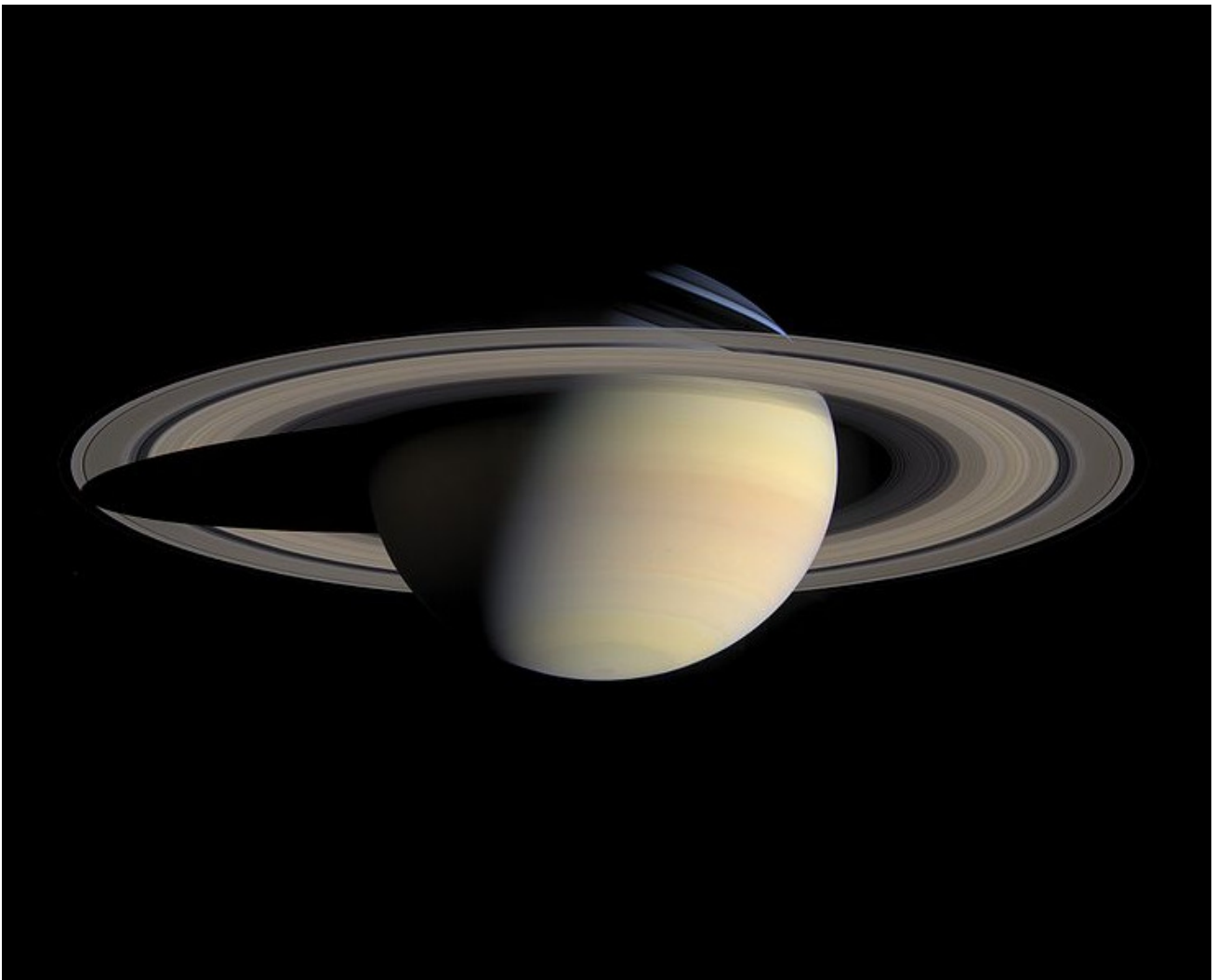


# **Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik**

**M. Scholz**

## **Band 5: Planeten des Sonnensystems II**



**Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun**



M.Scholz

## **Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik**

Band 5: Planeten des Sonnensystems II

Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun

E-Book-Ausgabe 2009

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig.

Bildnachweis: Wikipedia Commons, NASA, ESA, Autor

Kontakt: [mathias.scholz@t-online.de](mailto:mathias.scholz@t-online.de)

**M.Scholz**

# **Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik**

## **Band 5**

### **Planeten des Sonnensystems II**

Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun

**Ausgabe 2009**

**mathias.scholz@t-online.de**



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>RIESENPLANETEN .....</b>	<b>2</b>
<b>GROßPLANETEN .....</b>	<b>2</b>
<b>JUPITER .....</b>	<b>4</b>
ALLGEMEINES .....	3
INNERER AUFBAU .....	4
ATMOSPHERE .....	10
SHOEMAKER-LEVY 9 - IMPAKT .....	20
RINGSYSTEM .....	25
MAGNETFELD .....	30
DATEN .....	34
<b>SATURN .....</b>	<b>35</b>
ALLGEMEINES .....	37
INNERER AUFBAU .....	39
ATMOSPHERE .....	41
RINGSYSTEM .....	43
<i>D-Ring</i> .....	44
<i>C-Ring (Flor- oder Krepp-Ring)</i> .....	44
<i>B-Ring</i> .....	45
<i>A-Ring</i> .....	47
<i>F-Ring</i> .....	47
<i>G-Ring</i> .....	49
<i>E-Ring</i> .....	49
MAGNETFELD .....	58
DATEN .....	62
<b>URANUS .....</b>	<b>63</b>
ALLGEMEINES .....	64
INNERER AUFBAU .....	66
ATMOSPHERE .....	67
RINGSYSTEM .....	71
MAGNETFELD .....	75
<b>NEPTUN .....</b>	<b>77</b>
ALLGEMEINES .....	80
INNERER AUFBAU .....	81
ATMOSPHERE .....	82
RINGSYSTEM .....	84
MAGNETFELD .....	86
DATEN .....	87

Literatur

Index



## Vorwort

Das Ziel dieser mehrbändigen Lehrbuchreihe ist es, grundlegende Erkenntnisse über die Welt außerhalb unserer Erde in systematischer Weise auf einem Niveau, den man im amerikanischen als „undergraduate“ bezeichnen würde, dem Leser näher zu bringen. Dabei wurde sowohl eine gewisse Ausführlichkeit als auch Aktualität (hier etwa 2007) – soweit das bei den einzelnen Themenkomplexen überhaupt möglich ist – angestrebt. Gerade in der Astronomie und Astrophysik beobachtet man gegenwärtig innerhalb kürzester Zeiträume einen enormen Wissenszuwachs, wie man es bei anderen Wissenschaften in diesem Umfang her nur begrenzt kennt. Allein während der Arbeit an dieser Buchreihe erforschte die Raumsonde „Galilei“ das Jupitersystem, erreichte „Cassini“ den Saturn mit seinem komplexen Ringsystem und „Huygens“ die Oberfläche des Saturnmondes Titan; eine ganze Anzahl von „Transplutos“ mit „Eris“ an der Spitze wurden entdeckt, was u.a. dazu führte, daß der neue Begriff „Zwergplanet“ in die astronomische Terminologie eingeführt wurde und die bekannten Merksätze für die Planeten unseres Sonnensystems nur noch bedingt gültig waren und umformuliert werden mußten ...

Während es vor 30 Jahren nicht sonderlich schwierig war, die Anzahl und die Namen der Satelliten der Planeten unseres Sonnensystems aufzusagen, ist das heute längst nicht mehr möglich. Man hat sogar den Eindruck, daß es zunehmend schwieriger wird, für die neuentdeckten Objekte überhaupt Namen zu finden, wie die vielen noch vorläufigen Bezeichnungen der neuentdeckten Jupiter- und Saturnmonde zeigen. Und schließlich soll in diesem Zusammenhang nur noch auf den inflationären Zuwachs an Entdeckungen von Exoplaneten allein im letzten Jahrzehnt hingewiesen werden, die uns viele neue Einsichten in die Struktur und Entstehung von Planeten und Planetensystemen gewährt haben. Gerade an Planeten um weit entfernte Sterne entzündet sich unsere Phantasie, wie die vielen künstlerischen Darstellungen beweisen, die man bei der Recherche im Internet leicht auffinden kann.

Ziel dieser „Einführung“ in die Astronomie und Astrophysik ist es Leser anzusprechen, die einen nicht zu kompakten Einstieg in diese Wissenschaft in deutscher Sprache wünschen und auch daran interessiert sind, an die im Internet oder über Zeitschriften zugängliche Fachliteratur herangeführt zu werden. Angesprochen sind in erster Linie Schüler der Abiturstufe unserer Gymnasien, ihre Lehrer, Studenten der ersten Studienjahre sowie selbstverständlich auch die wachsende Zahl an Liebhaberastronomen (so wie der Autor), die mehr wissen wollen über die Objekte, die sie in ihren „Backyard“- Observatorien oder an Volks- und Schulsternwarten beobachten.

Auf Zitierungen wurde im Text – dem Charakter eines Lehrbuches entsprechend – weitgehend verzichtet. Fachaufsätze lassen sich mittlerweile leicht über Google Scholar oder über das Astrophysics Data System (ADS) recherchieren.

Zum Schluß möchte ich mich noch bei meinem Freunden, Bekannten und Kollegen bedanken, die mich mittelbar und unmittelbar während der Zeit der Erarbeitung dieser Buchreihe unterstützt haben.

M.Scholz

Herbst 2007



### Riesenplaneten

Als Riesenplaneten werden Jupiter und Saturn bezeichnet. Beide haben im Vergleich zu ihrem Durchmesser nur einen relativ kleinen festen Kern. Alles andere ist im Prinzip eine ausgedehnte und dichte Wasserstoff-Helium-Atmosphäre. Der Druck, der aufgrund ihrer großen Masse in ihren Inneren aufgebaut wird, reicht aus, um den Wasserstoff in einen metallischen Zustand zu überführen. Darin fließen elektrische Ströme, die – über den Dynamoeffekt – den Aufbau eines starken und ausgedehnten Magnetfeldes bewirken.

Beide Planeten strahlen mehr Energie ab, als sie von der Sonne erhalten. Für den Strahlungsexzeß macht man interne Entmischungsvorgänge verantwortlich, die zur Thermalisierung von Gravitationsenergie führen.

Die meisten Erkenntnisse über Jupiter und Saturn haben Satellitenmissionen erbracht. Besonders „Galilei“ (1995-2003) und „Cassini“ (ab 2004) sind hervorzuheben. Aber auch die beiden Vorbeiflüge der Voyager-Sonden (1979 Jupiter, 1980/81 Saturn) haben bahnbrechende Ergebnisse erbracht, die den interessierten Menschen auf der Erde völlig neue, unerwartete und geheimnisvolle Welten offenbarten. Über die Ergebnisse dieser Missionen soll im Folgenden berichtet werden.

### Großplaneten

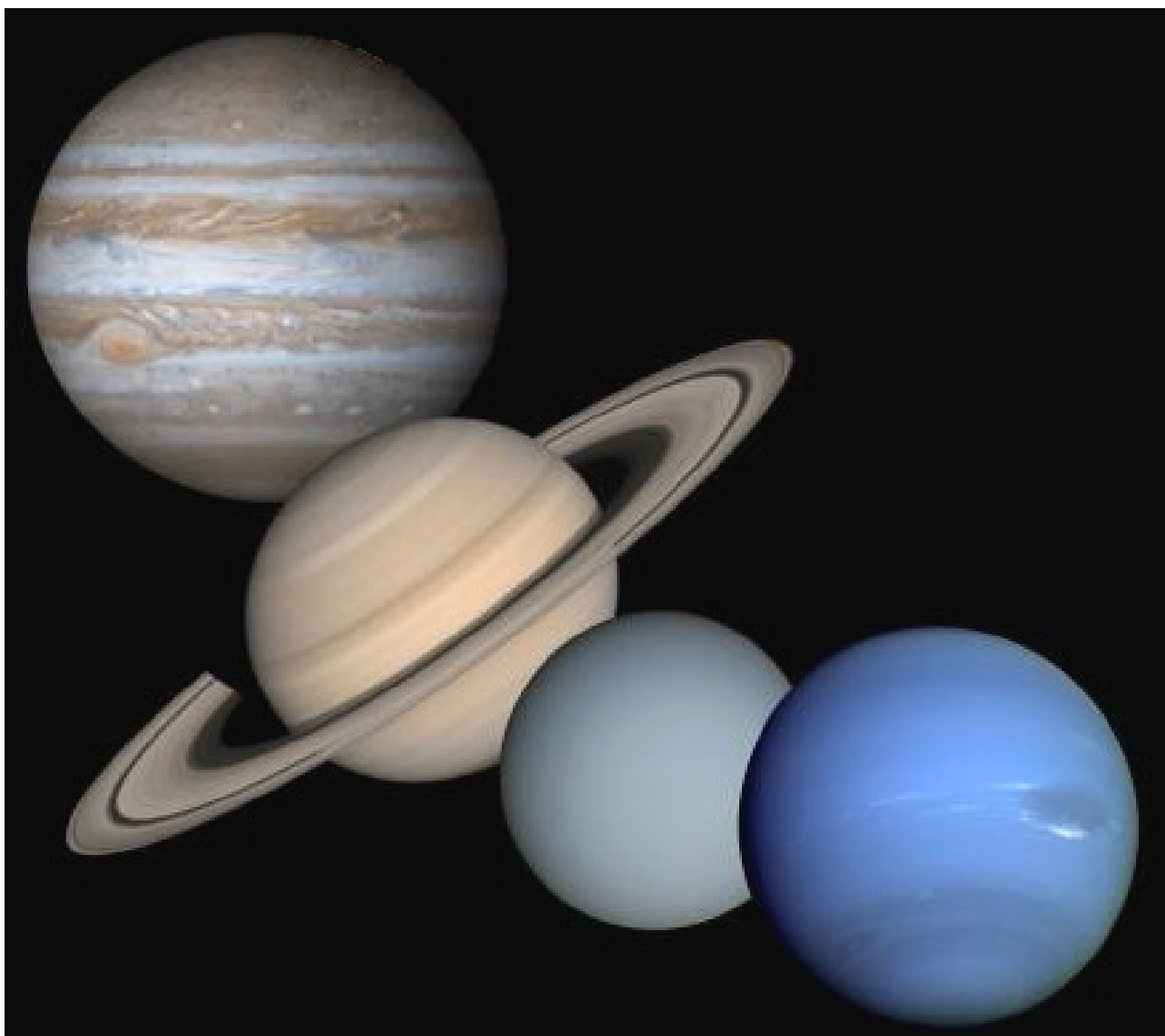
Die Planeten Uranus und Neptun ähneln sich sehr stark in ihrer Größe, ihrem Aufbau und in der chemischen Zusammensetzung. Der Grund für diese Übereinstimmung ist offensichtlich in der Entstehungsgeschichte dieser beiden Planeten zu suchen. Es erscheint auch durchaus plausibel, daß die Bedingungen im Bereich der protoplanetaren Gas- und Staubwolke außerhalb der Saturnbahn so waren, daß sich dort im Vergleich zu Jupiter und Saturn nur noch kleinere Gasplaneten (und zwar mit einem höheren Anteil an schwereren Elementen als Helium) bilden konnten. Das erklärt zumindest die Unterschiede in bezug auf die Elementhäufigkeit, die ja bei Jupiter und Saturn weitgehend dem der Sonne (und damit dem des Urnebels insgesamt) entspricht. Computersimulationen lassen dieses Bild jedoch in letzter Zeit etwas fragwürdig erscheinen. Insbesondere sind die Massen von Uranus ( $14.5 M_E$ ) und Neptun ( $17.2 M_E$ ) einfach zu groß, als das sie aus dem Bereich des Urnebels stammen können, wo sie heute ihre Bahn ziehen. Berechnungen zeigen, daß in diesem Abstand nur Gasplaneten mit einer Masse von maximal 10 Erdmassen möglich sind. Es könnte deshalb sein (E.THOMMES et. al.), daß Uranus und Neptun zusammen mit Jupiter und Saturn im Bereich der Jupiterbahn entstanden sind und dann erst durch die gravitative Wirkung des bedeutend massereicheren Jupiter ( $318 M_E$ ) auf ihre heutigen Bahnen „katapultiert“ wurden. Ein abschließendes Urteil in dieser Beziehung ist mit dem gegenwärtigen Kenntnisstand der Planetenkosmogonie noch nicht möglich und man kann auf die Ergebnisse weiterer Untersuchungen gespannt sein.

Im Unterschied zu den Riesenplaneten besitzen Uranus und Neptun in ihrem Inneren keine Bereiche, wo der Druck so große Werte annimmt, daß der molekulare Wasserstoff in eine leitfähige metallische Modifikation übergeht. Neben dem großen Masseunterschied ist es allein schon aus diesem Grund

## Gasplaneten

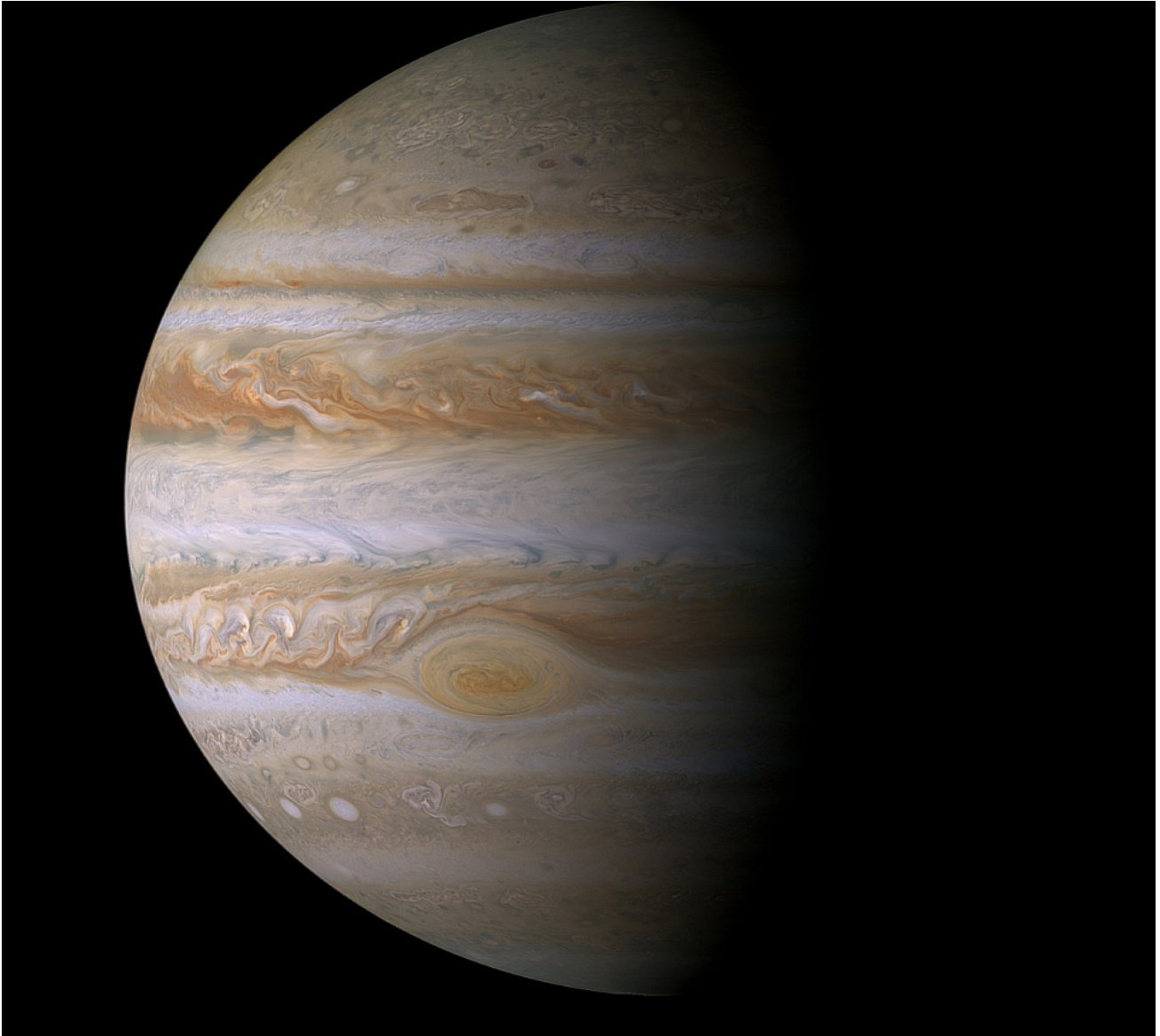
legitim, die Planeten Uranus und Neptun auch begrifflich von den Riesenplaneten abzugrenzen. Deshalb sollen sie im Folgenden als „Großplaneten“ bezeichnet werden. Im englischen Sprachraum ist auch der Begriff der „*Ice giants*“ gebräuchlich.

Den überwiegenden Teil unseres Wissens über Uranus und Neptun sowie ihrer größeren Monde verdanken wir der amerikanischen Sonde Voyager 2, die auf ihrer „Grand Tour“ durch das äußere Sonnensystem am 24.1.1986 den Uranus und Ende August 1989 den Neptun passierte und dabei hervorragende Bilder und Meßwerte zur Erde übertrug. Aber auch die bodengestützte Astronomie sowie Untersuchungen mit dem Weltraumteleskop Hubble haben viele neue Erkenntnisse über die äußersten der Großen Planeten unseres Sonnensystems erbracht.



Die Gasplaneten des äußeren Sonnensystems im Größenvergleich

## Jupiter



Weit hinter dem Planeten Mars beginnt das Reich der Riesenplaneten, einer faszinierenden Welt, deren schon früh geahnte Exotik uns erst in den letzten 30 Jahren durch Forschungssatelliten wie Pioneer 10 und 11, Voyager 1 und 2 sowie Galileo und Cassini offenbart worden ist. Dabei sind es nicht einmal die Planeten selbst, die für große Überraschungen gesorgt haben, sondern in erster Linie ihre größeren Monde. Das war in der Geschichte der Astronomie schon einmal so, als im Dezember des Jahres 1609 SIMON MARIUS (1573-1624) und etwa zeitgleich GALILEO GALILEI (1564-1642) die vier großen Jupitermonde zum ersten Mal in ihren selbstgebauten Fernrohren erspähten. Der eine nannte sie Sidera Brandenburgica (von ihm stammen übrigens die Bezeichnungen Europa, Ganymed, Kallisto und Io) und der andere Sidera Medicea. Heute sind sie als die „Galileischen Monde“ bekannt und man kennt ihre Oberfläche mittlerweile genauso gut wie die Oberfläche des Erdmondes. Doch mehr darüber im Kapitel über die Planetenmonde.

## Jupiter

Jupiter mit seinen vier großen Monden spielte auch eine wichtige Rolle bei der ersten Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit. OLAF RÖMER (1644-1710) war es, der im Jahre 1676 erste Anzeichen dafür fand, daß sich das Licht mit einer zwar sehr großen, trotzdem aber endlichen Geschwindigkeit ausbreitet. Ihm fiel auf, daß die Zeitintervalle zwischen den sogenannten Jupitermondverfinsterungen (d.h. wenn ein Mond in den Schatten des Jupiters eintaucht und deshalb im Fernrohr unsichtbar wird) kürzer werden, wenn sich die Erde dem Jupiter näherte, als in der Periode, wenn sich Jupiter und die Erde voneinander entfernten. Zwar war der von ihm bestimmte Wert von rund 214000 km/s verglichen mit modernen Messungen zu klein, aber durchaus in der richtigen Größenordnung.

