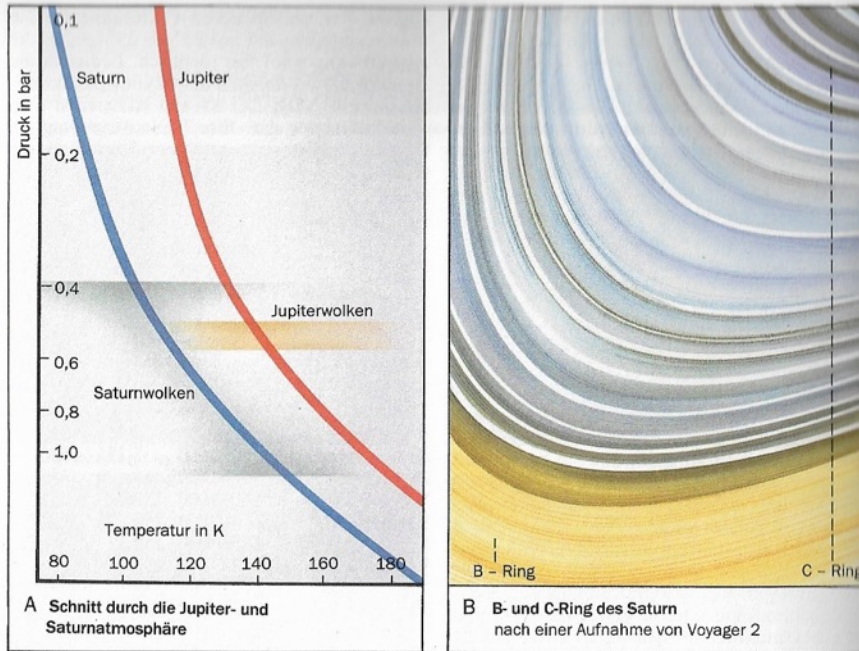
Trabant	mittl. Entfernung v. Jupiter in km	sid. Uml.-Zeit in d	max. Durchmesser in km
XVI Metis	128000	0,295	40
XIV Adrastea	129000	0,298	25
V Amalthea	181000	0,498	270
XV Thebe	222000	0,675	110
I Io	421800	1,769	3630
II Europa	671400	3,551	3138
III Ganymed	1070000	7,155	5262
IV Kallisto	1883000	16,689	4800
XIII Leda	11094000	238,72	16
VI Himalia	11480000	250,57	186
X Lysithea	11720000	259,22	36
VII Elara	11737000	259,65	76
XII Ananke	21200000	631	30
XI Carme	22600000	692	40
VIII Pasiphae	23500000	735	50
IX Sinope	23700000	758	36

Die Voyager-Sonden, vor allem aber Galileo fotografierten auch die Oberflächenstrukturen der größten Trabanten. Io zeigt einen starken Vulkanismus. Seine Oberfläche ist von Schwefelverbindungen überzogen. Offenbar wird sein Inneres durch die Gezeitenwirkung des Jupiter und der Nachbarsatelliten aufgeheizt. Zwischen den Aufnahmen der Voyager-Sonden und Galileo zeigten sich an einigen Stellen markante Veränderungen.

Europa besitzt einen Eispanzer mit Rissen worunter sich sehr wahrscheinlich ein Ozean befindet. Ganymed zeigt zahlreiche Aufschlagkrater, teilweise mit hellen Strahlen. Kallisto ist von Kratern geradezu »gesättigt«. Auffallend ist dort das große Becken Walhalla, dessen äußerster Ring einen Durchmesser von 3000 km hat. Die mittlere Dichte von Io und Europa beträgt 3,5 bzw. 3,0 g/cm³, von Ganymed und Kallisto 1,9 bzw. 1,8 g/cm³. Mit größerem Abstand von Jupiter enthalten diese Satelliten in ihrem Mantel und in der Kruste also mehr Eis. Ferner wurde ein schmaler Jupiterrings entdeckt, der bis zu 57000 km über der Wolkenobergrenze reicht.