Eine weitere wichtige Entdeckung aus dieser Zeit stammt von ROBERT HOOKE (1635-1703). Er sah als erster eine atmosphärische Erscheinung auf dem Jupiter, welche heute unter dem Namen „Großer Roter Fleck“ allgemein bekannt ist. Natürlich konnte er die Natur dieses bereits in kleinen Amateurfernrohren sichtbaren Objekts nicht richtig deuten, aber anhand dessen Bewegung über die Jupiterscheibe gelang es ihm, die Rotation des Jupiters zweifelsfrei nachzuweisen. Heute weiß man, daß der „Große Rote Fleck“ keine auf der Planetenoberfläche fixierte Erscheinung, sondern ein riesiges elliptisches Wirbelsystem ist, welches seit mindestens 300 Jahren bestand hat (wahrscheinlich gibt es ihn aber schon seit einigen 100000 Jahren).

Jupiter wurde – wie bereits erwähnt – schon durch mehrere Raumsonden besucht. Als Erste erreichte am 4. Dezember 1974 Pioneer 10 und ein Jahr später Pioneer 11 den Riesenplaneten. Letztere setzte ihren Flug zum Planeten Saturn fort, den sie fünf Jahre später auch erreichte. Beide Sonden werden in ferner Zukunft unser Sonnensystem endgültig verlassen und wie die ihnen nachfolgenden Voyager-Sonden im interstellaren Raum verschwinden. Wissenschaftlich am wertvollsten waren jedoch die Ergebnisse von Voyager 1 und 2 im Jahre 1979, welche die Planetenforscher so faszinierten, daß es einfach unumgänglich wurde, eine weitere und diesmal lang andauernde Mission zu planen und auszuführen. Diese Mission der NASA erhielt den Namen „Galileo“ nach dem berühmten italienischen Renaissance-Gelehrten, der 1609 in Jupiter mit seinen Monden ein kopernikanisches Weltsystem im kleinen sah und damit zu einem überzeugten Anhänger der Lehre von NICOLAUS COPERNICUS (1473-1543) wurde. Galileo erreichte 1995 Jupiter, setzte dort eine Atmosphärensonde ab und erforschte in den folgenden 7 Jahren besonders intensiv die großen Jupitermonde. Das Meiste was wir heute über den größten Planeten unseres Sonnensystems und seine Monde wissen, verdanken wir dieser außergewöhnlich erfolgreichen Mission.

Das große und starke Gravitationsfeld von Jupiter wird von den Bahnmechanikern interplanetarer Raumsonden ausgenutzt, um Satelliten bei einem nahen Vorbeiflug zu beschleunigen und ihnen eine neue Richtung zu geben. Nur so war z.B. die „Grand Tour“ der Voyager-Sonden möglich, die bis auf Pluto alle großen Planeten besuchten. 1992 wurde das gleiche Verfahren angewendet, um „Ulysses“ auf eine Bahn über die Pole der Sonne und 1999 „Cassini“ in Richtung Saturn abzulenken.

1994 geriet Jupiter völlig unerwartet in das Blickfeld der Öffentlichkeit. Grund dafür war der Komet Shoemaker-Levy 9, der sich zu dieser Zeit auf Kollisionskurs zum Jupiter befand. 65 Jahre vorher geriet ein nicht sonderlich auffälliger kurzperiodischer Komet in eine instabile Bahn um den Riesenplaneten. Er bewegte sich seitdem unerkannt auf stark verschlungenen Bahnen um Jupiter bis er am 23. März 1993 von EUGENE und CAROLINE SHOEMAKER sowie DAVID H. LEVY auf einer Aufnahme mit dem 65 cm-Schmidtteleskop des Mount Palomar-Observatoriums entdeckt wurde. Nachträglich

stellte sich heraus, daß das unscheinbare längliche Gebilde auf der Fotoplatte ein zerplatzter, d.h. in einzelne Fragmente zerfallener Komet war, der nach den Berechnungen der Himmelsmechaniker im Sommer des folgenden Jahres auf den Planeten einschlagen sollte. Es war also noch genügend Zeit, um die Beobachtung dieses bisher einmaligen Ereignisses sorgfältig vorzubereiten. Als es dann Mitte Juli 1994 soweit war, wurde der Einschlag der insgesamt 21 Fragmente weltweit in allen Wellenlängenbereichen beobachtet. Auch das Weltraumteleskop Hubble und die sich auf dem Weg zum Jupiter befindliche interplanetare Sonde Galileo waren in das Beobachtungsprogramm involviert. Viele Amateurastronomen konnten danach die Spuren der Einschläge in der Jupiteratmosphäre in Form von dunklen Flecken noch wochenlang verfolgen. Selbst das Fernsehen nahm weltweit Anteil an diesem Crash, der, wenn er auf der Erde stattgefunden hätte, wohl das Ende unserer Zivilisation bedeutete...

Jupiter als massereichster Planet des Sonnensystems leistet sich ein ausgedehntes System aus Monden. Bis Ende 2006 sind von diesem System insgesamt 63 Mitglieder bekannt, wobei für die Planetologen besonders die Eismonde Europa, Ganymed und Kallisto sowie – als Exot – Io interessant sind.

### Allgemeines

Jupiter ist der größte Planet des Sonnensystems. Sein Äquatordurchmesser beträgt 142796 km und er vereinigt in sich eine Masse, die 318 Erdmassen entspricht. Er erreicht am Nachthimmel zwar niemals den Glanz der Venus, aber dafür beherrscht er während der alle 13 Monate sich wiederholenden Oppositionszeiten die gesamte Nacht. Das ist wahrscheinlich auch der Grund, weshalb er im Altertum den römischen Namen für Zeus, dem Beherrscher des Olymps, erhalten hat. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt er 4331 Tage (knapp 12 Jahre).

Aufgrund seines großen Winkeldurchmessers ist Jupiter ein beliebtes Beobachtungsobjekt für Amateurastronomen. Das Erste, was bei einem Blick durchs Fernrohr auffällt, ist seine starke Abplattung (1/15.9) sowie die feinstrukturierten pastellfarbenen Wolkenbänder, die sich parallel zum Äquator anordnen. Beide sind das Resultat einer vergleichsweise großen Rotationsgeschwindigkeit. Für eine Drehung um die eigene Achse benötigt Jupiter etwas weniger als 10 Stunden. In einer Winternacht zur Oppositionszeit kann man deshalb leicht den gesamten Planeten betrachten. Im Gegensatz zu den erdartigen Himmelskörpern ist die Rotationsdauer jedoch stark breitenabhängig. Der Grund dafür ist, daß sich die Materie Jupiters in seinem Inneren vorwiegend im flüssigen Zustand befindet und sich der Planet deshalb nicht wie ein rotierender starrer Körper verhalten kann. Aus der Beobachtung von Einzelheiten in den Wolkenbändern lassen sich ziemlich genau zwei verschiedene Rotationsperioden ableiten, die man als System I und als System II bezeichnet. Diese Unterscheidung ist wichtig, wenn man die Position bestimmter Strukturmerkmale in der Jupiteratmosphäre vermessen und anschließend verfolgen möchte.

Das System I gilt für die äquatorialen Regionen (genauer zwischen  $+9^\circ$  nördlicher und  $-9^\circ$  südlicher Breite). Dieser Bereich rotiert mit 9h 50m 30s etwas schneller als die angrenzenden Gebiete, die außerhalb dieses Streifens liegen. Letztere bilden das System II mit einer Rotationsperiode von 9h 55m 41s. Die Radioastronomen kennen übrigens noch ein System III. Dieses System wird seit 1962 von der IAU als Referenzsystem vorgeschrieben und wird über eine Radioquelle in den tieferen Schichten des Planeten definiert: 9h 55m 29.37 s. Die streifenartigen Wolkenbänder und die dazwischen liegenden

helleren Zonen repräsentieren extrem starke Windsysteme, deren Strömungsrichtung durch die rotationsbedingten Corioliskräfte bedingt ist.



Typischer Anblick des Jupiters mit Großem Roten Fleck und dem Mond Io in einem Amateurteleskop

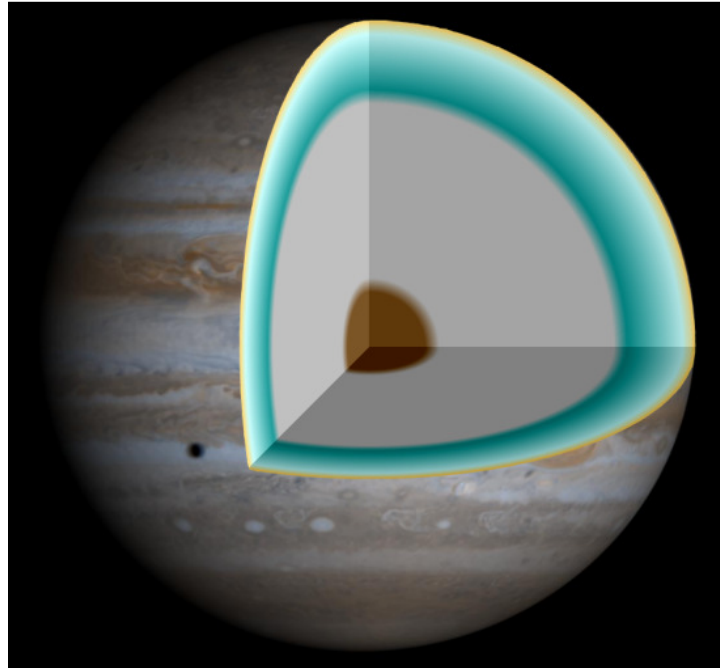
Bis zur „*in situ*“ -Erforschung durch Raumsonden war über den Aufbau des Planeten nur recht wenig bekannt. Aus der geringen mittleren Dichte von  $1330 \text{ kg/m}^3$  folgte lediglich, daß er nicht oder nur in einem sehr geringen Maße aus Silikaten und Metallen aufgebaut sein kann. Die Elementverteilung (in bezug auf deren Häufigkeit) entspricht vielmehr dem der Sonne, d.h. in anderen Worten, er besteht überwiegend aus Wasserstoff und Helium. Spektroskopisch konnten in den höheren Atmosphärenschichten von der Erde aus Methan- und Ammoniak nachgewiesen werden. Die auffälligen Farben in den Wolkenbändern weisen schon rein visuell auf eine komplexe Chemie der Atmosphärogase hin.

Seit dem 4.März 1979, dem legendären Vorbeiflug der amerikanischen Sonde Voyager 1, wissen wir, das Jupiter genauso wie Saturn ein Ringsystem besitzt. Mit entsprechender Technik ist es selbst mit Teleskopen von der Erde aus im Infraroten beobachtbar.

### Innerer Aufbau

Informationen über den inneren Aufbau der Riesenplaneten lassen sich prinzipbedingt nur indirekt gewinnen. Die Atmosphärensonde von Galileo lieferte z.B. nur Daten bis in eine Tiefe von 150 km unterhalb der Wolkenobergrenze. Tiefer kann man mit einem technischen Gerät auch kaum vordringen, da die Druckverhältnisse dies einfach nicht zulassen. Man ist deshalb in erster Linie auf Modellvorstellungen angewiesen, die mit den beobachteten Parametern – mittlere Dichte, Rotation, Trägheitsfaktor, chemische Zusammensetzung, Energiebilanz, Magnetfeld etc. – im Einklang stehen. Es läuft also darauf hinaus, daß man unter vernünftigen Annahmen Temperatur, Dichte- und

Druckverteilungen berechnet, welche die aus den Beobachtungen abgeleiteten Daten möglichst gut widerspiegeln. Derartige Modelle werden „statische“ Modelle genannt. Ein anderer Ansatzpunkt geht von der Frage aus: wie muß sich ein undifferenzierter Protoplanet entwickeln, damit er nach einigen Milliarden Jahren Entwicklung ungefähr so aussieht wie Jupiter heute? Derartige Modelle werden als „evolutionär“ bezeichnet. Beide Modelle führen übrigens zu einem ähnlichen Gesamtbild, welches im Folgenden erläutert werden soll.



Innerer Aufbau des Riesenplaneten. An den zentralen Gesteinskern schließt sich eine mächtige Hülle aus flüssigen metallischen Wasserstoff und Helium an, die stufenlos in die äußere Atmosphäre übergeht, die aus überwiegend molekularen Wasserstoff besteht.

Was man mit Hilfe eines Fernrohrs von der Erde aus sehen kann, ist lediglich die Atmosphäre mit unterschiedlich hohen Wolkenschichten. Alles was darunter ist, muß aus theoretischen Erwägungen und aus Hochdruckexperimenten erschlossen werden. Doch was haben Hochdruckexperimente mit Jupiterforschung zu tun? Es ist klar, daß schon aufgrund der riesigen Masse des Planeten (318 Erdmassen) die Materie in seinem Inneren unter einem so großen Druck stehen muß, wie er auf der Erde kaum herstellbar ist (mehrere 100 GPa). Dieser extrem hohe Druck führt zu einem hochgradig exotischen Materiezustand, den man als „Metallischen Wasserstoff“ bezeichnet. Diese Wasserstoffmodifikation, die in den dreißiger Jahren des vorigen Jahrhunderts von EUGENE P. WIGNER (1902-1995) aus theoretischen Überlegungen heraus vorhergesagt wurde, hat einige bemerkenswerte Eigenschaften, die ihn auch für irdische Belange interessant machen. Man vermutet z.B. Supraleitfähigkeit bei Zimmertemperatur und – wenn er nach Druckentlastung seine Eigenschaften beibehält (was z.Z. noch rein hypothetisch ist) – daß man ihn als einen extrem leichten Werkstoff (z.B. in Form eines metallischen Glases) verwenden kann.

Am *Lawrence Livermore National Laboratory* in Kalifornien konnten 1998 die Physiker eine Wasserstoffprobe für Sekundenbruchteile mit Hilfe einer zweistufigen Gaskanone in den metallischen Zustand überführen und damit die theoretischen Vorhersagen bestätigen. Vereinfacht ausgedrückt wird

dabei ein Projektil auf eine Probenkammer, die flüssigen Wasserstoff enthält, geschossen. Beim Aufprall auf die Probenkammer entsteht ein enormer Druck, der den darin enthaltenen Wasserstoff komprimiert und ihn dabei - zumindest teilweise - in einen metallischen Zustand umwandelt. Die Ergebnisse dieser Versuche führten zu einer in bezug auf den inneren Aufbau des Jupiters wichtigen Aussage: Der Planet Jupiter besteht wahrscheinlich bereits ab einer Tiefe von 7000 bis 8000 Kilometer fast ausschließlich aus dieser exotischen Flüssigkeit (aufgrund der hohen Temperaturen im Inneren des Riesenplaneten kann sich der Wasserstoff auch bei Drücken oberhalb 300 GPa nicht verfestigen).

Es soll an dieser Stelle noch darauf hingewiesen werden, daß die Materie im Innern Jupiters nicht nur aus Wasserstoff besteht (ca. 71%), sondern auch noch rund 27% Helium enthält.

Den äußersten Teil des Jupiters nimmt seine mächtige, in Schichten mit verschiedener chemischer Zusammensetzung unterteilte Atmosphäre ein. Sie besteht hauptsächlich aus molekularem Wasserstoff und Helium und einer Vielzahl von weiteren, z.T. organischen Verbindungen, die zwar im Verhältnis zu Wasserstoff und Helium nur Spurenstoffe darstellen, die aber wesentlich für die dichte Wolkendecke und ihre Färbung sind.

### **Metallischer Wasserstoff**

Wasserstoff kennt man auf der Erde als leicht brennbares zweiatomiges Gas. Unter extrem hohen Druck kann sich dieses nichtleitende Gas verfestigen und nach und nach (bei steigendem Druck) in einen einatomigen und elektrischen Strom leitenden Zustand übergehen. Dieser Phasenübergang beginnt bei einem Druck von ungefähr 300 GPa. Bei diesem Druck rücken die Moleküle so weit zusammen, daß sie teilweise dissoziieren und die Hüllenelektronen dadurch die Möglichkeit erhalten, von einem Atom zum anderen zu springen. Liegt eine Spannung an, dann fließt ein elektrischer Strom. Aus einem guten Isolator ist ein Halbleiter geworden der (so erwartet man zumindest) bei weiterer Druckerhöhung irgendwann in einen supraleitfähigen Zustand übergeht. Die Hochdruckexperimente bestätigen diese Tendenz, da mit steigendem Druck der spezifische Widerstand der Probe kontinuierlich absinkt.

Französische Wissenschaftler unter Leitung von PAUL LOUBEYRE („*Commissariat a' l' Energie Atomique*“) konnten weitere interessante Eigenschaften von Wasserstoff bei einem Druck von rund 320 GPa entdecken. Zum Einen konnten sie die theoretische Vorhersage verifizieren, daß der Abstand zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband der Elektronenhülle (dem sogenannten Gap) mit steigendem Druck abnimmt um bei ca. 450 GPa völlig zu verschwinden (die Metallisation ist damit abgeschlossen, Mott-Übergang). Ab diesem Moment können sich alle Elektronen frei bewegen. Bei angelegter Spannung fließt ein elektrischer Strom wie in jedem Stück Kupferdraht auch. Daneben entdeckten sie, wie sich das ursprünglich farblose Gas mit steigendem Druck immer mehr verfärbte und zwar über Gelb, Orange, Rot bis hin zu einem undurchsichtigen Schwarz.

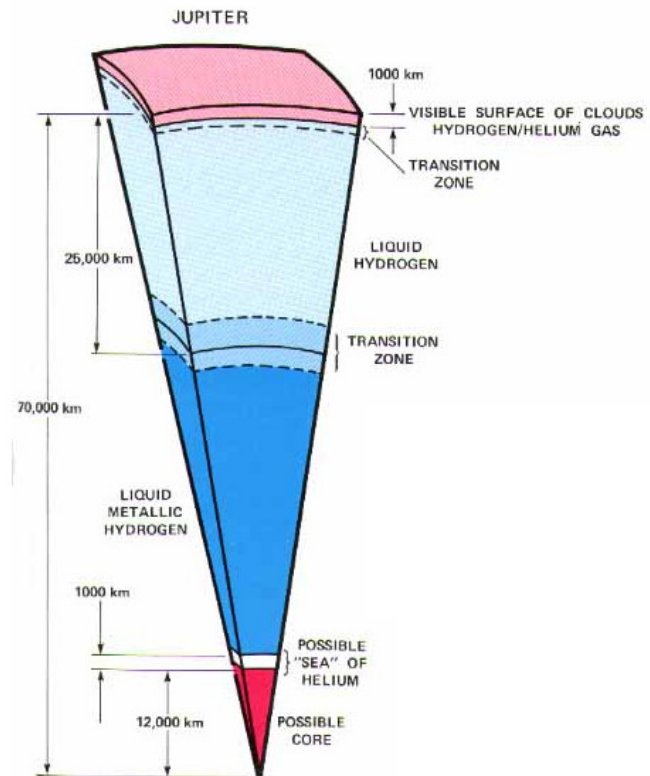
Die Untersuchungen im Hochdrucklabor ergaben damit folgende für die Planetologie wesentliche Erkenntnisse:

- Molekularer Wasserstoff beginnt bereits bei einem Druck von 40 GPa zu dissoziieren. Der Dissoziationsgrad nimmt von da an mit steigendem Druck allmählich zu bis bei etwa 300 GPa der Wasserstoff vollständig atomisiert ist.
- Minimale metallische Leitfähigkeit entsteht bereits bei  $p=140$  GPa ( $T=4000$  K). Das entspricht beim Jupiter einer Tiefe von ca. 7000 km.

Aufgrund der damit verbundenen Leitfähigkeit können im Inneren des Riesenplaneten bereits oberflächennah Ströme fließen, welche die Ursache für das extrem starke Magnetfeld des Jupiters sind.

Diese Atmosphäre geht bei immer größer werdenden Druck bereits nach wenigen Tausend Kilometern unter der sichtbaren Wolkendecke quasi stufenlos in den flüssigen Aggregat-zustand über. Ab einer Tiefe von ca. 7000 Kilometern (d.h. bei einem Druck von ca. 140 GPa und  $T \sim 4000$  K) beginnt bereits der Wasserstoff zu dissoziieren und die Flüssigkeit nimmt langsam die Eigenschaften eines Metalls an. Bei einem Druck von 300 GPa liegt der Wasserstoff schließlich vollständig atomisiert und elektrisch leitend vor. Die elektrischen Ströme in diesem Bereich sind offensichtlich für das große magnetische Dipolmoment des Planeten ( $1.4 \cdot 10^{27} \text{ A/m}^2$ ) und damit für sein riesiges Magnetfeld ursächlich verantwortlich.

Diese Schicht setzt sich bis zum Gesteinskern des Jupiters fort, der nach Meinung der Planetologen maximal einen Durchmesser von ungefähr 20000 km besitzen könnte und somit ungefähr 4% der Jupitermasse ausmacht. Nach einigen Modellen ist es durchaus möglich, daß sich dieser Kern in einen inneren Kern aus Silikaten und Metallen und in einen äußeren Kern aus einem heißen wasserdominierten Gemisch aus Methan und Ammoniak (Planetologen nennen das „Eis“) differenziert. Die Dichte dürfte bei ungefähr  $2.3 \cdot 10^4 \text{ kg m}^{-3}$  und die Temperatur bei 25000 K liegen. Der Druck erreicht im Zentrum Werte zwischen 1200 und 8000 GPa (diese Angaben sind Mittelwerte aus verschiedenen Modellen. Exakte Werte sind natürlich nicht bekannt,



Es soll jedoch nicht unerwähnt bleiben, daß es nach neueren Modellrechnungen durchaus möglich ist, daß die Größe von Jupiters Kern bisher weit überschätzt wurde. Es gibt mittlerweile einige ernst zunehmende Hinweise daß - im Gegensatz zum Saturn - das „Kernmaterial“ Jupiters immer noch in der Wasserstoff-Helium-Schale gemischt vorkommt und sich noch nicht ausdifferenziert hat.

Neben Jupiter besitzt nur noch der Planet Saturn eine ausgedehnte Schale aus flüssigem massivem Wasserstoff.

Jupiter strahlt genauso wie Saturn mehr Energie ab als er von der Sonne erhält. Der beobachtete Strahlungsüberschuß beträgt dabei etwa das 1.67-fache der eingestrahlenen Energie. Demnach muß es eine innere Energiequelle geben, welche den Riesenplaneten mit zusätzlicher thermischer Energie versorgt. In Betracht kommen dabei die bei einer Vergrößerung des inneren Kerns freigewordene Gravitationsenergie (schwere Elemente wandern nach unten, wobei ihre potentielle Gravitationsenergie thermalisiert wird) und die Energie, die bei Akkretionsprozessen frei wird. Eine weitere, aber wesentlich geringere Energiequelle stellt die Diffusion von Helium durch den Mantel aus metallischem Wasserstoff dar, die dazu tendiert, daß sich das Wasserstoff-Helium-Verhältnis in Richtung Zentrum

immer mehr verringert. Dieser Effekt ist temperaturabhängig, da die Mischbarkeit beider Komponenten mit geringer werdender Temperatur abnimmt. Auch bei diesem Vorgang wird thermische Energie frei, die einen Beitrag zur Wärmebilanz von Jupiter liefert. Der letztere Effekt spielt besonders beim Saturn eine wichtige Rolle, da die Temperaturen in der flüssigen Wasserstoffschicht geringer sind als beim massereicheren Jupiter. Das Wasserstoff / Helium-Verhältnis betrug z.B. im solaren Urnebel etwa 0.39. Bei Jupiter beobachtet man heute ein Verhältnis von 0.31 und bei Saturn von 0.06. Das zeigt, daß beim Planeten Saturn der Differentiationsprozeß schon sehr weit fortgeschritten ist.

### **Phasendiagramm von Wasserstoff**

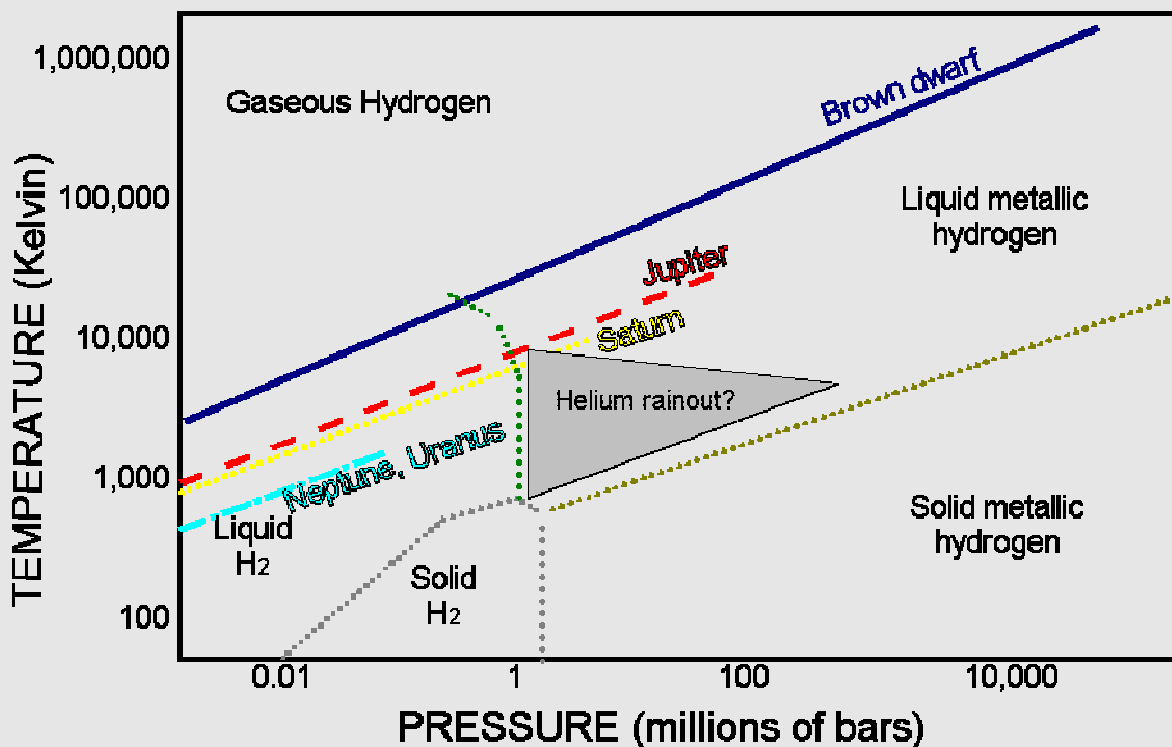
Da die Riesenplaneten Jupiter und Saturn überwiegend aus Wasserstoff bestehen, bestimmen die einzelnen Phasen dieses Stoffs im Wesentlichen auch den vertikalen Aufbau beider Planeten. Es ist deshalb wichtig zu wissen, in welchen Temperatur- und Druckbereichen der Wasserstoff gasförmig, flüssig oder fest ist und unter welchen Bedingungen er metallische Eigenschaften annimmt. Die Relation, die für einen bestimmten Stoff oder für ein Stoffgemisch die Beziehung zwischen Temperatur, Kompression (Druck) und Dichte herstellt, bezeichnet man gewöhnlich als Zustandsgleichung:

$$P = P(T, \rho, X)$$

(X=Zusammensetzung des Stoffgemischs)

Für reale Stoffe reicht in der Regel eine derartige Gleichung nicht aus, um das Verhalten bei unterschiedlichen Temperatur- und Druckverhältnissen zu beschreiben. Das ist insbesondere immer dann der Fall, sobald Phasenübergänge (wie sie z.B. im Erdinneren in vielfältiger Form vorkommen) berücksichtigt werden müssen. Die einzelnen Phasen, in dem ein bestimmter Stoff in der Natur vorkommt, besitzen dann unterschiedliche Zustandsgleichungen. Da das Verhalten von Materie bei hohen Drücken und Temperaturen auch heute noch nicht in allen Einzelheiten verstanden ist, lassen sich Zustandsgleichungen für reale Stoffe nur bedingt und nur unter starken Vereinfachungen theoretisch herleiten. In diesem Zusammenhang soll nur an die Van-der-Waals-Gleichung für reale Gase erinnert werden. Genau wie diese Gleichung sind fast alle Zustandsgleichungen Näherungen, die heute fast ausschließlich empirisch, d.h. durch aufwendige Experimente bestimmt werden. Deshalb ist es nicht verwunderlich, daß eine der wichtigsten Aufgaben der „experimentellen“ Planetologie in der Bestimmung dieser Beziehungen für die Stoffe und Stoffgemische besteht, aus denen die einzelnen Planeten aufgebaut sind. Erst mit ihrer Kenntnis lassen sich halbwegs realistische Modelle, aus denen dann der Temperatur-, Dichte- und Druckverlauf als Funktion des radialen Abstandes entsprechend der Bedingungen für das hydrostatische Gleichgewicht folgt, erstellen. Im Unterschied zu den Gesteinsplaneten sind dabei die Riesenplaneten (die man sich als fast reine Wasserstoff-Helium-Kugeln vorstellen kann) noch vergleichbar einfach aufgebaut. Kennt man also die Zustandsgleichung für ein Wasserstoff-Heliumgemisch, läßt sich unter Verwendung gewisser Randbedingungen das Innere der Riesenplaneten modellieren.

Das Phasendiagramm des Wasserstoffs wurde in den letzten Jahrzehnten im Zusammenspiel von theoretischen Untersuchungen und Stoßwellenexperimenten (dazu komprimiert man z.B. ein Wasserstoffgas-Target mittels eines aus einer speziellen Kanone abgeschossenen Hochgeschwindigkeitsprojektils und mißt bei den dabei im Target entstehenden hohen Temperaturen und Drücken die elektrische Leitfähigkeit, um beispielsweise den Parameterbereich abzugrenzen, wo Wasserstoff metallische Eigenschaften bekommt) qualitativ recht gut erforscht, obwohl der genaue Verlauf bestimmter Phasengrenzen im Diagramm noch immer recht unsicher ist. Lediglich die Lage der für das Verständnis des inneren Aufbaus der Riesenplaneten unerheblichen flüssig-fest-Phasengrenze für molekularen Wasserstoff ist experimentell recht gut gesichert.



Der Übergang von der Gas- in die Flüssigphase des Wasserstoffs erfolgt bei den Riesenplaneten ohne einen expliziten Phasenübergang, da die Druck- und Temperaturwerte in ihren Inneren immer oberhalb des kritischen Punktes für molekularen Wasserstoff (1.3 MPa, 33 K) verlaufen. Es hat deshalb keinen Sinn, unter diesen Bedingungen eine Grenze zwischen der Atmosphäre und dem flüssigen Planeteninneren anzugeben.

Aufgrund der über jeder Schicht des Planeten liegenden Massen erhöht sich kontinuierlich Druck und Temperatur je mehr man sich dem Planetenzentrum nähert. Dieser Prozeß wird adiabatische Kompression genannt und kann im Phasendiagramm durch eine Kurve (Adiabate) dargestellt werden.

Die Obergrenze eines Gasplaneten wird nach Definition durch die 1 bar (=0.1 MPa) - Isobare festgelegt. In der Jupiteratmosphäre entspricht diesem Druckwert (der dem Luftdruck auf der Erdoberfläche entspricht) einer Temperatur von 165 K. 20000 km tiefer erreicht der Druck bei einer Temperatur von 6800 K (das ist mehr als die Temperatur der „Sonnenoberfläche“) ungefähr  $3 \cdot 10^{11}$  Pa. Hier erwartet man den Beginn des Übergangs vom flüssigen molekularen zu flüssigen metallischen Wasserstoff. Helium und andere Stoffe stellen lediglich Verunreinigungen in diesem See aus dem leichtesten bekannten „Metall“ dar und sind darin weitgehend gelöst. Die Konzentration von Helium nimmt dabei in Richtung Zentrum erwartungsgemäß zu. Es gibt sogar einen Bereich (im Phasendiagramm durch ein graues Dreieck dargestellt), wo Wasserstoff und Helium im Gleichgewicht nicht koexistieren können. Das bedeutet, das Helium im metallischen Wasserstoff nicht mehr löslich ist und deshalb in Tropfenform ausfällt. Besonders bei Saturn betrifft dieser Effekt einen großen Teil seines Inneren. Da Helium spezifisch schwerer ist als Wasserstoff, wird es in diesem Bereich quasi „ausregnen“ und in Richtung Zentrum diffundieren, wo es sich ansammeln als auch wieder (aufgrund der jetzt höheren Drücke und Temperaturen) mit dem Wasserstoff mischen kann. Die bei diesem Entmischungsvorgang freigesetzte potentielle Gravitationsenergie stellt zumindest bei Saturn eine wichtige interne Energiequelle dar, die einen Teil des im Infraroten beobachteten Strahlungsexzesses des Planeten gut zu erklären vermag.

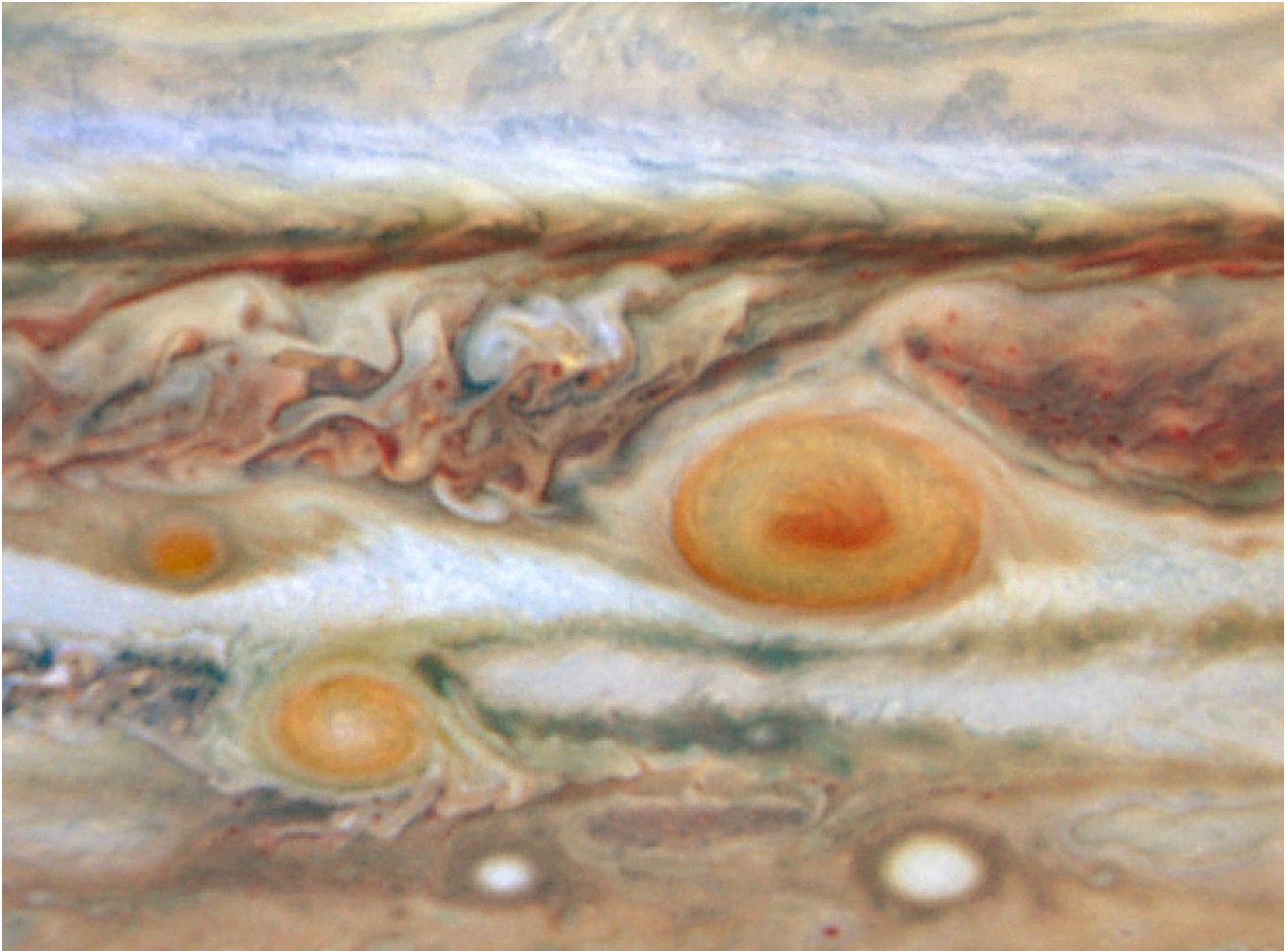
## Atmosphäre

Jupiter hat in Bezug auf die Häufigkeit der einzelnen chemischen Elemente ungefähr die gleiche Zusammensetzung wie die Sonne, d.h. er besteht fast ausschließlich aus einem Gemisch von Wasserstoff und Helium. In seiner Atmosphäre findet man darüber hinaus – wenn auch im Vergleich dazu nur in Spuren - weitere Stoffe wie beispielsweise Ammoniak, Methan, Wasserdampf und Schwefel sowie verschiedene Arten von Kohlenwasserstoffen. Dazu kommen noch – wenn auch in weitaus geringerer Konzentration - eine Vielzahl von weiteren, z.T. organischen Verbindungen, die insbesondere für die auffälligen Farben in den Wolkenbändern und Zonen sorgen. Ein Grund dafür ist, daß die Temperaturen im Bereich der oberen Wolkenschichten mit ca. 140 K die Existenz derartiger Moleküle ermöglichen. Bei dieser Temperatur bleibt z.B. Methan gasförmig während Ammoniak zu Wolken auskondensiert.

Der vertikale Aufbau der Jupiteratmosphäre wird durch den Temperatur-, Druck- und Dichtegradienten bestimmt. Das Wettergeschehen findet dabei in einer im Vergleich zum Planetenradius extrem dünnen Schicht von maximal 200 km Dicke statt. In der oberen Hälfte dieser Schicht beobachtet man verschiedene Wolkenformationen unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung. Wolken aus kristallinen Ammoniak ( $NH_3$ ) bilden das obere Stockwerk. Die Temperatur beträgt hier zwischen 140 und 150 K, so daß Ammoniak auskondensieren kann. Etwas tiefer haben sich die Umgebungsbedingungen schon soweit verändert, daß eine Schicht aus Ammoniumhydrosulfid ( $NH_4HS$ ) entsteht. Und noch etwas tiefer, ca. 50 Kilometer unter den Ammoniakwolken, sollte sich schließlich eine Wolkenschicht aus Wasserdampf bzw. Wassereiskristallen befinden.

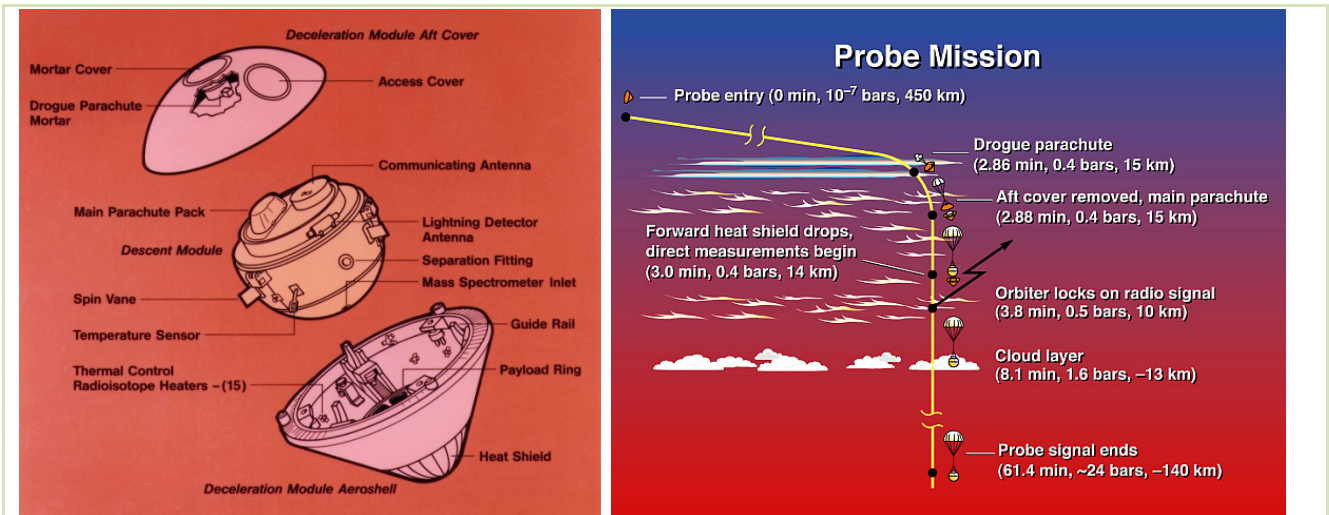
Eine genaue Analyse des vertikalen Aufbaus gelang am 7. Dezember 1995 dem Eintauchkörper der am 18.10.1989 gestarteten amerikanisch-deutschen Jupitersonde „Galileo“. Sie trat (natürlich zufällig und ungeplant) an einer Stelle der Jupiteratmosphäre ein, wo die Wolkenbedeckung anscheinend nur sehr gering war. Da dort Wärmestrahlung aus dem Jupiterinneren austritt, erscheint das Gebiet auf Infrarotaufnahmen deutlich heller als die Umgebung. Man spricht deshalb auch von einem „hot spot“. Beim Abstieg konnten die Meßgeräte der Sonde nur geringe Anzeichen von Ammoniakewolken feststellen. Auch die zweite Wolkenschicht erwies sich nach den Nephelometer-Messungen als nicht sehr ausgeprägt und war eher nebelartig-dünn. Von etwaigen Wasserwolken konnten überhaupt keine Anzeichen gefunden werden. Zumindest an der Eintrittsstelle war die Jupiteratmosphäre außergewöhnlich trocken ( $H_2O$ -Konzentration  $\sim 1700$  ppm). Das deckt sich übrigens mit der Beobachtung, daß elektrische Entladungen (Blitze) auf dem Jupiter im Mittel um den Faktor 10 mal seltener auftreten als auf der Erde (das bedeutet nicht, daß es lokal auf dem Jupiter keine eindrucksvollen Blitzentladungen = „Gewitter“ gibt. Genau das Gegenteil ist der Fall, wie die Aufnahmen des Galileo-Orbiters zeigen. Die einzelnen Blitzentladungen sind sogar im Mittel um den Faktor 10 stärker. Bei diesen Blitzen können – ähnlich wie in Urey's Experiment – organische Stoffe entstehen, die z.B. für die feinen Farbnuancen in den Wolken verantwortlich sind). Andererseits ergab sich aus der Analyse der Einschläge des Kometen Shomaker-Levy-9 eine mindestens zehnmal so hohe Wasserdampfkonzentration als letztendlich gemessen wurde. Die Frage, warum sich die Jupiteratmosphäre als trockener erweist als erwartet, kann noch nicht endgültig beantwortet werden. Vielleicht gilt dieser Befund auch nur lokal und ist dem Umstand zu verdanken, daß die

Eintauchsonde von Galileo zufällig gerade in ein quasi wolkenfreies Gebiet gefallen ist. Die Beobachtung von gewaltigen Gewitterzellen im Bereich des Großen Roten Flecks lassen sich dagegen nur erklären, wenn man wesentlich höhere Wasserdampfkonzentrationen voraussetzt, als die Meßgeräte der Eintauchsonde registriert haben.



Bereich der Äquatorbänder und Zonen mit dem „Großen Rotem Fleck“ und zwei kleineren sowie zwei „White Oval Spots“. Man beachte auch die ausgeprägten anderen Strukturen in der mächtigen Wolkenhülle des Riesenplaneten, die sich nur sehr schwer deuten lassen.

Während des Abstiegs wurde die Sonde von starken, aber erstaunlicherweise sehr gleichmäßigen Windströmungen erfaßt, wobei die Windgeschwindigkeit während der gesamten Meßzeit um die 650 km/h lag. Aus der genauen Analyse der Bewegung der Sonde während des Abstiegs konnte man herauslesen, daß die Energie, welche die Strömungen quasi antreibt, zu einem großen Teil aus dem Jupiterinneren stammen muß. Wäre die Ursache für dieses Strömungsverhalten die von der Sonne eingestrahelte Energie, dann sollte die Windgeschwindigkeit mit der Tiefe abnehmen. Die Jupiteratmosphäre wird also offensichtlich von unten her aufgeheizt.



## Technischer Aufbau der Eintauchsonde von Galilei sowie Missionsverlauf

Auf Jupiter fallen im Wesentlichen zwei verschiedene Wolkenformationen auf: dunkle Bänder (Gürtel) und helle Zonen, die einige tausend Kilometer breit sind und sich parallel zum Äquator anordnen. Besonders in den Wolkenbändern kann man sehr viele Details in Form von farbigen kommaartigen Streifen, von verschiedenen ovalen Flecken unterschiedlicher Größe und Farbe bis hin zum berühmten „Großen Roten Fleck“ beobachten. Auf den Aufnahmen der Planetensonden wie Voyager und Galileo sieht man außerdem noch äußerst komplexe Strömungsmuster, die jeden Atmosphärenphysiker und Strömungsmechaniker begeistern können. Alle diese Turbulenzen sind ein Ausdruck von sehr komplizierten Strömungsverhältnissen die wiederum ihre Ursache in der vergleichsweise hohen Rotationsgeschwindigkeit des Planeten haben. Aufgrund der Corioliskraft besteht die Tendenz, daß jede vertikale Strömung in eine zonale Ost-West-Strömung umgewandelt wird. Ihr Einfluß auf ein Windsystem wird gewöhnlich durch die dimensionslose Rossby-Zahl charakterisiert. Sie stellt das Verhältnis zwischen Trägheitskraft und Corioliskraft dar. Ist diese Zahl viel kleiner als 1, dann besagt das, daß die Corioliskraft überwiegt. Und genau diese Bedingung ist in den äquatornahen Breiten des Jupiters erfüllt so daß es nicht verwunderlich ist, daß die Grundströmungen einen stark zonalen Charakter aufweisen. Aber selbst nahe an den Polen gibt es noch klar ausgeprägte Ost-West-Windsysteme. Bis zum Vorbeiflug von Voyager im Jahre 1979 hatte man dort eigentlich konvektiv angetriebene vertikale Strömungen vermutet. Das alles zeigt, daß der Temperaturgradient zwischen Äquator und Pol im Gegensatz zur Erde (der durch die Sonneneinstrahlung hervorgerufen wird und beim Jupiter an der Wolkenobergrenze nur wenige Grad beträgt) keinen größeren Beitrag zur Ausbildung der großräumigen Strömungsmuster leisten kann.