Saturn

scheint einen ähnlichen Aufbau wie Jupiter zu haben. Darauf weist nicht nur die geringe mittlere Dichte hin, die mit 0,7 g/cm³ unter allen Planeten am niedrigsten ist, sondern auch der teleskopische Anblick des Saturn, auf dem ein ähnliches System von Zonen und Bändern vorliegt wie bei Jupiter. Die Äquatorzone rotiert mit 10h 14m; zu den höheren Breiten hin



nimmt die Rotationszeit allmählich zu. In $\pm 40^\circ$ Breite sind es 10h 41m. Die Dynamik der Saturnatmosphäre ist nicht wesentlich geringer als bei Jupiter. Die Abplattung ist bei Saturn mit 1:10 am größten. Die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre ähnelt der von Jupiter. Dasselbe dürfte für den inneren Aufbau gelten. Die Temperaturen an der Wolkengrenze liegen bei -150°C . Am Äquator herrscht eine Jetströmung von 500 m/s. In höheren Breiten kommen Windgeschwindigkeiten bis zu 150 m/s vor. Saturn verfügt auch über ein Magnetfeld, das am Äquator etwas schwächer als das irdische ist.

Die Saturnringe

wurden bereits von den frühesten Fernrohrbeobachtern gesehen, aber zunächst nicht als solche erkannt. Erst C. HUYGENS beschrieb 1655 die wahre Struktur des Ringes. Von der Erde aus können die Ringe A, B, C (Flöring, Kreppring), sowie ganz schwach D voneinander unterschieden werden (Abb. S. 98F). Zwischen A und B befindet sich die CASSINI-Teilung, jedoch wurden auch schon früher mehrere andere Teilungen gesehen, insbesondere die ENCKE'sche Teilung im Ring A. Die Raumsonden entdeckten noch den schmalen Ring F in 2,34 Saturnradien, etwa 3000 km außerhalb des sichtbaren Randes des Ringes A, den Ring G in 2,8 Saturnradien und E zwischen 3,3 und etwa 6 Saturnradien Abstand. Die Voyager-Sonden enthüllten Tausende von Teilungen auf den Hauptringen, sowie seltsame radial verlaufende »Speichenmuster« auf dem Ringsystem. Auch in der CASSINI-Teilung fand man zahlreiche sehr schmale Ringe. Die Dicke der Saturnringe liegt bei etwa 1 km und darunter.

Die Ringe bestehen aus zahllosen einzelnen Teilchen, vor allem Eispartikel und vermutlich auch meteoritische Teilchen. Die kleinsten haben eine Größe von etwa 1/1000 mm, die größten kommen auf etwa 10 m. Anscheinend kommen die größten Teilchen im A-Ring, die kleinsten in den Ringen E und F vor. Die Gesamtmasse des Ringsystems beträgt etwa 1/100000 bis 1/1000000 der Saturnmasse. Der ganz überwiegende Teil der Masse befindet sich im B-Ring. Die Ringteilungen führte man ursprünglich auf Kommensurabilitäten mit den Umlaufzeiten einiger Satelliten zurück. Sie würden dann den Lücken im System der Kleinplaneten entsprechen (s. S. 95). So stehen die Umlaufzeiten in der CASSINI-Teilung und Mimas im Verhältnis 1:2. Die Vielzahl der neu entdeckten Teilungen ist aber so nicht erklärbar. Vielleicht »fegen« größere Brocken im Ringsystem bestimmte Bereiche von kleineren Partikeln frei. Eine neue Theorie erklärt die Teilungen durch Dichtewellen, die durch Gravitationseffekte der Satelliten entstehen. Die »Speichen« gehen vielleicht auf magnetische Effekte zurück. Es wurden auch schon elektrostatische Entladungen und Blitze im Ringsystem entdeckt. Die Neigung der Ringe zur

Sichtlinie Erde – Saturn kann übrigens 27° nicht überschreiten. Zweimal während eines Saturnumlaufs kommen von der Erde aus gesehen Kantenstellungen vor.