Während die Rossby-Zahl das großräumige Zirkulationsmuster vorgibt, sind die Strömungen in kleineren Maßstäben bedeutend komplizierter. Hier überlagern sich verschiedene und z.T. völlig irreguläre Strömungsmuster, deren Aussehen sich zeitlich sehr schnell ändern kann. Darin eingelagert sind Wirbelsysteme unterschiedlicher Größenordnung. Die größeren Wirbel würden auf der Erde den Hoch- und Tiefdruckgebieten entsprechen. Dabei bezeichnet man Bewegungen um ein Tiefdruckzentrum als zyklonal, Bewegungen um ein Hochdruckzentrum dagegen als antizyklonal. In den dunkleren Bändern werden hauptsächlich Zyklone und in den helleren Zonen Antizyklone beobachtet. Beispiele für derartige Strukturen kennt jeder Amateurastronom, der mit seinem Fernrohr den Jupiter beobachtet: den „Großen Roten Fleck“ („GRF“) und die „Weißen ovalen Flecke“ („WOS“

= „*white oval spot*“). Diese Objekte sind sehr stabil (der GRF ist seit 1664 bekannt) und führen in bezug auf den rotierenden Planeten zusätzlich eine eigenständige Driftbewegung aus.



Detailaufnahme des „Großen Roten Flecks“ (GRF) sowie einiger „Weißen Ovaler Flecken“ (WOS). Diese Objekte lassen sich bereits mit Amateurfernrohren von der Erde aus verfolgen.

Die Lage und Größe der Bänder und Zonen ist zeitlich sehr stabil. Deshalb wurde für ihre Benennung eine eigene Nomenklatur entwickelt. NEB ist z.B. das nördliche Äquatorband, SEB das südliche Äquatorband und EZ die Äquatorialzone usw. Ihre Lage hat sich z.B. in den vier Monaten Zwischenraum zwischen den Vorbeiflügen der beiden Voyagersonden um weniger als 1.5% verändert. Die ausgeprägtesten Strömungsstrukturen – Verwirbelungen und Flecke – findet man an den Band-Zonen-Randgebieten. Die zu den dunkleren Bändern gehörenden Wolken liegen etwas tiefer als die helleren in den zonalen Windgebieten. Letztere kennzeichnen aufsteigende Strömungen wo quasi wärmeres Material aus der unteren Jupiteratmosphäre nach oben transportiert wird. In den Bändern sinkt dagegen kühleres Material ab. Die vertikalen Strömungsverhältnisse sind also konvektiv bedingt. Die unterschiedliche Färbung kommt dadurch zustande, daß an der jeweiligen Wolkenobergrenze unterschiedliche Druck- und Temperaturverhältnisse herrschen. Das hat offensichtlich Einfluß auf die Anreicherung von chemischen Spurenstoffen in den ansonsten weißen Wolken aus Ammoniak und Ammoniumhydrosulfid. Man vermutet, daß für die Färbung u.a. Schwefel- und Phosphorverbindungen verantwortlich sind von denen man weiß, daß ihre Färbung stark von der Temperatur abhängt. Die bräunliche Farbe der Bänder kann aber auch davon herrühren, daß dort mit dem Hydrosulfid assoziierte Stoffe Kettenmoleküle bilden, die genau diese Färbung verursachen.

Zeitrafferaufnahmen der Voyager-Sonden und insbesondere von Galileo und Cassini zeigen deutlich die entgegengesetzt strömenden Ost- und Westwinde. Auf Jupiter werden pro Hemisphäre fünf bis sechs dieser „zonalen Jetstreams“ gezählt. Insbesondere an den Rändern dieser Strömungen bilden sich vielfältige Verwirbelungen aus – Wirbelstürme, die sich i.d.R. langsamer als die Jetstreams bewegen,

rotieren und dort meistens innerhalb von Tagen und Wochen regelrecht zerrieben werden. Auf diese Weise tragen sie quasi sogar zur räumlichen Stabilisierung der zonalen Jets bei.

Viel interessanter als diese kleinen Wirbel sind ihre größeren Pendanten von Mond- bis mehr als Erdgröße. Am bekanntesten sind der bereits erwähnte „Große Rote Fleck“ (GRF, zuerst von ROBERT HOOKE (1635-173) im Jahre 1664 gesehen) und die „Weißen Ovalen Flecke“, die seit 1939 beobachtet werden. Hier handelt es sich um quasistabile, langlebige meteorologische Erscheinungen, die sich zwischen zwei entgegengesetzt bewegenden Jetstreams hindurch-wälzen und dabei selbst antizyklonal rotieren.

Der GRF hat eine ziemlich stabile Nord-Süd-Ausdehnung von ca. 12000 km und eine zeitlich veränderliche Ost-West-Ausdehnung von gegenwärtig ca. 25000 km. Noch am Ende des 19. Jahrhunderts wurde eine Längenausdehnung von ca. 40000 km gemessen. Seitdem ist er rapide geschrumpft und wird, wenn dieser Vorgang anhält (was eher unwahrscheinlich ist), um 2040 seine ovale Form eingebüßt haben. Der „Große Rote Fleck“ war und ist auch nicht immer rot. Es gibt Zeiten, wo er stark verblaßt und manchmal sogar fast weiß erscheint. Für beide Vorgänge – seine Schrumpfung und seine Farbänderung – gibt es noch keine allgemein akzeptierte Erklärung.

Seit dem Vorbeiflug der Voyager-Sonden weiß man definitiv, daß der GRF ein außergewöhnlicher Wirbelsturm ist, für den es auf der Erde nichts Vergleichbares gibt. Hurrikane wie sie z.B. jedes Jahr in der Karibik entstehen, sind immer Zyklone. Die Wolken rotieren um ein Zentrum außergewöhnlich tiefen Luftdrucks, dem „Auge“ des Hurrikans. Der GRF bewegt sich dagegen antizyklonal, d.h. entgegen dem Uhrzeigersinn. Dabei oszilliert sein kleinerer Durchmesser zusätzlich mit einer Amplitude von knapp 2000 km und einer Periode von rund 90 Tagen. Wolken an seiner Peripherie benötigen ungefähr 7 Tage um den riesigen Wirbel einmal zu umrunden.

Beobachtungen der Galilei-Sonde ergaben weitere interessante Details:

- § der Kern des Wirbels überragt die umgebenden Wolkenschichten um ca. 20 km
- § das Zentrum des Spots hat eine Temperatur von ca. 113 K und ist damit der kälteste Ort auf dem Jupiter. In den aufsteigenden Gasmassen kondensiert Ammoniak aus und bildet dabei dichte Wolken.
- § am Rand des Flecks existieren kurzlebige Gewitterzellen, die bis 30 km über die normalen Wolken reichen. Sie deuten auf merkliche Konzentrationen von Wasserdampf hin.
- § in den aufsteigenden Gasen sind Stoffe enthalten, die eine starke UV-Absorption hervorrufen

Der GRF wird offensichtlich über eine Art Konvektionsströmung aus dem heißen Inneren des Planeten gespeist. Seine Langlebigkeit hängt mit dem Fehlen einer festen Oberfläche auf dem Planeten zusammen, was eine wirksame Dissipation der Bewegungsenergie verhindert. Die Ursachen seiner Existenz (und der anderen langlebigen Wirbel), seine Dynamik und seine Struktur werden z.Z. von verschiedenen Forschergruppen auf der Welt untersucht. Dabei werden die Strömungsvorgänge auf der Grundlage der bekannten Navier-Stokes-Gleichungen numerisch modelliert und auf Hochleistungsrechnern simuliert. Auch experimentelle Untersuchungen (z.B. zur Ausbildung von zonalen Strömungen und zur Wirbelbildung in zylindrischen Flüssigkeitstanks) sind durchgeführt worden, um die Strömungsverhältnisse und Wirbelbilder auf dem Jupiter besser zu verstehen.



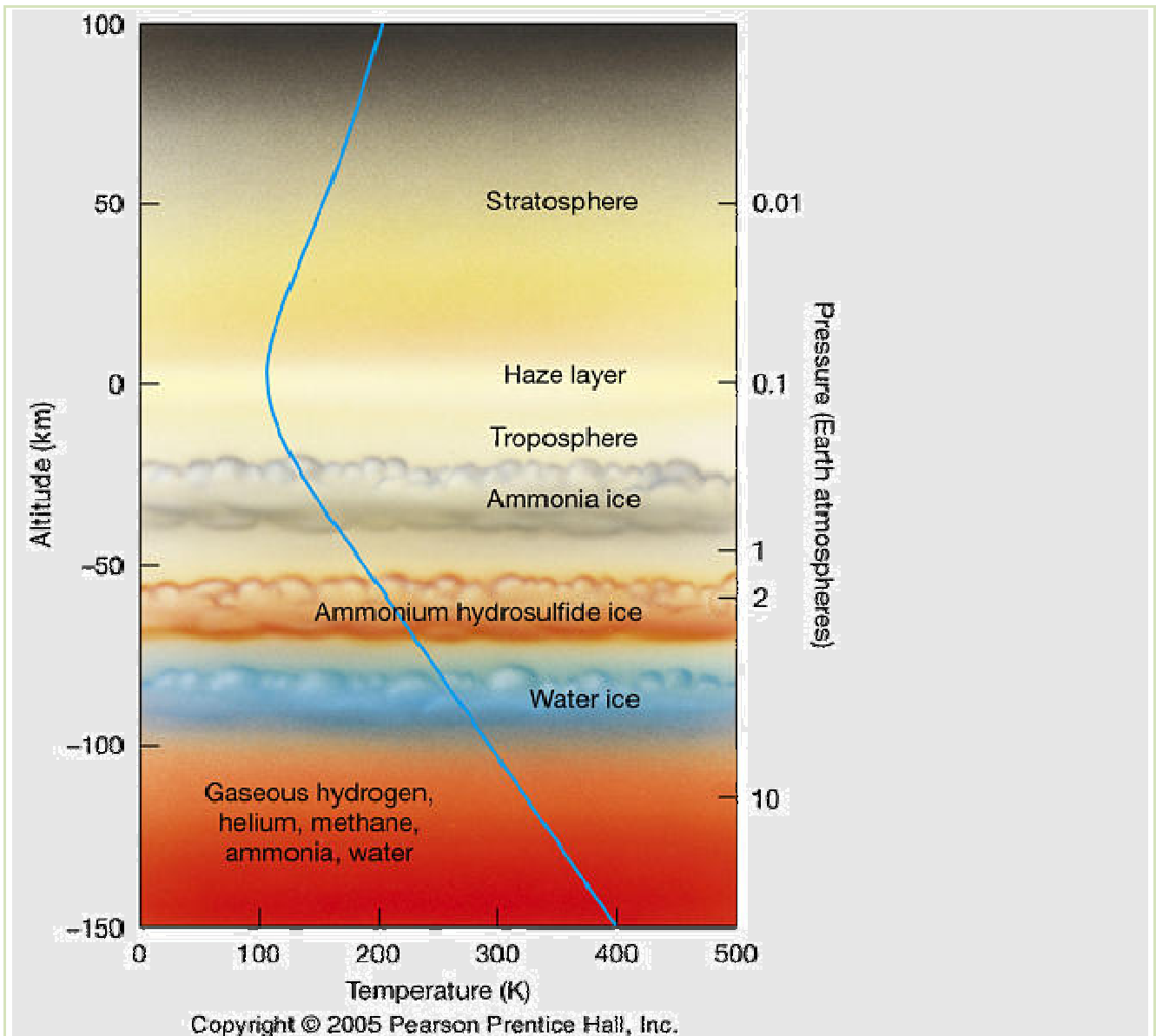
Photomosaik des „Großen Roten Flecks“ aus Aufnahmen der Raumsonde Galilei

Neben dem GRF haben drei ca. marsgroße „*White Oval Spots*“ (sogenannte WOS-Objekte) sowohl die beobachtenden Astronomen (darunter auch viele Amateure) als auch Atmosphärenphysiker und Strömungsmechaniker beschäftigt. Sie bewegen sich etwas südlicher als der GRF in der Jupiteratmosphäre und stellen im Gegensatz zu ihm Zyklone dar. Wie bereits erwähnt, wurden diese Objekte 1939/40 zum ersten Mal gesichtet. Seitdem haben diese Sturmsysteme schon mehrfach den GRF passiert oder sind, wenn sie untereinander zu nahe gekommen sind, voneinander abgeprallt. 1998 kamen zwei von ihnen wieder recht nahe zusammen und verschmolzen – wegen der damaligen Konjunktionslage des Planeten von der Erde unbeobachtbar – zu einem einzigen Wirbelsturm. Ein Jahr später bewegten sich die beiden verbliebenen Wirbel (jeder hatte einen Durchmesser von rund 9000 km) aufeinander zu und vereinigten sich innerhalb von knapp einem Monat zu einem einzigen Spot von 12000 km Durchmesser. Dieser Vorgang konnte u.a. mit dem Hubble-Teleskop verfolgt werden. Aus der Modellierung derartiger Vorgänge erhofft man sich Informationen über die tieferen Schichten der Jupiteratmosphäre.

### **Vertikaler Aufbau und thermische Struktur der Jupiteratmosphäre**

In dieser Infobox soll der am besten bekannte Teil der Jupiteratmosphäre etwas näher vorgestellt werden. Er liegt innerhalb des Druckbereich von einigen Hunderstel bis zu einigen Zehn bar ( $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ) und ist im Gegensatz zu den darunterliegenden Schichten direkten Beobachtungen zugänglich. In ihm spielt sich das im Detail bis jetzt nur in seinen Grundzügen verstandene „Wettergeschehen“ des Riesenplaneten ab, welches durch eine komplexe Chemie und durch ein nicht minder komplexes Strömungsverhalten charakterisiert ist.

## Jupiter



Der vertikale Temperatur - und Druckverlauf (gegeben durch die Funktionen  $T(r)$  und  $P(r)$ ) läßt sich sowohl theoretisch unter Anwendung der Gasgesetze sowie der Gesetze für das hydrostatische Gleichgewicht als auch aus direkten Beobachtungen - z.B. in dem man das Verblässen eines Sterns photometrisch verfolgt, welcher von der Planetenscheibe bedeckt wird - ableiten. Der Temperaturverlauf in der Stratosphäre (d.h. bei einem atmosphärischen Druck zwischen  $10^{-4}$  und  $10^{-2}$  bar) konnte beispielsweise aus Sternbedeckungen bzw. (bis in die Troposphäre hinein) aus der Beobachtung von Radiowellen der Jupitersonden beim Verschwinden hinter dem Planeten bestimmt werden. Auch die Eintauchsonde des Galileo-Orbiters lieferte Ende 1995 diesbezügliche Meßdaten bis in die oberen Schichten der Troposphäre (d.h. bis zu einem Druck von  $\sim 22$  bar).

In der Stratosphäre, genauer oberhalb der 100 mbar Grenze, überwiegt der Strahlungstransport, d.h. die Jupiteratmosphäre wird ab diesem Bereich optisch dünn und die durch Wasserstoff-Wasserstoff - und Wasserstoff-Helium-Stöße verursachte Opazität im infraroten Bereich nimmt mit geringer werdenden Gasdruck schnell ab. Die Strahlung kann also weitgehend ungehindert in den kosmischen Raum entweichen. Die trotzdem beobachtete Temperaturzunahme in den höheren Schichten der Jupiteratmosphäre wird in erster Linie durch bestimmte Spurengase (z.B. Methan) und durch Aerosole hervorgerufen, die in der Lage sind, solare Infrarotstrahlung zu absorbieren (solare Strahlungsheizung).

Bei noch geringerem Drücken scheinen auch die im Bereich der Pole auftretenden „Polarlichter“ einen Beitrag zur Heizung von Jupiters Hochatmosphäre zu liefern (Aurora-Heizung).

Oberhalb der Stratosphäre erhebt sich die Thermosphäre, wo die Temperatur (bei einer Höhe von 800 km über dem 1 bar-Niveau) einen Wert von rund 900 K erreicht.

Unterhalb der 2 bar -Grenze erfolgt der Energietransport in der Atmosphäre immer mehr durch Konvektion (und nicht durch Strahlungstransport, wie in den Schichten darüber) und der Temperaturgradient  $dT/dr$  nähert sich nach und nach dem adiabatischen Gradienten  $-g/c_p$  ( $g$  Gravitationsbeschleunigung,  $c_p$  spezifische Wärme bei konstantem Druck) an, was ab Höhe der Troposphäre zu einem gleichmäßigen Temperaturanstieg mit wachsender Tiefe um ca.  $2 \text{ K km}^{-1}$  führt. Die erwartete Temperaturverteilung läßt sich deshalb durch das einfache Gesetz

$$T(r) = T_0 + c_p (r - r_0)$$

beschreiben.

Die spezifische Wärme  $c_p$  hängt dabei ausschließlich von dem Verhältnis molekularer Wasserstoff zu Helium sowie vom Verhältnis zwischen Ortho-Wasserstoff und Para-Wasserstoff ab. Die direkte Bestimmung des Heliumanteils in der Jupiteratmosphäre ist nicht einfach, da unter den dort herrschenden Bedingungen das Helium im Grundzustand vorliegt und man deshalb keine Heliumlinien in den Spektren beobachten kann. Man kann aber die Druckverbreiterung von Wasserstofflinien (z.B. bei  $\lambda \sim 45 \mu\text{m}$ ) verwenden, um daraus das Verhältnis zwischen der Anzahl der Wasserstoffmoleküle und der Anzahl der (schwereren) Heliumatome pro Volumeneinheit im Erzeugungsgebiet der Spektrallinien abzuleiten. Ergänzend liefern auch Refraktionsmessungen von Funksignalen, welche die Jupiteratmosphäre durchdringen, Informationen über die Wasserstoff-Helium-Konzentration. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist, daß in der Jupiteratmosphäre Helium etwas weniger häufig vorkommt als die solare Häufigkeit vermuten läßt. Sollte dieser Effekt real sein, dann ist die Ursache dafür in einem gravitativen Entmischungsprozeß zu suchen.

Ortho- und Parawasserstoff unterscheiden sich in der Ausrichtung der Kernspins der beiden Wasserstoffatome, die zusammen ein Wasserstoffmolekül bilden. Ortho-Wasserstoff weist einen parallel Spin ( $I=1$ ) auf, während Para-Wasserstoff über einen antiparallelen Spin ( $I=0$ ) verfügt. Beide Zustände besitzen jeweils unterschiedliche Energien (die Umwandlungswärme beträgt ca. 716 kJ/kg). Das bedeutet, daß eine Mischung aus beiden Modifikationen immer eine Form von latenter Wärme enthält, die - ähnlich wie beim Erstarren oder Schmelzen eines Kristalls - freigesetzt oder aufgebraucht werden kann. Bei Temperaturen oberhalb 270 K beträgt das Verhältnis von Ortho- zu Para-Zuständen ungefähr 3:1 und bei geringeren Temperaturen verschiebt es sich zugunsten des Para-Wasserstoffs. Die latent in diesen beiden Zuständen enthaltene Energie spielt für den Energiehaushalt der Jupiteratmosphäre (insbesondere im Druckbereich zwischen einem Zehntel und ca. 30 bar) eine nicht zu vernachlässigende Rolle, da molekularer Wasserstoff ständig konvektiv aus dem tiefen Inneren des Planeten nach oben transportiert wird und sich beim (adiabatischen) Entspannen abkühlt. Dabei ändert sich das Ortho- zu Para-Verhältnis und bei der damit verbundenen Phasenumwandlung wird zusätzliche Energie freigesetzt.

Die Atmosphärenschicht, in welcher die Temperaturumkehr erfolgt ( $T \sim 110\text{K}$ ,  $p \sim 100 \text{ mbar}$ ), bezeichnet man als Tropopause. Sie trennt genauso wie bei der Erde die Troposphäre von der Stratosphäre. Unterhalb dieser Schicht wird der Temperaturgradient im Wesentlichen durch die Konvektion der auf- und absteigenden Wasserstoff- und Heliumgase und darüber durch die Strahlungsaufheizung durch die Sonne kontrolliert.

Was man von dem Planeten auf Fotos oder im Fernrohr sehen kann, sind genaugenommen nur Wolken- und Dunstschichten unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung, die sich in

## Jupiter

verschiedenen Höhen über einen radiale Bereich von gerade einmal 100 km (und einem Druckbereich zwischen 100 mbar und ca. 20 bar) erstrecken. Darin sind die physikalischen Bedingungen derart, daß eine ganze Reihe von Spurenstoffen auskondensieren und Aerosolschichten bzw. Eiswolken bilden können. Die folgende Tabelle listet die wichtigsten Atome und Moleküle in der Jupiteratmosphäre auf.

Atom oder Molekül	Häufigkeit
$H_2$	0.864
$He$	0.136
$CH_4$ Methan	$1.81 \cdot 10^{-3}$
$NH_3$ Ammoniak	zwischen $10^{-10}$ und $10^{-6}$
$H_2O$ Wasser	zwischen $10^{-6}$ und $3 \cdot 10^{-5}$
$H_2S$ Schwefelwasserstoff	$< 10^{-7}$
$C_2H_6$ Ethan	zwischen $2.6 \cdot 10^{-8}$ und $8.6 \cdot 10^{-8}$
$C_2H_2$ Ethin	$< 10^{-6}$
$C_2H_4$ Ethen	$6 \cdot 10^{-9}$
$PH_3$ Monophosphan	$10^{-7}$
$CO$ Kohlenmonoxid	$10^{-9}$
$GeH_4$ Germane	$7 \cdot 10^{-10}$

(die Häufigkeiten beziehen sich auf die Gesamtzahl der Atome und Moleküle (=1))

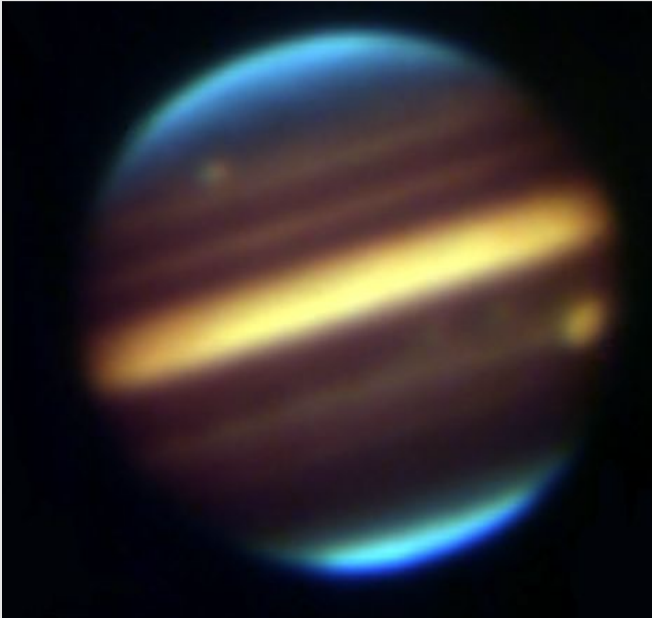
Da sowohl Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor und Germanium nur in reduzierter Form in der Jupiteratmosphäre (und auch in der Atmosphäre von Saturn, Uranus und Neptun) auftauchen, spricht man bei den Riesen- und Großplaneten von Planeten mit reduzierender Atmosphäre.

Wie in jeder anderen Atmosphäre auch können bestimmte Stoffe in Form von Feststoffpartikeln (Eis) oder als Flüssigkeitströpfchen auskondensieren sobald die Sättigungskurve im Phasendiagramm in Abhängigkeit von Temperatur und Druck erreicht wird. Ammoniak z.B. kondensiert in einer Höhe, wo der Gasdruck ungefähr 0.6 bar beträgt in Form von Ammoniak eis aus. Ammoniumhydrosulfid ( $NH_4SH$ ), welches in der Jupiteratmosphäre bei der Reaktion von Ammoniak mit Schwefelwasserstoff entsteht, erreicht seine Sättigungsgrenze bei einem Druck von ca. 2 bar und bildet dort eine smogartige und vertikal recht gut abgegrenzte helle Wolkenschicht.

Darunter, bei einem Druck von ca. 6 bar, friert Wasser aus und bildet eine unterste und äußerst dünne Schicht von Eiswolken (genauer gesagt handelt es sich bei dem „Wasser“ mehr um eine Lösung von Wasser mit Ammoniak).

Die Spurenstoffe in der gut durchmischten Jupiteratmosphäre reagieren untereinander und sind somit in der Lage, verschiedenste Verbindungen einzugehen. So führen z.B. photochemische Prozesse auf der Grundlage von Methan zu den in der Jupiteratmosphäre beobachteten Konzentrationen der einfachsten Alkane, Alkene und Alkine (Kohlenwasserstoffe, deren Absorptionen im UV beobachtbar sind). Ähnliche Prozesse sollten zur Bildung von Hydrazin ( $N_2H_4$ ) aus Ammoniak und zu

Diphosphine ( $P_2H_4$ ) aus Monophosphan ( $PH_3$ ) führen. Hydrazin ist ein guter Anwärter für den Hauptbestandteil schwacher Aerosoldünste in der Stratosphäre des Riesenplaneten, welche sich durch eine verstärkte UV-Absorption bemerkbar machen. Für die feinen Farbnuancen in den Zonen und Bändern sind weitere Stoffe wie z.B. Schwefel (von denen verschiedenfarbige Allotrope bekannt sind) oder Verbindungen mit Phosphor verantwortlich. Man vermutet sogar, daß die manchmal auffallend rote Farbe des Großen Roten Flecks (und des 2006 aufgetauchten „Kleinen Roten Flecks“) durch feste Phosphorpartikel ( $P_4$ ) hervorgerufen wird.

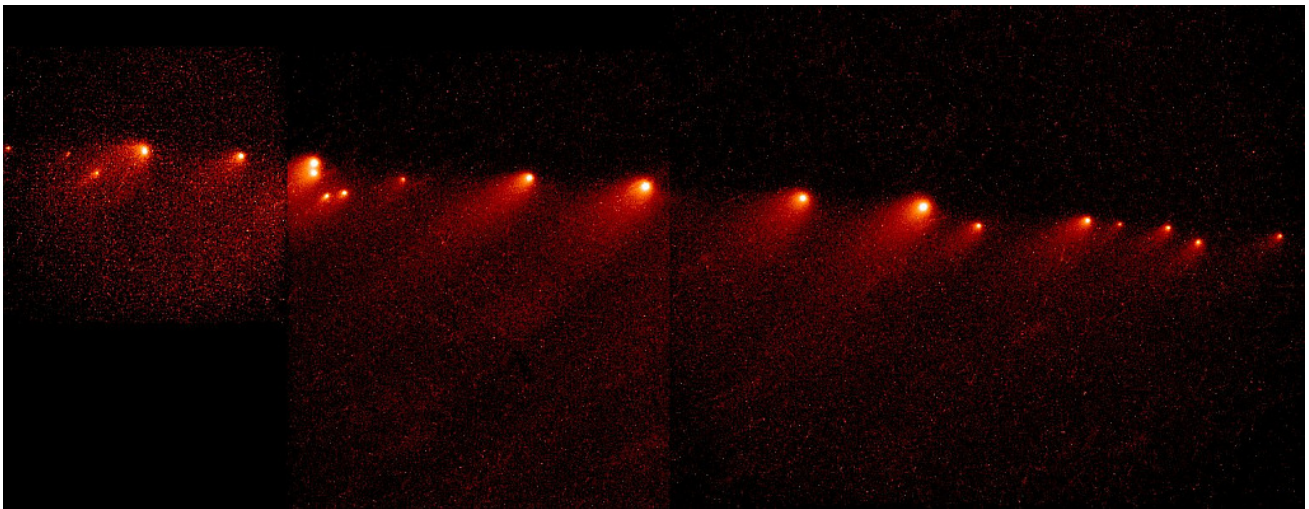


Falschfarbaufnahme von Jupiter im nahen Infrarot ( $2.1 \mu m$ ). Abgebildet werden in erster Linie Dunstschichten in der Stratosphäre des Planeten. © Wyoming Infrared Observatory (WIRO)

Das streifige Aussehen der Jupiteratmosphäre wird durch helle Zonen und dunklere Bänder hervorgerufen, die mit verschiedenen zonalen Windsystemen assoziiert sind. Sie unterscheiden sich auch durch ihre Temperatur. Die hellen Zonen sind im Bereich der Tropopause gewöhnlich kühler und die Bänder gewöhnlich wärmer. Daraus kann man schließen, daß in den hellen Zonen verstärkt eine Auskondensierung von Ammoniumhydrosulfidpartikeln erfolgt, welche durch die adiabatische Kühlung der aufsteigenden Gasmassen befördert wird. In den Bändern steigt dagegen das Gas wieder ab und die Partikel lösen sich in der Tendenz auf.

## Shoemaker-Levy 9 - Impakt

Es gibt nur relativ wenige kosmische Erscheinungen, denen uneingeschränkte Aufmerksamkeit der breiten Öffentlichkeit zuteil wird. Dazu gehört ohne Zweifel der Einschlag einer Vielzahl von Kometenfragmenten auf Jupiter im Juli 1994. Die Vorgeschichte ist schnell erzählt. Anfang der 60ziger Jahre des vorigen Jahrhunderts geriet ein nicht allzu großer Komet (Durchmesser maximal 4 Kilometer) in die Einflußsphäre des Riesenplaneten und wurde auf eine stark elliptische Bahn um Jupiter gezwungen. Durch Störungen geriet der jupiternächste Punkt der Bahn 1992 in einen Bereich innerhalb der Rochegrenze und die dabei auftretenden Gezeitenkräfte ließen den Kometen in zuletzt 21 größere Fragmente (Durchmesser zwischen ca. 50 m und knapp einem Kilometer) zerfallen. Sie bildeten in Folge eine (von der Erde aus gesehen) ca. 20 Bogenminuten lange Kette was real einer Länge von mehreren Millionen Kilometern entspricht. Zum ersten Mal wurde sie auf einer Aufnahme vom 24. März 1993 sichtbar, die von CAROLYN und EUGEN SHOEMAKER sowie von DAVID LEVY mit Hilfe des 46 cm Schmidt-Teleskops des Mt. Palomar- Observatoriums belichtet wurde. Diese Entdeckung konnte schnell von anderen Observatorien bestätigt werden und erste Bahnberechnungen zeigten, daß es sich bei dem zerbrochenen Kometen um ein außergewöhnliches Objekt handelt, welches im Sommer 1994 in den Jupiter einschlagen wird. Damit blieb den Astronomen genügend Zeit, um sich auf dieses Ereignis vorzubereiten. Der einzige Wehrmutstropfen war, daß der Einschlag knapp auf der erdabgewandten Seite Jupiters stattfindet und deshalb von der Erde aus nicht direkt sichtbar ist. Nur die sich damals auf dem Weg zum Jupiter befindliche interplanetare Sonde Galilei war in der Lage, die Einschlagstellen direkt zu beobachten.



Fragmente des Kometen Shoemaker-Levy 9 kurz vor ihrem Einschlag auf Jupiter. Diese hochaufgelöste Aufnahme wurde mit dem Hubble-Teleskop im Mai 1994 aufgenommen.

Die einzelnen Bruchstücke des Kometen bildeten auf dem finalen Abschnitt seiner Bahn eine Kette aus 21 Fragmenten die - um sie besser unterscheiden zu können - mit den Buchstaben „A“ bis „W“ (mit Ausnahme von „O“ und „I“, um eine Verwechslung mit den Ziffern 0 und 1 zu vermeiden) bezeichnet wurden. Diese Fragmente wurden sowohl mit irdischen Teleskopen als auch mit dem Hubble Space-Teleskop genauestens verfolgt und ihre einzelnen Positionen vermessen. Daraus ergab sich, daß die Serie der Einschläge am 16. Juli 1994 beginnen und das letzte Bruchstück am 22. Juli 1994 im Jupiter

verschwinden wird. Zu diesem Zeitpunkt startete weltweit eine breit angelegte Beobachtungskampagne, an der neben irdischen Observatorien auch eine Anzahl von Satelliten (z.B. HST, Galileo, Ulysses, IUE, ROSAT) beteiligt waren. Alle zusammen waren in der Lage, dieses Ereignis quasi im gesamten Bereich des elektromagnetischen Spektrums zu beobachten. Über die Ergebnisse dieser Kampagne soll im Folgenden berichtet werden.

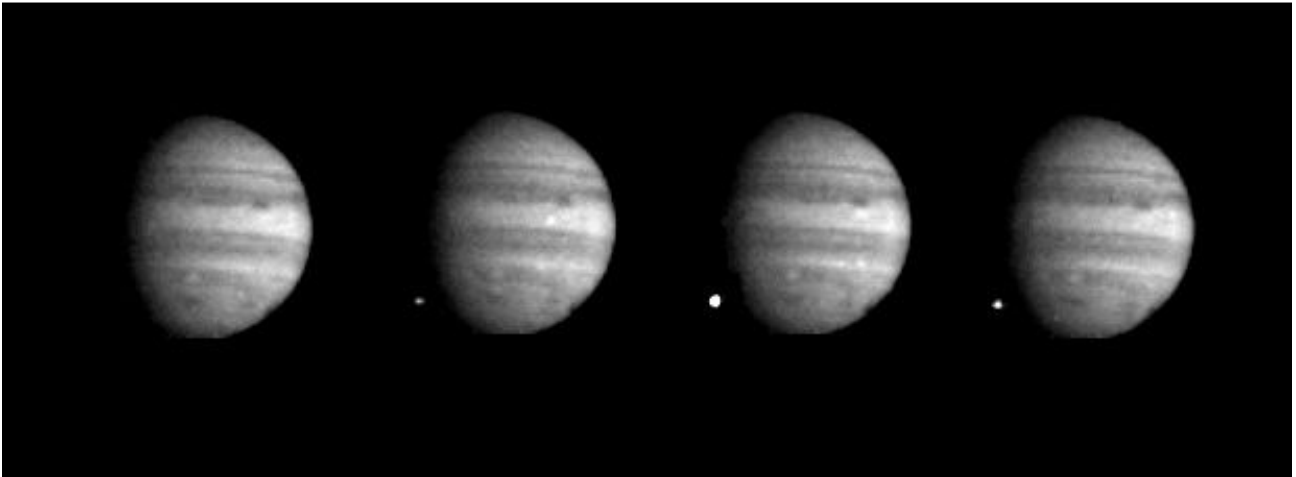


Jupiter mit „Einschlagnarben“ des Kometenimpakts, aufgenommen mit dem Hubble-Teleskop.

Die Vorhersagen, was bei den einzelnen Impakten genau passieren wird und was man davon im Fernrohr sehen kann, gingen im Vorfeld des Ereignisses weit auseinander. Aber bereits die ersten Aufnahmen der Explosionswolke, welches das Fragment A in der Jupiteratmosphäre erzeugte, zeigten, daß man es hier mit einem außergewöhnlichen Feuerwerk zu tun hat. Die einzelnen Bruchstücke des Kometen traten unter einem Winkel von ungefähr  $45^\circ$  in die Jupiteratmosphäre ein. Das Erste, was bei einem größeren Bruchstück zu sehen war, war ein kurzer Flash im Infraroten (Precursor 1) und - ca. 10 Sekunden zeitversetzt - ein Helligkeitsanstieg im UV- und sichtbaren Bereich (Galileo) mit anschließendem langsameren Intensitäts-abfall über ca. 1 Minute hinweg. Danach erfolgte ein zweiter Flash (Precursor 2), der besonders gut im K-Band zu beobachten war und der mit dem Feuerball zusammenhing, welcher ab diesem Moment für irdische Beobachter sichtbar den Jupiterhorizont überstieg. Knapp 6 Minuten später setzte dann die „Splashback“-Phase ein, bei der die durch den

## Jupiter

Impakt erzeugten Ejekta auf den Jupiter zurückstürzten und dabei sich sowie die umgebenden atmosphärischen Gase aufheizten, was zu einem sehr starken Anstieg der IR-Helligkeit führte (Hauptereignis). Diese Ejekta sind dann später - nachdem die Rotation des Jupiters den Einschlagsort auf die sichtbare Hemisphäre gedreht hat, als dunkle ovale Strukturen auf der Jupiterscheibe für längere Zeit (Wochen und Monate) sichtbar geworden.

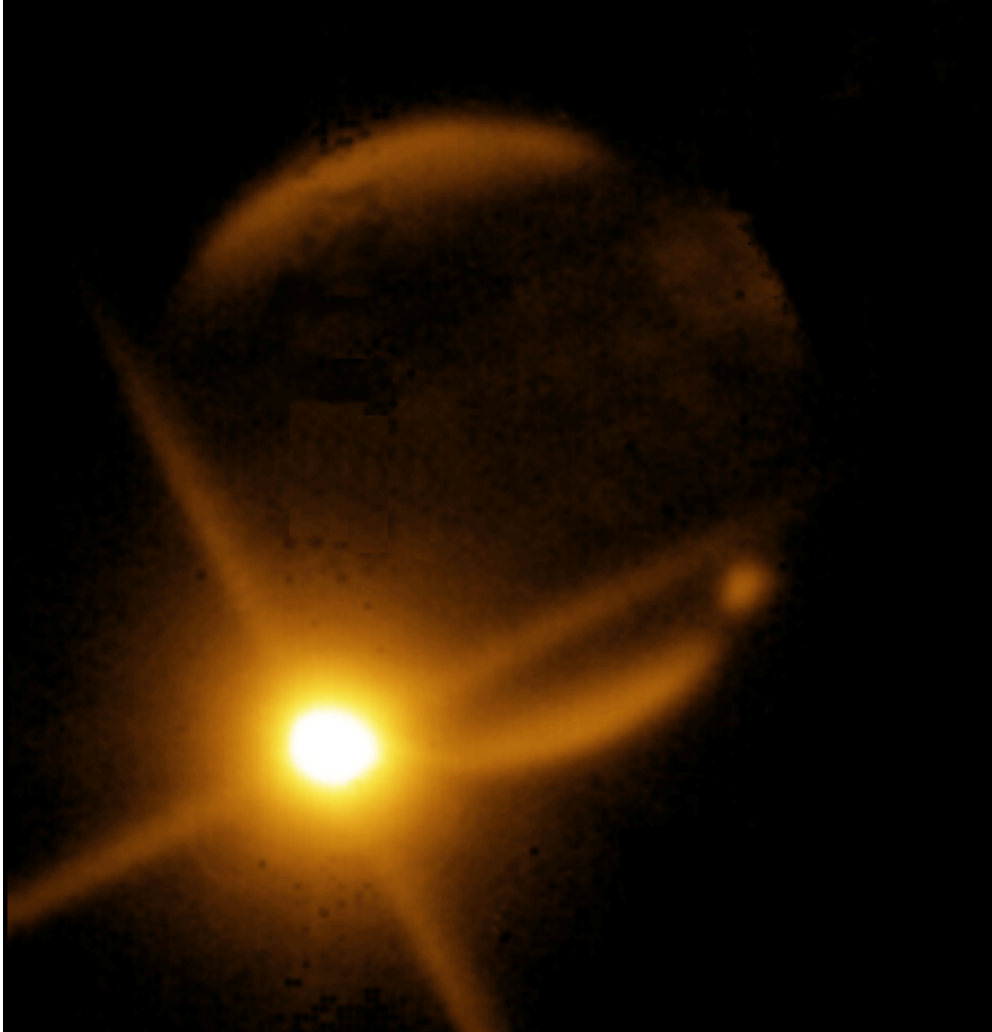


Aufnahmen des Einschlags des Bruchstücks W (22.7.1994) auf Jupiter, wie er von der Jupitersonde Galileo aus beobachtet wurde

Diese Abfolge von Ereignissen konnte vollständig bei 10 der (zuletzt) 24 Bruchstücke (G, P und Q teilten sich kurz vor dem Einschlag in jeweils zwei Teile) nachgewiesen werden.

Der Impakt erfolgte mit einer Geschwindigkeit von ca. 60 km/s. Zuerst traf das Material den im Vergleich zu normalen Kometen wahrscheinlich deutlich massereicheren Koma auf eine größere Fläche die Hochatmosphäre, was zu dem kurzen Precursor 1-Ereignis geführt hat. Dieses Ereignis hielt solange an, bis der dichtere Teil der Koma und wahrscheinlich auch der Kern den Jupiterhorizont unterschritten hat und damit von der Erde aus nicht mehr sichtbar war. Kurz danach bildete sich aus dem Kometenbruchstück ein Bolide, der in immer dichtere Schichten der Jupiteratmosphäre eindrang und dabei durch Ablation mehr und mehr an Masse verlor. Das war genau der Augenblick, als die Meßgeräte der Galilei-Sonde, die ja direkten Sichtkontakt hatten, zum ersten Mal angeschlagen haben. Dieses Bolidenstadium ging anschließend in einer gewaltigen Explosion in ein Feuerballstadium über, in dem die kinetische Energie von ca.  $10^{20}$  bis  $10^{21}$  J weitgehend thermalisiert wurde. Diese Explosion fand wahrscheinlich noch oberhalb oder zumindest im Bereich der Tropopause, also noch weit über den dichteren Wolkenschichten Jupiters, statt. Im Fall des größten und am besten untersuchten Bruchstück G entstand ein mehr als 3000 km hoher Feuerball mit einer Temperatur von etwa. 7000 K. Viele Infrarotteleskope haben die von dieser plumeartigen Wolke emittierte Wärmestrahlung in Form des Precursor 2-Ereignisses registriert. Diese Wolke stieg rasch auf wobei sie sich abkühlte und anschließend kollabierte. Der mit dem Zusammenbruch des Plumes einhergehende Rücksturz des erkalteten Materials durch die Stratosphäre führte zu einer enormen Aufheizung der dort vorhandenen Gase. Das äußerte sich in einem extrem starken Anwachsen der dabei emittierten Infrarotstrahlung, die nun direkt die irdischen Teleskope traf und dabei die IR-Detektoren regelrecht blendete. Die grellen Lichtpunkte am Jupiterrand, die vielen IR-Aufnahmen der Impaktereignisse zeigen, stellen demnach nicht die Impakte selbst, sondern den großflächigen Rücksturz der erkalteten Ejekta dar.

In den Spektren des abkühlenden Feuerballs, wie sie z.B. mit dem HST (UV) und dem Kuiper Airborne Observatory aufgenommen wurden, konnten u.a. Ammoniak ( $NH_3$ ), Schwefel ( $S_2$ ), Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) sowie Kohlenmonoxid ( $CO$ ) neben einer Vielzahl weiterer Moleküle (jedoch kein Wasser) nachgewiesen werden.

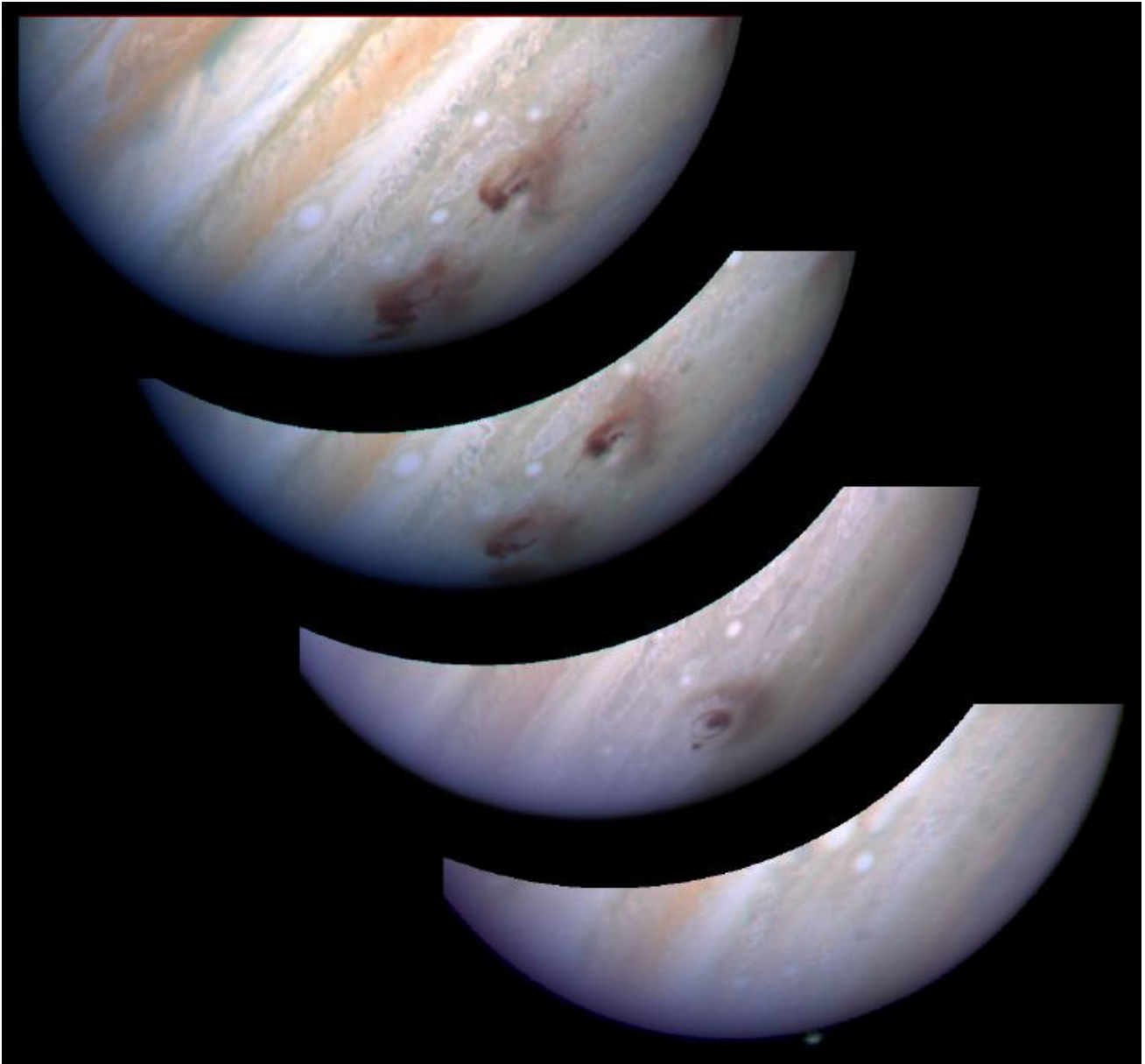


Vom Fragment G am 18. Juli 1994 hervorgerufener Feuerball – ungefähr 12 Minuten nach dem eigentlichen Impakt; aufgenommen mit dem 2.3 Meter-Teleskop des Siding-Spring Observatoriums bei einer Wellenlänge von  $2.34 \mu m$ .

Nach dem aufgrund der raschen Rotation des Planeten die Impaktregionen auf die sichtbare Seite gelangten, ließen sich bei stärkeren Impakten mit dem HST expandierende Ringstrukturen nachweisen. Bei fünf Impakten wurde zuerst ein größerer Ring, der mit einer konstanten Geschwindigkeit von rund 1620 km/h expandierte, gefunden. In dessen Inneren entstand bei zwei von Ihnen noch ein weiterer, aber weniger gut sichtbarer und langsamer expandierender Ring. Eine Erklärung für dieses Phänomen erwies sich als sehr schwierig. Auf jeden Fall scheint es sich um ein Wellenphänomen zu handeln, da die Expansionsgeschwindigkeit unabhängig von der Stärke des Impakts weitgehend konstant blieb. Als wahrscheinlichste Ursache kommen troposphärische Gravity Waves (wie man sie aus der Meteorologie her kennt) in Frage, obwohl eine genaue quantitative Erklärung unter Jupiterbedingungen noch aussteht.