Die Saturnsatelliten

Trabant	mittl. Entfernng. v. Saturn in km	sid. Uml.-Zeit in d	max. Durchmesser in km
XV Atlas	137670	0,60	40
XVI Prometheus	139353	0,61	140
XVII Pandora	141700	0,63	110
XI Epimetheus	151422	0,69	140
X Janus	151472	0,69	220
I Mimas	185520	0,94	392
Mimas koorbit.	185520	0,94	10
II Enceladus	238020	1,37	500
III Tethys	294660	1,89	1060
XIII Telesto	294660	1,89	34
XIV Calypso	294660	1,89	34
Tethys koorbit.	294660	1,89	20
Tethys koorbit.	294660	1,89	20
?	350000	2,44	20
IV Dione	377400	2,74	1120
XII 1980S6	377400	2,74	36
Dione koorbit.	377400	2,74	30
?	469900	3,79	20
V Rhea	527040	4,52	1530
VI Titan	1221830	15,95	5150
VII Hyperion	1481000	21,28	410
VIII Japetus	3561300	79,33	1460
IX Phoebe	12952000	550,48	220

Phoebe ist rückläufig. Einige Satelliten bewegen sich auf derselben Bahn. Ein ? bedeutet »ungesicherter Satellit«. Prometheus und Pandora bewegen sich auf beiden Seiten des sehr schmalen F-Rings und halten die Teilchen dieses Ringes zusammen (»Schäferhund-Monde«). Epimetheus und Janus tauschen in Abständen von 4 Jahren nach nahen Begegnungen ihre Bahnen untereinander aus. Daneben bewegen sich kleine Satelliten auf den Bahnen einiger großer Satelliten (koorbitale Satelliten). Sie laufen 60° vor oder 60° nach den betreffenden Satelliten nahe den Librationspunkten L_4 und L_5 und ähneln damit dem Fall der Trojaner (s. S. 97).

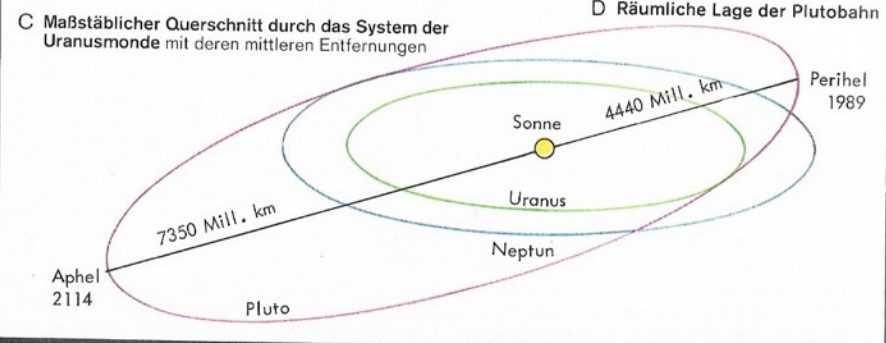
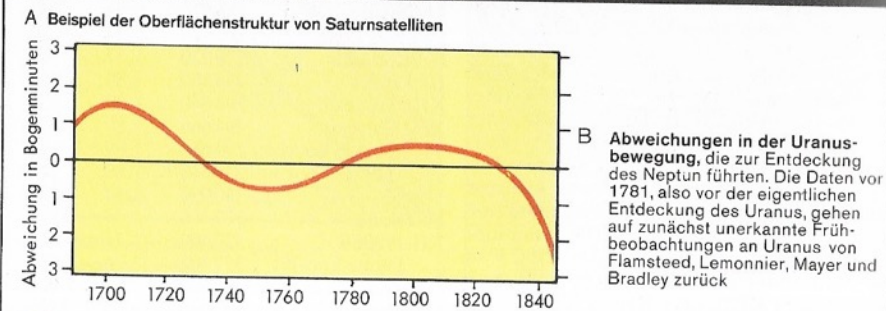
Der von HUYGENS 1655 entdeckte Titan besitzt eine Atmosphäre, die zu 99% aus Stickstoff besteht. Der Oberflächendruck beträgt 1,5 bar. Die Wolken bestehen aus Methan. Die Oberflächentemperatur beträgt etwa -180°C . Die anderen Saturnsatelliten zeigen an ihrer Oberfläche starke Spuren von Aufstürzen anderer Kleinkörper. Besonders auffallend ist ein 400 km großer Krater auf Tethys und ein 130 km großer auf Mimas (Abb. S. 102 A).