## Jupiter

Nachdem sich diese Ringstrukturen stabilisiert hatten, blieben sie noch viele Wochen und Monate auf dem Jupiter sichtbar und wurden zu einem begehrten Beobachtungsobjekt für viele Amateur-astronomen.



Zusammenstellung einiger Aufnahmen des Hubble-Teleskops vom Juli 1994 mit den Spuren, die der Einschlag von Shoemaker-Levy 9 in der Gashülle des Riesenplaneten hinterlassen hat.

Im Zusammenhang mit dem Kometencrash wurden von einigen Arbeitsgruppen Computersimulationen durchgeführt um sowohl Interpretationshilfen zu geben als auch um zu testen, welchen Realitätsbezug numerische Modelle von solchen extremen Ereignissen haben. Die Abbildungen stammen von MORDECAI-MARK MAC LOW und stellen eine zeitliche Abfolge (10, 30, 50 und 90 Sekunden nach dem Impact) des Einschlags eines Kometenkerns mit einem Kilometer Durchmesser und einer Geschwindigkeit von 60 km/s auf Jupiter dar. Nach dieser Simulation wird bereits 5 Sekunden nach Eintritt der Kern durch die aerodynamischen Kräfte vollständig zerstört und dabei eine Energie von  $10^{22}$  J in der Jupiteratmosphäre freigesetzt. Es entsteht ein rasch in die Stratosphäre

expandierender Feuerball, der kurz vor seinem Kollaps eine laterale Ausdehnung von ca. 2000-3000 km erreicht. In der Bilderserie sind die Temperaturen farbcodiert dargestellt: blaue Farben entsprechen niedere Temperaturen und rote hohe Temperaturen (bis 5800 K). Die Lage der Tropopause wird durch die horizontale blaue Linie dargestellt. Man erkennt deutlich, daß die Auswirkungen des Impakts innerhalb der Troposphäre vergleichsweise gering ausfallen. Das verdampfte Kometenmaterial bleibt quasi im Feuerball gefangen und wird zuerst in die höheren Schichten der Jupiteratmosphäre transportiert um danach auf den Planeten zurückzufallen.

Im Großen und Ganzen gibt die Simulation die Realität recht gut wieder. Aufgrund der starken Vereinfachungen, die für solch ein Modell notwendig sind, sollten die Ergebnisse jedoch nicht überbewertet werden.

Es ist übrigens durchaus interessant sich einmal auszumalen, was passiert, wenn der „Target-Planet“ nicht Jupiter, sondern die Erde gewesen wäre ...

Bei Jupiter ist mit solch einem Kometencrash übrigens alle rund 2000 Jahre zu rechnen. Aufgrund seiner großen Masse zieht er öfters einmal Kometen in seinen Bann.

### Ringsystem

Am 4. März 1979 gelang Voyager 1 eine Aufnahme der unmittelbaren Umgebung des Riesenplaneten, die überraschenderweise eine leichte diffuse Aufhellung zeigte. Nach ein paar Tagen Bildbearbeitung und Analyse war klar, Jupiter besitzt einen schwachen Ring. Einige Wissenschaftler haben bereits 1974, als Pioneer 11 in einem Abstand von lediglich 114000 km vorbeiflog, die Frage diskutiert, ob nicht auch Jupiter eine Scheibe bzw. einen Ring ähnlich dem des Saturns besitzt. Der Grund für diese Vermutung war eine signifikante Verringerung der Anzahl hochenergetischen Teilchen, als die Sonde die Äquatorebene des Planeten passierte. Ein Ring aus kleinen Eis- und Gesteinsbrocken würde genau diese Teilchen absorbieren und die Diskrepanz erklären. Wie sich jedoch später herausstellte, handelt es sich bei den Jupiterrings um fast reine Staubringe, die sich völlig von den Saturnringen unterscheiden, so daß diese Erklärung zumindest teilweise obsolet wurde.



Galileo-Aufnahme des Jupiterringsystems von der Jupiterrückseite aus bei abgedeckter Sonne

Voyager 2 hat man als Reaktion auf die Entdeckung seiner Vorgängersonde so umprogrammiert, daß er bei seiner Passage weitere Aufnahmen von den Ringen anfertigen konnte. Sie zeigen u.a. daß sie besonders gut im Gegenlicht zu erkennen sind was darauf hindeutet, daß hier nicht Felsbrocken umherschwirren sondern vielmehr fein verteilter Staub mit Korngrößen im Mikrometerbereich das Sonnenlicht streut. Der Ring ist etwa 100000-mal lichtschwächer als Jupiter was seine Beobachtung von der Erde aus außerordentlich erschwert. Nur im Infraroten Spektralbereich, genauer gesagt in der Mitte einer Methan-Absorptionsbande bei einer Wellenlänge von  $2,27 \mu\text{m}$  (was quasi den Jupiter dunkel erscheinen läßt), konnte das Streulicht des Rings mit dem 10-Meter Keck-Teleskop fotografiert werden. Ihre detaillierte Erforschung begann aber erst mit der Galilei-Mission.

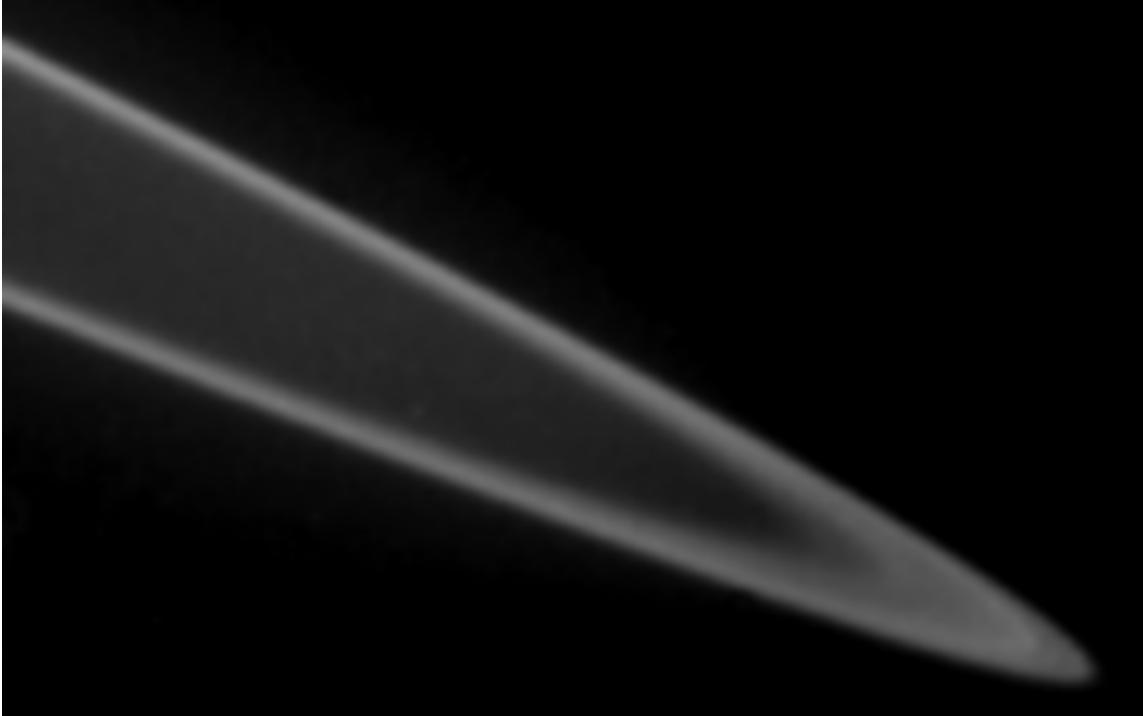
Während der Galileo-Umläufe um Jupiter gelangen mehrere Dutzend Aufnahmen und auch die Saturnsonde Cassini konnte bei ihrem Fly by -Manöver um Jupiter am 11. Dezember 2000 eine ganze Anzahl guter Fotos liefern. Auf diesem Material baut sich im Wesentlichen der heutige Kenntnisstand über den Jupiter-Ring auf. Danach besteht er aus insgesamt drei Hauptstrukturen:

- a. **Hauptring:** Breite ungefähr 7000 km, Dicke max. 30 km. Er endet abrupt in einer Entfernung von 129130 km vom Zentrum des Planeten. In ihm bewegen sich die kleinen Monde Adrastea und Metis. Man vermutet, daß sie neben kieselsteingroßen Materiebrocken, von denen es durchaus einige im Hauptring geben sollte, die wichtigsten Staublieferanten sind. Die Umlaufzeit der Ringpartikel um Jupiter beträgt ca. 7 Stunden.
- b. **Halo:** Beginnend am Innenrand des Hauptrings überzieht ein ca. 20000 km dickes Halo den Ring bis in die Nähe der Wolkenobergrenze des Jupiter. Es enthält sehr feines Ringmaterial, welches aus dem Bereich des Hauptrings und der Gossamer-Ringe eingewandert ist.
- c. **Gossamer-Ringe:** Seit die Ergebnisse der Galileo-Sonde vorliegen ist bekannt, daß es sich bei den Gossamer-Ringe um zwei ineinander verschlungene Staubringe handelt, die von den kleinen Jupitermonden Amalthea und Thebe nach außen begrenzt werden. Sie befinden sich im Außenbereich des Ringsystems. Da die vertikale Ausdehnung des Inneren der beiden Ringe exakt der Bahnneigung Amaltheas entspricht und auch die Dicke des äußeren Rings sehr gut zu Thebe paßt (seine Mächtigkeit ist gleich dem Abstand zwischen dem höchsten und niedrigsten Bahnpunkt der um  $0,8^\circ$  geneigten Mondbahn in bezug auf die Äquatorialebene Jupiters), ist es sehr realistisch anzunehmen, daß der Staub aus dem die Ringe bestehen, auch von diesen Monden stammt.

Die Messungen des Staubdetektors der Galileo-Sonde ergaben 1998 Hinweise auf die Existenz eines noch schwächeren 4. Staubrings, der sich an die Gossamer-Ringe anschließt und bis zu 20 Jupiterradien in den Raum hinausreichen soll. Im Gegensatz zu den inneren Ringen bekommt er Materialnachschub hauptsächlich aus dem interplanetaren Raum und aus dem Material, den Kometen bei ihrer Auflösung hinterlassen.

Im Gegensatz zu den Saturn- und Uranusringen, die Gesteins- und Eisbrocken von Zentimeter- bis Metergröße enthalten, bestehen die Jupiterringe fast ausschließlich aus mineralischen Staubteilchen in der Größenordnung von wenigen Mikrometern (vergleichbar mit den Rußteilchen in Zigarettenrauch). Derartige Teilchen streuen Licht bevorzugt nach vorn, weshalb die Ringe im Gegenlicht trotz ihrer geringen optischen Tiefe ( $\tau \approx 10^{-6}$  für den Hauptring,  $10^{-7}$  für die Gossamer-Ringe) relativ hell erscheinen (d.h. man erkennt sie am besten, wenn man von der Kante auf sie schaut). Diese Art von Streuung – auch Mie-Streuung genannt – tritt immer dann auf, wenn die Partikelgröße etwas größer als die Lichtwellenlänge ist. Beobachtet man die Ringe unter verschiedenen Winkeln, dann kann man aus

den gemessenen Intensitäten der gestreuten Sonnenstrahlung auf die Größe der streuenden Teilchen schließen. Die unten erwähnte optische Tiefe  $\tau$  ist übrigens ein gebräuchliches Maß für die Strahlungsdurchlässigkeit einer homogenen Materieschicht. Dabei gilt: eine Staubschicht der optischen Dicke  $\tau$  schwächt eine senkrecht hindurchgehende Strahlung um den Faktor  $e^{-\tau}$ .



Haupttring Jupiters auf einer Voyager 2 -Aufnahme

Staubteilchen im Mikrometerbereich können sich nur einige hundert bis zehntausend Jahre auf Bahnen um den Jupiter halten. Eine Anzahl von Effekten führt dazu, daß sie sich immer mehr in Richtung Jupiteroberfläche bewegen wo sie schließlich akkretiert werden. Aufgrund ihrer Größe und ihrer geringen Teilchenzahldichte spielen für ihre Dynamik Zusammenstöße untereinander kaum eine Rolle. Dafür sind sie anfällig für Wechselwirkungen mit dem Magnetosphärenplasma und für Wechselwirkungen mit der Sonnenstrahlung. Letztere führt zu einem Effekt, der die Halbachse der Bahnen der Staubteilchen im Laufe der Zeit immer mehr schrumpfen läßt. Ursache dafür ist ein Verlust an Bahndrehimpuls durch die isotrope Wiederabstrahlung absorbierten Sonnenlichts (Poynting-Robertson-Effekt).

### **Poynting-Robertson-Effekt**

Größere Staubteilchen, die sich auf einer Bahn um die Sonne oder um einen Planeten bewegen und dabei Sonnenlicht absorbieren, verringern kontinuierlich ihre Bahnhalbachsen, da sie aufgrund der isotropen Reemission der aufgenommenen Energie Bahndrehimpuls verlieren. Das begrenzt ihre Lebensdauer und führt z.B. im Jupitersystem dazu, daß das Material der Gossamer-Ringe ständig nachgeliefert werden muß, da es innerhalb von nur einigen 10000 Jahren von Jupiter akkretiert wird.

Dieser Effekt, der nach ihren Entdeckern JOHN HENRY POYNTING (1852-1914) und HOWARD PERCY ROBERTSON (1903-1961) benannt ist, soll im Folgenden anhand eines Testteilchens der Dichte  $\rho$  und des Radius  $r$ , welches sich in der Entfernung  $R$  von der Sonne befindet, näher erläutert werden. Bekanntlich besitzen Lichtquanten einen genau definierten Impuls (welcher der Energie  $E_\gamma = h\nu$

proportional ist), den sie während eines Absorptionsvorgangs auf das Teilchen übertragen können. Bezeichnet man mit  $L_{\odot}$  die Sonnenleuchtkraft, dann beträgt der übertragene Impuls pro Zeiteinheit

$$P = \frac{r^2}{4R^2} L_{\odot} \quad (a)$$

wobei die Richtung näherungsweise der Richtung des Radiusvektors Teilchen - Sonne entspricht. Aus Sicht des Teilchens muß sie genau genommen noch um den Aberrationswinkel korrigiert werden. Das führt dazu, daß der auf das Teilchen übertragene Impuls neben der radialen Komponente noch eine kleine tangential Komponente besitzt, die dem Geschwindigkeitsvektor des Teilchens entgegen gerichtet ist. Auf diese Weise verringert sich der Bahndrehimpuls und das Teilchen bewegt sich effektiv (und zwar in einer Spiralbahn) in Richtung der Strahlungsquelle. Dabei wird angenommen, daß die Reemission der Strahlung isotrop erfolgt. Die dabei pro Zeiteinheit reemittierte Strahlungsenergie resultiert in einer tangentialen Kraftkomponente der Größe (alle folgenden Überlegungen beziehen sich auf die Sichtweise eines ruhenden Beobachters)

$$F_t = P \frac{v}{c^2} L_{\odot} \quad (b)$$

Für die Änderung des Bahndrehimpulses  $l$  ergibt sich daraus

$$\frac{dl}{dR} = -F_t R = -\frac{r^2}{4R} L_{\odot} \quad \text{mit} \quad l = \frac{4\pi}{3} \rho r^3 \sqrt{GM_{\odot} R} \quad (c)$$

d.h. der Bahndrehimpuls des Teilchens ändert sich mit der Zeit wie

$$\frac{dl}{dt} = \frac{4\pi}{6} r^3 \rho v \frac{dR}{dt} \quad (d)$$

also mit (c) und (d)

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{3L_{\odot}}{8\pi R \rho r c^2} \quad (e)$$

Um zu erfahren, wie groß die Lebensdauer eines Teilchens mit den Radius  $r$  und der Dichte  $\rho$  in der Entfernung  $R$  von der Sonne ist, braucht (e) nur integriert zu werden:

$$t = \frac{4\pi R \rho r c^2}{3L_{\odot}} \quad (f)$$

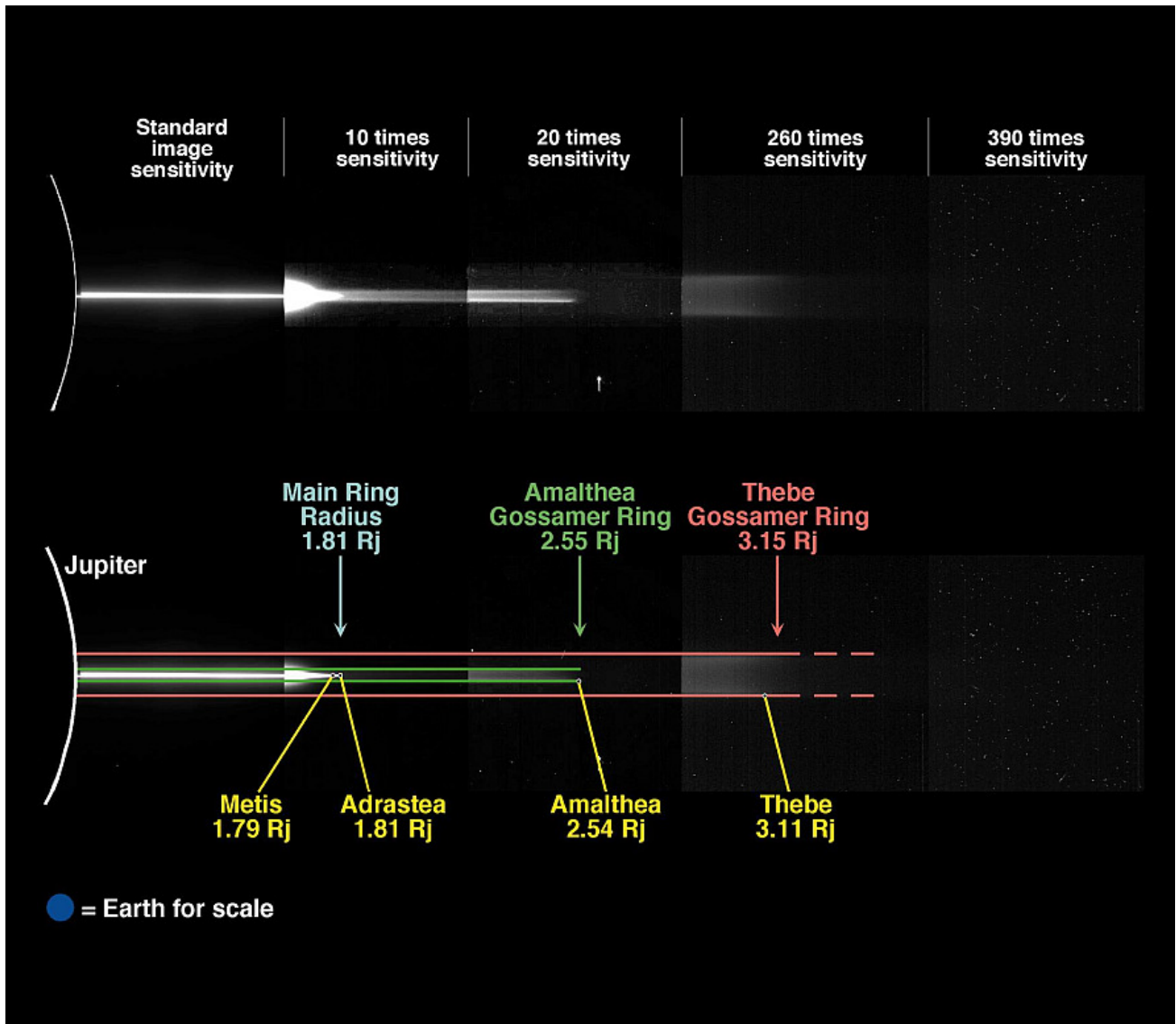
Auf einen sehr interessanten Sachverhalt soll an dieser Stelle noch hingewiesen werden: Die Lebensdauer des Teilchens im Gravitationsfeld der Sonne ist offensichtlich von dem Wert der Gravitationskonstante  $G$  völlig unabhängig. Eine Variation von  $G$  hätte demnach keinen Einfluß auf die Verweildauer des Teilchens auf seiner Bahn.

Die aus (f) folgende Lebensdauer ist verständlicherweise nur eine obere Schranke. Je mehr sich das Teilchen der Sonne nähert, um so größer wird die Wahrscheinlichkeit, daß es in noch kleinere Partikel zerfällt (die dann u.U. per Strahlungsdruck aus dem Sonnensystem geblasen werden) oder sogar völlig verdampft.

Die Schlußfolgerung daraus ist, daß der Staub in den Ringen kontinuierlich nachgeliefert werden muß, wenn sie über lange Zeiträume bestand haben sollen. Als Quellen kommen die mit den Ringen assoziierten Monde Metis, Adrastea, Amalthea und Thebe in Frage. Der Materieabtrag erfolgt dabei durch Sputterung, d.h. hochenergetische Teilchen aus den Strahlungsgürteln sowie Mikrometeorite

erodieren die Oberflächengesteine dieser Körper wobei die dabei freigesetzten mikrometergroßen Staubteilchen soviel kinetische Energie gewinnen, daß sie das Schwerefeld der Monde verlassen können. Dieser Staub wird unter dem Einfluß kurzweiliger Sonnenstrahlung elektrisch aufgeladen und unter Mitwirkung von Jupiters Magnet- und Gravitationsfeld in den Ringbereichen eingelagert und verteilt.

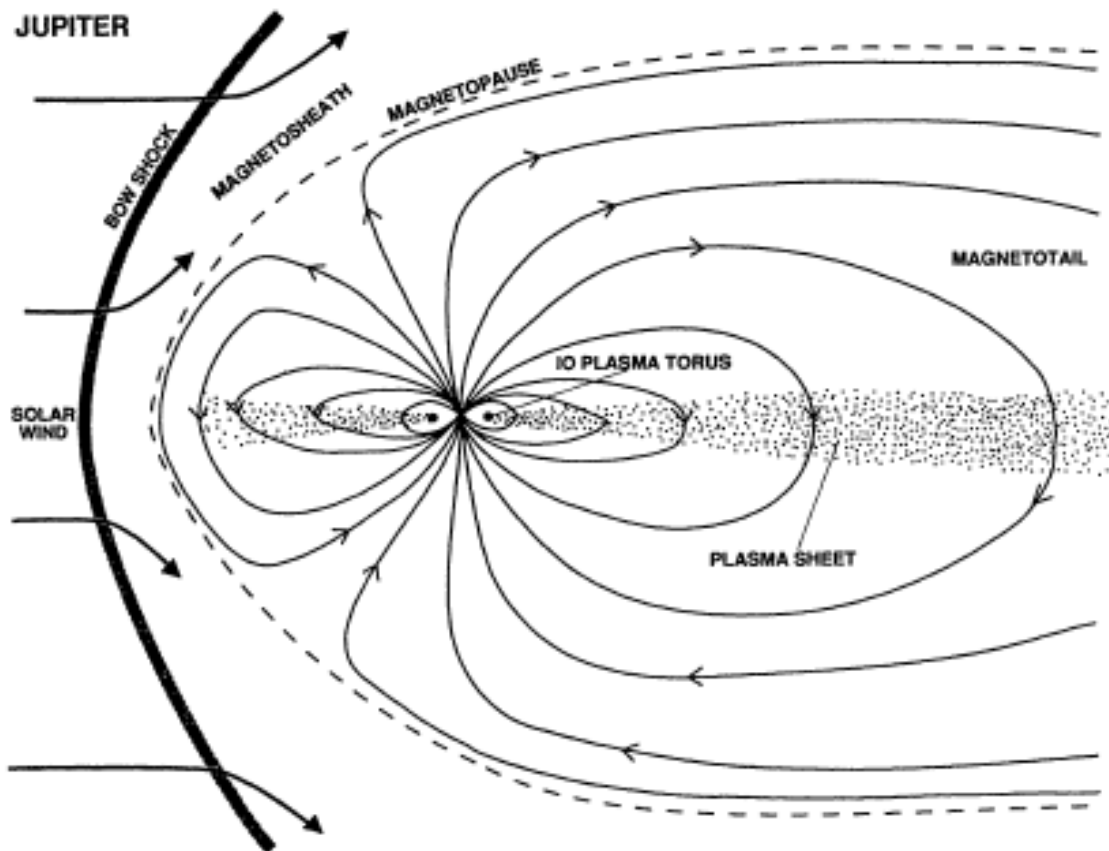
Die gegenwärtige Gesamtmasse des Jupiter-Ringsystems wird auf  $10^8$  bis  $10^{13}$  kg geschätzt.



Struktur des Jupiter-Ringsystems

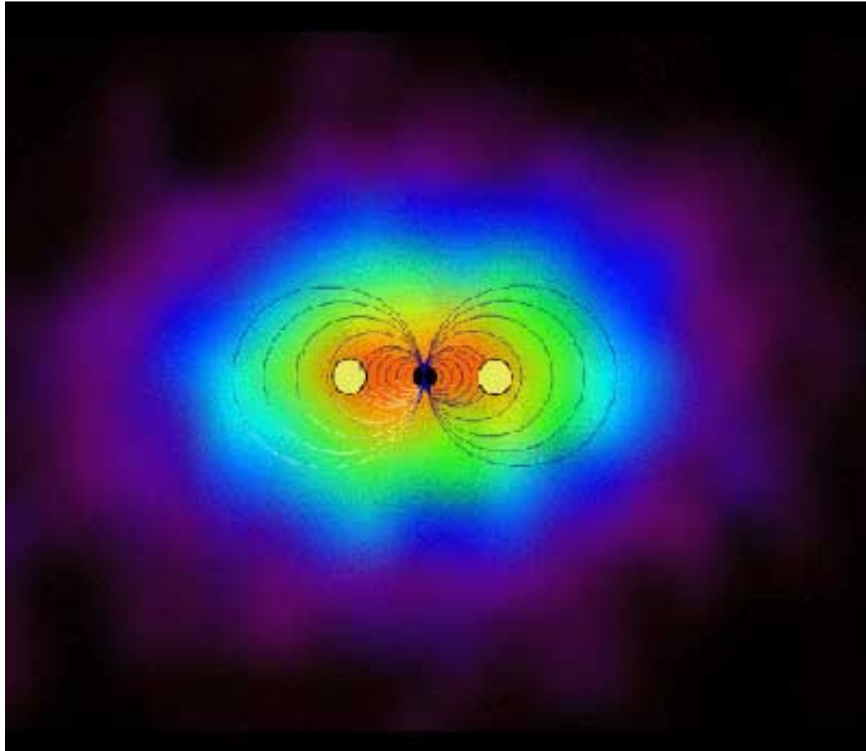
## Magnetfeld

Daß es um den Riesenplaneten Jupiter einen ausgedehnten und physikalisch sehr aktiven Raumbereich gibt, zeigten bereits 1955 die Untersuchungen der beiden amerikanischen Astronomen KENNETH FRANKLIN und BERNARD BURKE. Sie entdeckten, daß eine starke Quelle von Radiostrahlung im Dekameterbereich mit der Position von Jupiter am Himmel zusammenfiel. Wie sich später herausstellte, handelte es sich bei dieser Strahlung um eine sogenannte Synchrotronstrahlung. Darunter versteht man eine nichtthermische Strahlung (ihr Energiespektrum gehorcht nicht dem Planckschen Strahlungsgesetz), die von in Magnetfeldern auf relativistische Geschwindigkeiten beschleunigten Elektronen emittiert wird. 1964 war die Auflösung der Radioteleskope bereits so gut, daß man als Strahlungsquellen zwei Raumbereiche rechts und links vom Jupiter identifizieren konnte, deren Durchmesser die Größe Jupiters weit übersteigt. Heute weiß man, daß diese Strahlung aus dem Strahlungsgürtel im Innern von Jupiters Magnetosphäre stammt. Bereits die Untersuchungen im Zeitalter vor der Planetenerkundung mit interplanetaren Raumsonden führten zu der Erkenntnis, daß Jupiter ein im Vergleich zur Erde geradezu riesiges Magnetfeld besitzt (ungefähr das 20000-fache des Erdmagnetfeldes) und deshalb – im Einklang mit den Radiobeobachtungen – auch einen großräumigen Strahlungsgürtel im Bereich der Galileischen Monde. Die Wechselwirkung dieses Magnetfeldes mit dem Sonnenwind führt letztendlich zur Ausbildung einer komplexen Magnetosphäre, die in ihrer Grundstruktur der irdischen ähnelt, aber ansonsten im Sonnensystem ihresgleichen sucht.



Schematische Darstellung der ausgedehnten Magnetosphäre Jupiters

Jupiter ist übrigens das Objekt im Sonnensystem, das – mit Ausnahme der Sonne – die intensivste Radiostrahlung emittiert.



„Sichtbar“ gemachte Magnetosphäre Jupiters nach Beobachtungen der Galilei-Sonde. Der dunkle Kreis in der Mitte stellt den Jupiter dar. Die beiden gelben Kreise lokalisieren den Plasmatorus, der vom Jupitermond Io stammt und aufrecht erhalten wird.

Das auffälligste Merkmal der Jupiter-Magnetosphäre ist die außergewöhnliche Größe. Voyager-2 konnte nachweisen, daß sich allein der magnetische Schweif über 650 Millionen Kilometer – also bis über die Saturnbahn hinaus – erstreckt. Im Gegensatz zur Erde ist der Abstand der Stoßregion von der Vorderseite des Planeten stark von der Sonnenaktivität abhängig. Er schwankt zwischen 50 und 80 Jupiterradien ( $R_J \approx 71500$  km) und erhebt sich über den Polen um ca.  $140 R_J$ . Dieser große Abstand wird verständlich wenn man bedenkt, daß in Jupiterentfernung der Druck des anströmenden Sonnenwinds um den Faktor 25 schwächer ist als in Erdentfernung.

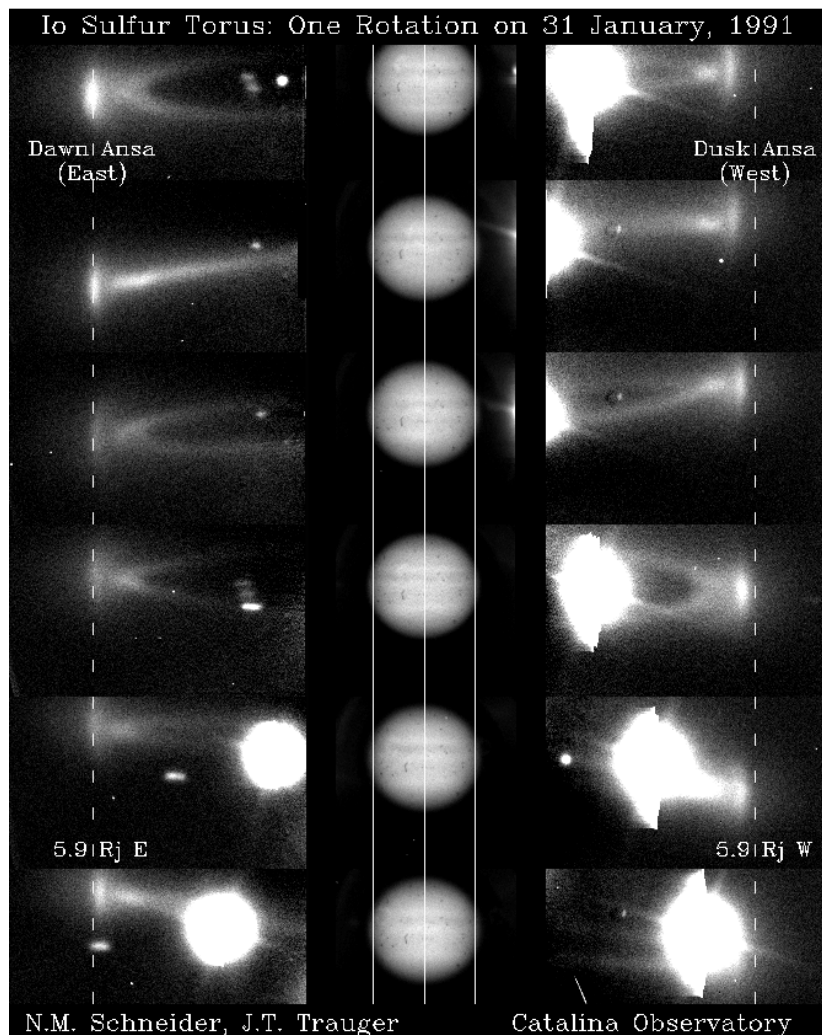
Bis in einem Abstand von  $20 R_J$  kann das Magnetfeld in erster Näherung durch einen Dipol beschrieben werden, der um  $9.6^\circ$  gegen die Rotationsachse geneigt ist und die umgekehrte Polarität hat als die irdische. Das Zentrum des Dipols liegt dabei geringfügig außerhalb der Planetenmitte (ca.  $0.131 R_J$ ), was dazu führt, daß die magnetische Flußdichte am Nordpol mit rund 1.4 mT geringfügig höher ist als am Südpol  $\sim 1.1$  mT (zum Vergleich: auf der Erdoberfläche mißt man eine magnetische Flußdichte von ca. 0.03 mT). Dieses Dipolfeld wird im inneren Teil der Magnetosphäre (bis ca.  $20 R_J$ ) mit dem Planeten mitgeführt, der ja bekanntermaßen eine sehr hohe Rotationsfrequenz aufweist ( $\sim 9$ h 50min). Das darin enthaltene Plasma bewegt sich weiträumig mit Überschallgeschwindigkeit und bildet eine flache Scheibe, die quasi starr mit dem rotierenden Dipolfeld verbunden ist. Die Ursache für die Ausbildung dieser Plasmascheibe liegt darin, daß auf die geladenen Teilchen nicht nur

## Jupiter

Magnetfelder, sondern zusätzlich noch Zentrifugalkräfte wirken, die versuchen, die Teilchen nach außen zu drücken und in einer zur Rotationsachse senkrechten Scheibe anzuordnen. Die magnetische Flußdichte  $\mathbf{B}$  beträgt in dieser Scheibe ungefähr  $10^{-8}$  T und ist erstaunlicherweise räumlich ziemlich konstant. In der Erdmagnetosphäre gibt es eine Plasmascheibe in dieser Form nicht.

Aus dem Bereich der inneren Strahlungsgürtel ( $1.5$  bis  $6 R_J$ ) können unter gewissen Umständen geladene Teilchen entweichen, die auf der Erde einen kleinen Bruchteil der kosmischen Strahlung ausmachen. Ihre Intensität weist eine verräterische 10-Stunden Periodizität auf, die offensichtlich mit der Rotationsdauer von Jupiter im Zusammenhang steht. Die Strahlungsbelastung innerhalb Jupiters Strahlungsgürtel ist so groß, daß elektronische Geräte in Satelliten, die nicht außergewöhnlich gut geschützt sind, mit hoher Wahrscheinlichkeit zerstört werden.

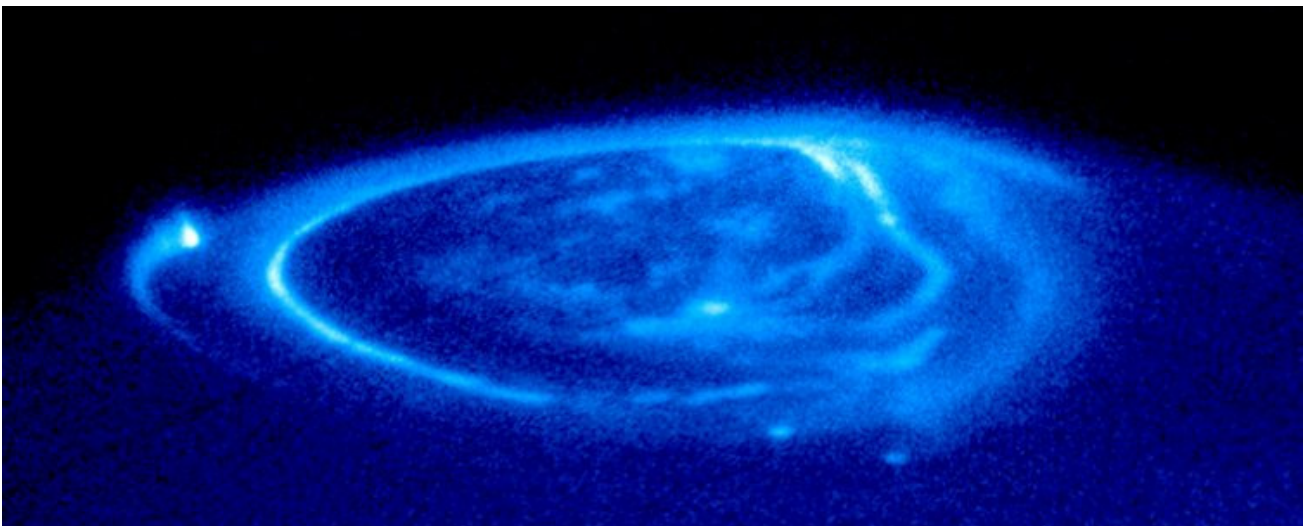
Der Bereich der Magnetosphäre außerhalb von  $90 R_J$  wird im Gegensatz zu den inneren Gebieten stark durch den Sonnenwind beeinflusst.



Torus von Schwefelionen entlang der Bahn des Jupitermondes Io. Aufgenommen wurde eine vollständige Rotation um Jupiter. Der extrem helle Fleck ist Io selbst. Die wechselnde Neigung des Plasmatorus hängt mit der Neigung des Jupitermagnetfeldes in Bezug auf die Rotationsachse zusammen.

Die bedeutendste Plasmaquelle der inneren Jupiter-Magnetosphäre ist nicht wie bei der Erde der eindiffundierende Sonnenwind, sondern die von dem vulkanischen Mond Io ausgestoßenen Gasfontänen. Io bewegt sich in einem Abstand von 421600 km in einer fast kreisförmigen Bahn in 1.769 Tagen einmal um den Jupiter. Durch Gezeitenkräfte werden in seinem Inneren Energien freigesetzt, die zu einem intensiven Schwefelvulkanismus führen. Das dabei freigesetzte Gas (Schwefeldioxid, Schwefel, atomarer Sauerstoff) bildet entlang seiner Bahn einen schlauchförmigen Ring (Torus) aus neutralem Gas und Plasma. Dieser Ring leuchtet hauptsächlich im extrem-ultravioletten Spektralbereich, wobei die Strahlung hauptsächlich von hochionisierten Schwefeldämpfen stammt. Er zeigt darüber hinaus einen interessanten radialen Aufbau. Im inneren Bereich ( $5 R_J$ ) findet man Teilchen mit einer mittleren Energie von 1 eV. Nach außen hin nimmt die Temperatur zu und erreicht im Bereich der Mondbahn ( $6 R_J$ ) bei einer maximalen Ionendichte von ca.  $3000 \text{ cm}^{-3}$  ungefähr 40 eV. Die höchsten Temperaturen findet man schließlich in den äußersten Bereichen des Torus bei  $7-8 R_J$  ( $E \sim 100 \text{ eV}$ ). Abschätzungen ergaben, das Io pro Sekunde rund eine Tonne Schwefel- und Sauerstoffatome abgeben muß, um diesen Gas- und Plasmatorus aufrechtzuerhalten. Io ist auch verantwortlich für die riesige Natriumdampfwolke, die Jupiter umgibt und die noch bis in eine Entfernung von mehr als  $400 R_J$  nachweisbar ist.

Durch die Bewegung von Io durch das Magnetfeld vom Jupiter (oder besser gesagt, das Magnetfeld des Jupiters bewegt sich mit hoher Geschwindigkeit über Io hinweg) wird der Mond auf der einen Seite positiv und auf der anderen Seite negativ aufgeladen, wobei die Potentialdifferenz ungefähr 400000 V erreicht (Io besitzt eine leitfähige Ionosphäre). Unter bestimmten Voraussetzungen verbindet sich Io mit der Ionosphäre von Jupiter und es fließen Ströme in der Größenordnung von 3 bis 5 Millionen Ampere, die sich radioastronomisch als intensive Radiobursts bemerkbar machen.



Ohne dem Einfluß von Io wäre die Magnetosphäre von Jupiter nur etwa halb so groß und auch die Polarlichtgürtel (Aurora) um Jupiter Pole wären nur halb so spektakulär als wie man sie auf den Photos des Hubble-Weltraumteleskops bewundern kann. Trotzdem sind noch viele Probleme ungelöst. Inwieweit nach der überaus erfolgreichen Galilei-Mission in den nächsten Jahrzehnten weitere Planetensonden zum Jupiter entsandt werden, ist noch unklar.

**Daten****BAHNPARAMETER**

Große Halbachse ( $10^6$ km)	778.57
Umlaufszeit (siderisch) in Tagen	4332.589
Umlaufszeit (tropisch) in Tagen	4330.595
Perihelabstand ( $10^6$ km)	740.52
Aphelabstand ( $10^6$ km)	816.62
Mittlere Bahngeschwindigkeit (km/s)	13.07
Max. Bahngeschwindigkeit (km/s)	13.72
Min. Bahngeschwindigkeit (km/s)	12.44
Bahnneigung (Grad)	1.304
Numerische Exzentrizität	0.0489
Sidereale Rotationsperiode (Stunden)	9.925
Länge eines Tages (Stunden)	9.9259

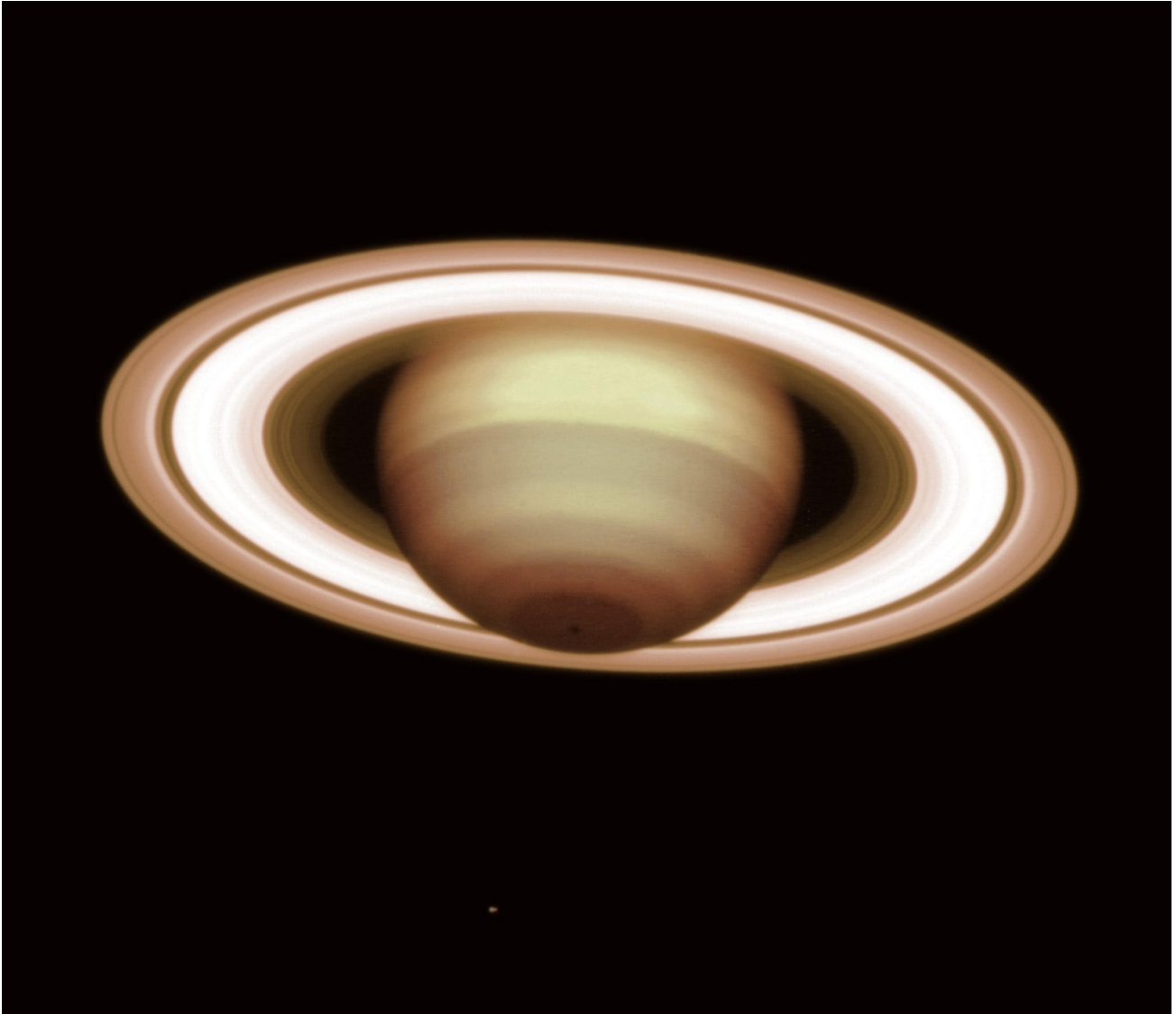
**PLANETENPARAMETER**

Masse ( $10^{24}$ kg)	1898.6
Volumen ( $10^{10}$ km <sup>3</sup> )	143128
Äquatorradius (km) 1 bar Niveau	71492
Polradius (km) 1 bar Niveau	66854
Abplattung	0.0649
Mittlere Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	1326
Schwerebeschleunigung (m/s <sup>2</sup> ) 1 bar Niveau	24.79
Entweichgeschwindigkeit (km/s)	59.4
Albedo	0.343
Geometrisches Albedo	0.52
Solarkonstante (W/m <sup>2</sup> )	50.50
Strahlungstemperatur (K)	110

**ATMOSPHERE**

Dichte bei P=1 bar (kg/m <sup>3</sup> )	~0.16
Skalenhöhe (km)	27
Temperatur bei P=1 bar (K)	~165 K
Mittleres Molekulargewicht (g/mol)	2.22

## Saturn



Was mag CHRISTIAN HUYGENS (1629-1695) gedacht haben, als er 1656 durch sein 7 Meter langes Luftfernrohr (das ist ein Fernrohr ohne Tubus) zum ersten Mal die Saturnringe in Form einer flachen, den gesamten Planeten umgebenden Kreisscheibe erblickte. Bereits 46 Jahre früher wunderte sich GALILEO GALILEI (1564-1642) über zwei „Henkel“ an diesem auffälligen Planeten. Er konnte sich jedoch aufgrund der schlechten Auflösung seiner Fernrohre keinen rechten Reim darauf machen. Außerdem verschwanden sie in den Folgejahren wieder so daß er sie nicht weiter beachtete.