Die mittlere Dichte der meisten größeren Saturnsatelliten liegt zwischen 1,0 und 1,4 g/cm³. Das zeigt, daß diese einen dicken Mantel und eine Kruste aus Eis aufweisen müssen. Lediglich Titan hat noch wenigstens eine Dichte von 1,9 g/cm³.



Mimas

Enceladus



E Miranda

F Neptun

Der größte Saturnsatellit Titan kann bereits mit ganz kleinen Fernrohren gesehen werden. Cassini fand Ende des 17. Jh. 4 und W. Herschel Ende des 18. Jh. 2 weitere Trabanten. Je einer wurde von Bond 1848 und Pickering 1898 entdeckt. Raumsonden sowie erdgebundene Aufnahmen zeigten immer wieder weitere meist sehr kleine Satelliten, so daß jetzt insgesamt schon weit über 30 bekannt sind (Abb. S. 98 G). Neben Voyager 1 und 2 (1980 bzw. 1981) war es vor allem Cassini mit der für Titan vorgesehenen Landstufe Huygens, die das Saturnsystem ab 2004 genauer erforschte.

Uranus

Der 1781 von W. Herschel entdeckte Uranus zeigt selbst in größeren Fernrohren nur ein kleines grünliches Scheibchen, auf dem einige Einzelheiten sichtbar sind, die an die bandartigen Wolkenstrukturen von Jupiter und Saturn erinnern. Der Aufbau des Planeten dürfte ähnlich sein. Der Methangehalt in der Atmosphäre ist nach spektroskopischen Befunden jedoch höher. Die Temperatur beträgt -170°C . Uranus hat vermutlich 21 Satelliten. 1851 entdeckte Lassell die ersten beiden in der nachfolgenden Bezifferung, nachdem schon W. Herschel 1787 III und IV aufgefunden hatte. 1948 fand Kuiper den fünften Mond: Miranda. Dieser nur 480 km große Satellit zeigt ein gewaltiges Riff von 20 km Höhe.

Trabant	Mittl. Entfernung v. Uranus in km	sid. Uml.-Zeit in d	Durchmesser in km
V Miranda	129390	1,41	480
I Ariel	191020	2,52	1174
II Umbriel	266300	4,14	1192
III Titania	435910	8,71	1594
IV Oberon	583520	13,46	1546

Voyager 2 entdeckte 1985/86 10 weitere kleine Satelliten innerhalb Miranda. Von innen nach außen: Cordelia, Ophelia, Bianca, Cressida, Desdemona, Juliet, Portia, Rosalind, Belinda und Puck. 1997 wurden von der Erde aus zwei weitere Satelliten außerhalb Oberon und 1999 auf alten Voyager-Aufnahmen nachträglich ein innerer Satellit gefunden. Bis jetzt sind insgesamt bereits 27 Satelliten bekannt. Die großen Satelliten führt die Tabelle auf. 1977 wurde der Uranus-Ring gefunden. Er wurde zunächst durch Helligkeitsabschwächungen eines Sterns nahegelegt, an dem Uranus vorüber zog. Voyager 2 stellte später 11 Einzelringe fest.

Neptun

Auf Grund von Bahnstörungen, die sich bei Uranus zu Beginn des 19. Jh. zeigten, berechneten der französische Astronom U. V. Leverrier und der Engländer J. C. Adams die Bahn eines weiteren Planeten außerhalb Uranus, der schließlich von J. G. Galle in Berlin am 23. 9.

1846 teleskopisch aufgefunden wurde. 1989 flog Voyager 2 an Neptun vorüber. Die Zusammensetzung der Atmosphäre ähnelt der anderer Riesenplaneten, jedoch mit einem höheren Methananteil. An der Obergrenze beträgt die Temperatur -218°C . Eine Rotation des Planeten dauert $16^{\text{h}} 7^{\text{m}}$. Voyager 2 fand auf -21° Breite 1989 einen dunklen Fleck (\rightarrow Great Dark Spot, GDS) mit 12000 km Länge. Eine Drehung des Wirbels dauerte 16 Tage. An seinem Rand lagen höher schwebende weiße Wolken. Nach Aufnahmen des Hubble-Teleskops verschwand der GDS aber nach einigen Jahren wieder, doch entstanden an anderen Stellen neue helle und dunkle Flecken. Der schon 1846 von Lassell entdeckte Satellit Triton ist 2720 km groß, 354800 km von Neptun entfernt. Die Umlaufzeit beträgt 5,877d. Von seinem Innern steigen flüssig-Stickstoff-Geysire auf. Viele Gebiete sind von Eis-Lava überzogen. 1949 fand Kuiper Nereide. Voyager 2 entdeckte weitere Satelliten innerhalb Triton: Naiad, Thalassa, Galatea, Despina, Larissa, Proteus. Heute kennt man 17 Satelliten. Neptun besitzt ein Ringsystem aus mindestens 4 bis 5 Einzelringen mit teilweise hellen Ringsegmenten.

Pluto und Transpluto

1930 fand C. W. Tombaugh auf photographischen Aufnahmen den äußersten Planeten Pluto. Er wurde wie Neptun von verschiedenen Autoren, vor allem von P. Lowell vorhergesagt. Doch stimmen die ermittelten Bahndaten nur wenig mit der Wirklichkeit überein. Sein Durchmesser war lange Zeit umstritten. Nach neueren Untersuchungen dürften es 2246 km sein. Pluto bewegt sich in einer stark exzentrischen Ellipse so um die Sonne, daß er im Perihel mit 4440 Mill. km der Sonne sogar etwas näher steht als Neptun. Im Aphel ist er 7350 Mill. km von der Sonne entfernt. Im Jahre 1989 stand Pluto in seinem Perihel, das nächste Aphel wird erst im Jahre 2113 durchlaufen werden. Wegen der starken Bahnneigung von Pluto gibt es aber keine räumlichen Schnittpunkte zwischen der Neptun- und Plutobahn. Pluto hat wegen seiner Kleinheit keine Atmosphäre. Seine Oberflächentemperatur beträgt etwa -230°C . 1978 gelang J. Christy die Entdeckung des Plutosatelliten Charon, der etwa 1120 km Durchmesser haben dürfte und den Planeten in einem Abstand von etwa 19130 km in 6d 9,3h einmal umkreist.

An der Oberfläche des Pluto kann mit einer vereisten Landschaft gerechnet werden. Die schweren atmosphärischen Gase, die der massenarme Pluto überhaupt noch festhalten könnte, wie z. B. Methan und Ammoniak, sind bei den dortigen tiefen Temperaturen längst ausgefroren. So liegt der Gefrierpunkt von Methan bei -184°C , der von Ammoniak sogar schon bei -78°C . In Sonnennähe besitzt Pluto vielleicht eine temporäre Atmosphäre. Statt dem früher vermuteten Transpluto wurden zahlreiche sog. Kuiper-Objekte entdeckt (s. S. 95).

My!

(s. 95)