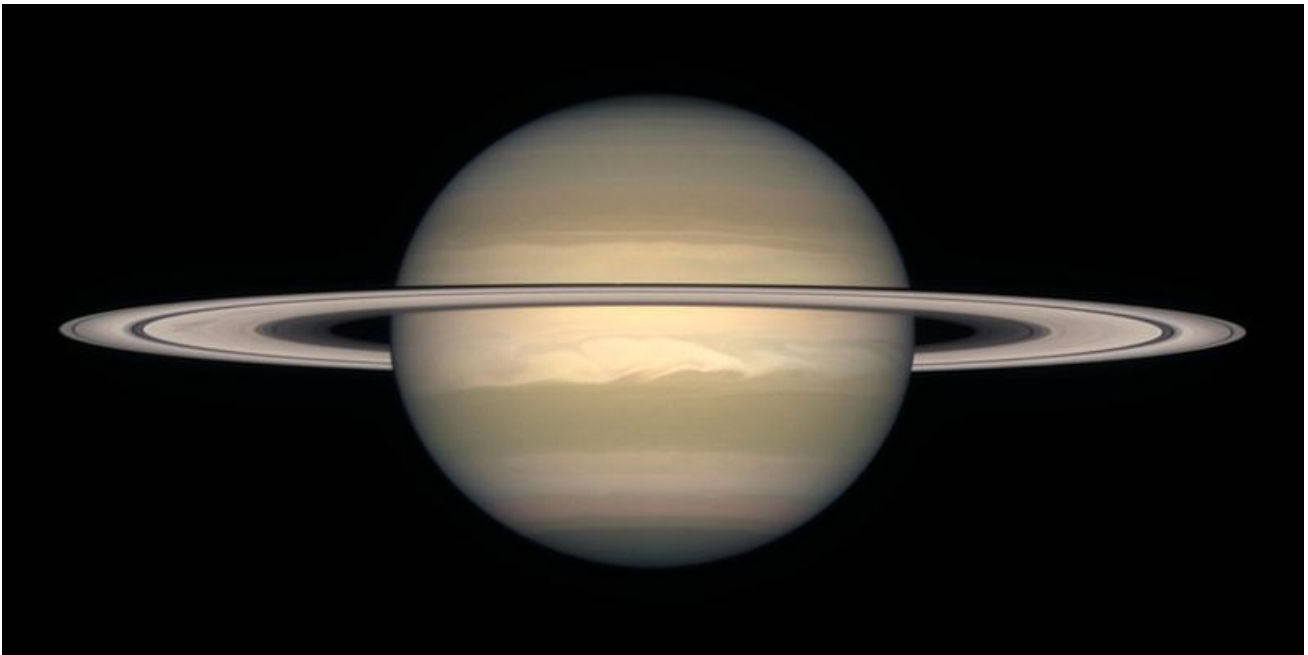
1675 fand der erste Direktor der Pariser Sternwarte GIOVANNI CASSINI (1625-1712) die nach ihm benannte Teilung des Ringes. Er stellt die Hypothese auf, daß der Ring aus vielen kleinen Einzelkörpern besteht, die wie Monde den Planeten umkreisen. WILHELM HERSCHEL (1738-1822) dagegen, der sich sehr intensiv mit diesem Ringplaneten beschäftigte, äußerte die Ansicht, daß es sich bei den Saturnringen nur um zwei durch die Cassini'sche Trennung unterteilte starre Körper handeln kann. Aufgelöst wurde das Rätsel erst durch den berühmten französischen Wissenschaftler PIERRE SIMON DE LAPLACE (1749-1827), der anhand einer genauen mathematischen Analyse zeigen konnte,

## Saturn

daß der Ring aus Staub- und Gesteinsbrocken bestehen muß und der in diesem Zusammenhang darüber hinaus noch die Existenz weiterer Lücken vorhersagte. Eine derartige Lücke fand 1837 JOHANN FRANZ ENCKE (1791-1865), die seitdem „Encke'sche Teilung“ genannt wird. Später haben sich auch Nichtastronomen wie z.B. JAMES CLERK MAXWELL (1831-1879), der Begründer der modernen Elektrodynamik, mit himmelsmechanischen Problemen des Saturnrings auseinandergesetzt (er gewann 1857 den Adams-Preis der Universität Cambridge mit einer Arbeit über die Berechnung der Teilchenbahnen im Saturnring).

1895 konnte schließlich JAMES KEELER (1857-1900) an der Pittsburger Sternwarte mit der eben eingeführten spektroskopischen Methode zeigen, daß sich die inneren Ringteile schneller bewegen als die Äußeren so wie es die Keplerschen Gesetze verlangen. Damit war endgültig bewiesen, daß der Saturnring aus vielen kleinen Teilchen bestehen muß.

Der Wunsch, dieses außergewöhnliche mechanische System zu verstehen, hat durch die Untersuchungen der beiden Voyager-Raumsonden während ihrer Vorbeiflüge am Saturn Anfang der achtziger Jahre nochmals starke Impulse erhalten.



Saturn nahe der Ringkantenstellung, aufgenommen mit dem Hubble-Weltraumteleskop. Deutlich ist die starke Abplattung des Planeten zu erkennen. An der Außenkante des Rings ist sowohl die Cassini-Trennung und die schmalere Encke-Trennung zu sehen.

Über die physische Struktur des Planeten war bis zu Beginn des Raumflugzeitalters nur recht wenig bekannt. Man wußte, daß Saturn kleiner und stärker abgeplattet ist als Jupiter, daß seine Dichte geringer ist und daß sich in seiner Atmosphäre ab und an streifenförmige Strukturen und verschiedentlich Flecke zeigten – aber niemals so deutlich wie auf Jupiter. Wenn er nicht ein so imposantes Ringsystem hätte, wäre er für den Beobachter am Fernrohr auf Dauer ein recht langweiliges Objekt.

Trotzdem übt dieser Planet auch heute noch eine eigentümliche Faszination aus. Er ist nicht ohne Grund ein beliebtes Objekt in den öffentlichen Sternwarten und schon viele Menschen haben ihren Weg zur Astronomie über den Anblick dieses Ringplaneten in einem Fernrohr gefunden.

Das meiste, was man heute über Saturn, seinen Ringen und seinen Monden weiß, verdankt man den von Pioneer 11 (1979), Voyager 1 (1980) und Voyager 2 (1981) bei ihren Vorbeiflügen übermittelten Bildern und Meßwerten. Und das hat neugierig gemacht. Deshalb wurde am 15. Oktober 1997 die Raumsonde „Cassini“ gestartet, die am 1. Juli 2004 den Ringplaneten erreichte und seitdem atemberaubende Bilder vom Saturn, seinen Ringen und seinen Monden liefert.

### Allgemeines

Saturn umkreist in einer mittleren Entfernung von 9.554 AU in 29.42 Jahren einmal die Sonne. Er ist damit der am weitesten entfernte Planet, den man noch mit freiem Auge beobachten kann. Während der Opposition erreicht er eine Helligkeit von maximal  $0.^m 67$  und ist damit ein durchaus auffälliges Objekt, das durch sein blaßgelbes, flickerfreies Licht leicht aufzufinden ist. Die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Oppositionen beträgt in etwa 378 Tage.

Mit einem Äquatordurchmesser von 120536 km ist Saturn der zweitgrößte Planet unseres Sonnensystems und nur wenig kleiner als Jupiter ( $R_{\text{Ä}}=142984$  km). Seine Masse ist dagegen bedeutend geringer, was sich in einer mittleren Dichte von nur  $690 \text{ kg/m}^3$  niederschlägt (Vergleich: Jupiter  $1330 \text{ kg/m}^3$ , Erde  $5515 \text{ kg/m}^3$ ). Damit hat Saturn die geringste Dichte von allen Planeten des Sonnensystems.

Wenn der Ring in Kantenstellung steht fällt im Fernrohr sofort die außerordentlich starke Abplattung des Planeten auf: Äquator- und Poldurchmesser differieren immerhin um 11808 km. Bei dem etwas größeren Jupiter ist die Abplattung geringer (0.065), obwohl seine Rotationsdauer mit der Rotationsdauer Saturns vergleichbar ist.

Die Gleichgewichtsfigur, die eine rotierende Flüssigkeits- bzw. Gaskugel einnimmt, ist abhängig von der Materieverteilung in ihrem Inneren. Wenn sie nicht rotiert und sich im Zustand des hydrostatischen Gleichgewicht befindet, stellt sie eine ideale Kugel dar, deren Gravitationspotential durch

$$V(r) = -\frac{GM}{r} \quad [1.1]$$

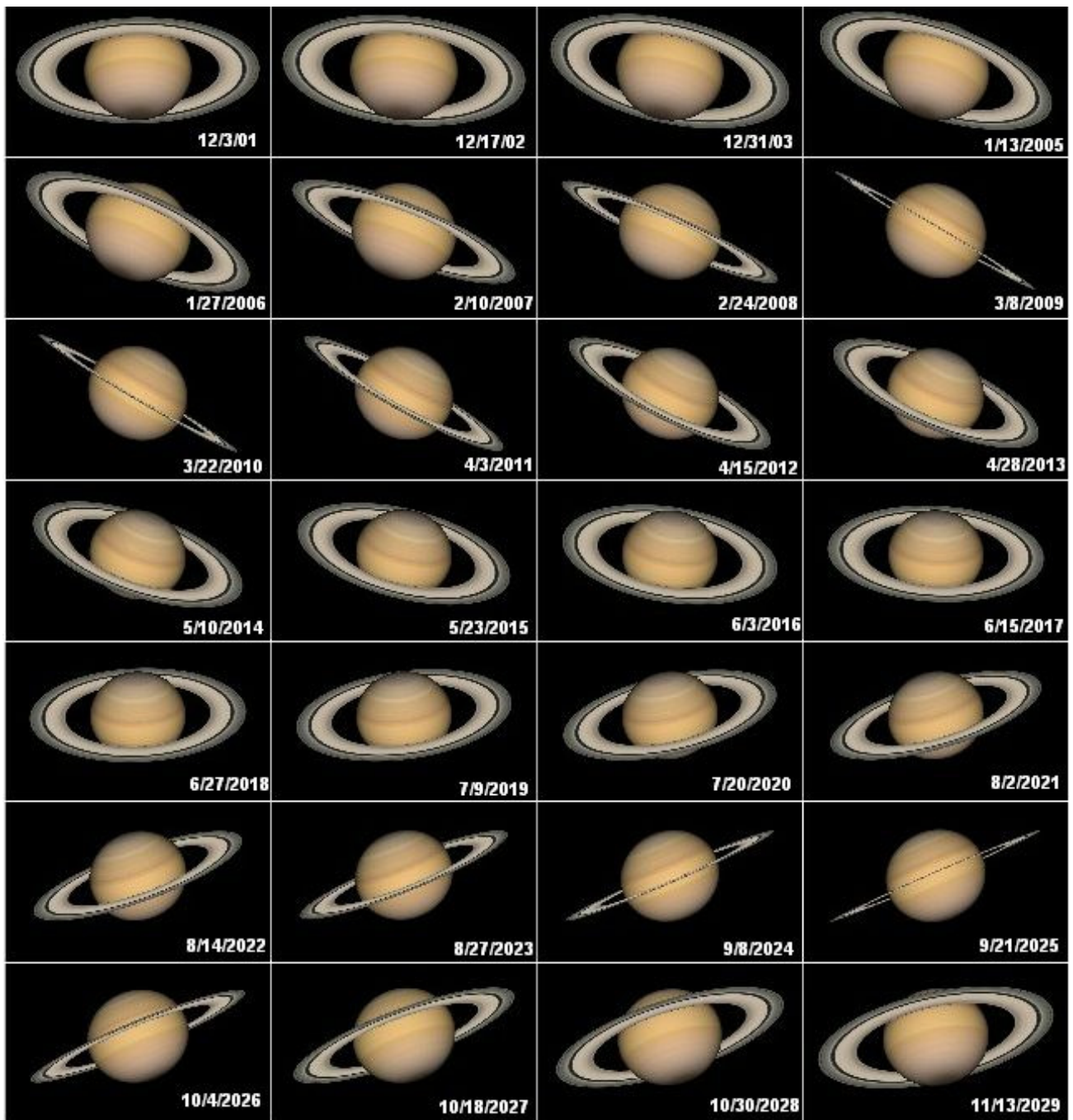
gegeben ist. Wird diese Gleichgewichtsfigur durch Rotation deformiert (durch die auftretenden Fliehkräfte), dann ändert sich auch das Gravitationspotential auf eine bestimmte Art und Weise, die von der Massenverteilung innerhalb des Planeten abhängt (Stichwort Trägheitsmoment). In diesem Fall wird das Gravitationspotential durch Korrekturterme modifiziert:

$$V(\vartheta, r) = -\frac{GM}{r} \left[ 1 - \left(\frac{R}{r}\right)^2 J_2 P_2(\cos \vartheta) - \left(\frac{R}{r}\right)^4 J_4 P_4(\cos \vartheta) - \dots \right] \quad [1.2]$$

$\vartheta$  Winkel zwischen Rotationsachse und  $r$ ,  $R$  Planetenradius,  $P_n$  Legendre-Polynome

## Saturn

Wesentlich sind dabei die harmonischen Koeffizienten  $J_i$  ( $i = 2, 4, 6 \dots$ ), die Informationen über den inneren Aufbau eines Planeten enthalten und sich aus Beobachtungen (z.B. aus der Abplattung sowie aus der Analyse der Bahnen von Satelliten, die vorbeifliegen) bestimmen lassen. Für die Gleichgewichtsfigur Saturns ist im Wesentlichen  $J_2$  (abhängig von der Abplattung) und  $J_4$  (abhängig von der Masseverteilung in den oberflächennahen Regionen) verantwortlich. Ihre Größe impliziert, daß sich im Zentrum des Planeten ein relativ großer und kompakter Kern befinden muß, der ca. 20% der gesamten Planetenmasse enthält.



Saturnoppositionen von 2001 bis 2029 nach Aufnahmen des Hubble-Teleskops

Jupiter und Saturn unterscheiden sich nur gering in ihrer Rotationsdauer. Wie bei einem Gasplaneten zu erwarten, führt Saturn eine differentielle Rotation aus. In Äquaturnähe (System I) beträgt die Rotationsperiode  $10^h 14^{\text{min}}$  und in den mittleren Breiten (System II)  $10^h 40^{\text{min}}$ . Radioastronomisch konnte man für die Rotationsdauer im Inneren des Planeten eine Periode von  $10^h 39^{\text{min}} 25^{\text{s}}$  ableiten (System III). Diese Periode wird genauso wie bei Jupiter als Referenzsystem benutzt, da sie zeitlich sehr stabil ist.

Die Ringe des Saturns liegen genau in der Äquatorebene. Da die Äquatorebene gegenüber der Bahnebene um  $26^\circ 45'$  geneigt ist, nehmen sie bei der Bewegung um die Sonne unterschiedliche Stellungen relativ zur Erde ein. Deshalb sind die Ringflächen während eines Umlaufs um die Sonne auch abwechseln bis zu  $27^\circ$  gegen die Sonne bzw. gegen die Erde geneigt. Alle 15 Jahre kann man sogar genau auf die Ringkanten blicken. Da das Ringsystem sehr dünn ist, verschwindet es in diesem Augenblick quasi für einen Beobachter auf der Erde.

Neuere Forschungen deuten darauf hin, daß die Neigung der Rotationsachse Saturns ursächlich mit dem Planeten Neptun zu tun hat. Beide Planeten befinden sich in Resonanz zueinander mit einer Periode von ca. 1.8 Millionen Jahren. Das entspricht auch ziemlich genau der Präzessionsperiode Saturns (1.83 Millionen Jahre), was sicherlich kein Zufall ist.

Saturn besitzt genauso wie Jupiter ein ausgeprägtes Satellitensystem. Bis heute (2007) sind insgesamt 56 Monde bekannt. Darunter sind 5 mit einem Durchmesser über 1000 km.

### Innerer Aufbau

Vom Prinzip her sollte der innere Aufbau Saturns dem des Jupiters ähneln, da beide Planeten ungefähr die gleiche Größe haben. Im Unterschied zu Jupiter ist die mittlere Dichte des Ringplaneten jedoch nur etwa halb so groß (und kleiner als die von Wasser), was – wegen der dadurch geringeren Masse – auch zu einer geringeren Schwerkraft führt. Die Zone, wo der Druck so groß wird (d.h.  $\sim 1 \dots 5$  Mbar), daß der flüssige Wasserstoff in den metallischen Zustand übergeht, liegt deshalb viel weiter innen und auch die Dicke dieser Schicht, die sich bis zu einem im Vergleich zu Jupiter recht großen Kernbereich fortsetzt, ist offensichtlich viel geringer. Aus Modellrechnungen ergibt sich deshalb für den inneren Aufbau Saturns in etwa folgendes Bild:

#### Atmosphäre

Die Saturnatmosphäre ist aufgrund des geringeren Druckgradienten mächtiger als die Atmosphäre Jupiters. Sie ist in Bezug auf die solare Elementhäufigkeit mit schweren Elementen (als He) angereichert (die Häufigkeit von Kohlenstoffatomen - zumeist gebunden als Methan - ist z.B. 7 x größer als in der Sonnenatmosphäre) und stärker an He verarmt als die Jupiteratmosphäre.

#### Molekularer Wasserstoff

Die Atmosphäre geht stufenlos in eine Schicht aus flüssigem molekularem Wasserstoff über, die sich bis in eine Tiefe von rund 30000 km erstreckt.

### Metallischer Wasserstoff

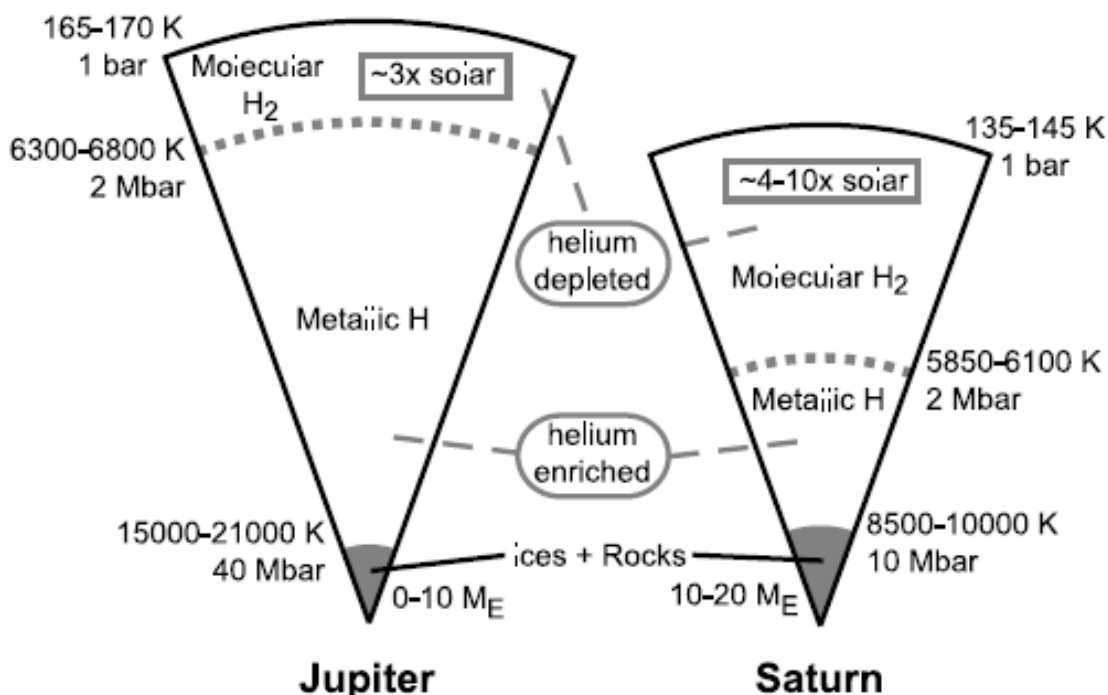
Diese Schicht hat eine bedeutend geringere Mächtigkeit als die entsprechende Schicht im Inneren Jupiters. Man erwartet eine Schichtdicke von schätzungsweise 14000 km, an deren Unterkante eine Temperatur von rund 10000 K herrscht. Das harmoniert auch mit der Beobachtung, daß das Magnetfeld des Ringplaneten deutlich kleiner ist als das Magnetfeld seines größeren Bruders Jupiter. Der Übergang in den metallischen Zustand erfolgt dabei nach neueren Modellrechnungen bei einem Druck von ca. 2 Mbar innerhalb eines Temperaturbereich zwischen 5800 und 6100 K (SAUMON und GUILLOT, 2004). In diesem Bereich sind die physikalischen Bedingungen so, daß He nicht mehr löslich ist und langsam ausregnet. Die Energie, die bei diesem Vorgang freigesetzt wird, ist im hohen Maße für den Strahlungsexzeß Saturns im Infraroten verantwortlich.

### „Eis“

Unter dem metallischen Wasserstoff haben sich Stoffe angesammelt (Schichtdicke ~ 8500 km), die man – um sie von Silikaten und Metallen abzugrenzen – als „Eis“ bezeichnet. Dieses „Eis“ besteht aus einem Gemisch von Wasser, Methan und Ammoniak und dürfte auch eine sehr große Menge Helium enthalten. Der „Eis“- und Gesteinskern beginnt ungefähr bei einem Druck von 10 Mbar im Temperaturbereich zwischen 8500 und 10000 K.

### Gesteinskern

Der feste Gesteinskern besteht aus Metallen und Silikaten und besitzt eine Masse von ungefähr 10 - 20 Erdmassen. Der Radius beträgt ca. 7000 bis 7500 km. Im Zentrum wird eine Temperatur von rund 15000 K erreicht.



Vergleich innerer Aufbau von Jupiter und Saturn

Saturn strahlt bedeutend mehr Energie ab als er von der Sonne erhält. Der Strahlungsüberschuß ist dabei größer als beim Jupiter. Da Saturn außerdem viel weiter von der Sonne entfernt ist (die Solarkonstante beträgt hier nur etwa  $15 \text{ W/m}^2$ ), muß der Energieerzeugungsmechanismus noch um einiges effektiver arbeiten (die absolute Leistung der inneren Energiequelle ist dagegen nur etwa halb so groß). Eine Erklärung für dieses Phänomen drängte sich erst auf, als Voyager 2 feststellte, daß die erwartete Helium-Konzentration in der Atmosphäre gleich mehrere Prozentpunkte geringer war als erwartet (11%, Jupiter 19%). Die Energie, die zusätzlich emittiert wird, entsteht demnach durch einen gravitativen Entmischungsprozeß, bei dem das im Vergleich zum Wasserstoff schwerere Helium auskondensiert und – ähnlich wie Wassertropfen in der Erdatmosphäre - quasi abregnet. Dabei wird entsprechend dem Virial-Theorem Gravitationsenergie frei, die thermalisiert und abgestrahlt wird. Dieser Vorgang führt zu einer Vergrößerung des Helium-Wasserstoff-Verhältnisses im Planeteninnern und zu einer Verringerung der Helium-Konzentration in der Saturnatmosphäre so wie es von der Voyager-Sonde auch gemessen wurde.

Ähnlich wie bei Jupiter hängt eine Theorie des inneren Aufbaus Saturns ganz wesentlich von einigen Schlüsseldaten ab, die nur schwer zu ermitteln sind. An erster Stelle ist hier der Verlauf der Zustandsgleichung eines Wasserstoff-Helium-Gemisches entlang einer Adiabate im Inneren des Planeten zu nennen. Obwohl in den letzten Jahren große Fortschritte (auch mittels Hochdruckexperimenten) in dieser Beziehung erreicht wurden, sind trotzdem noch einige wichtige Parameterbereiche nur sehr ungenau bekannt. Von ihrer Kenntnis hängt aber im hohen Maße der Energietransport im Planeteninneren ab. Details des Übergangs von Wasserstoff in den metallischen Zustand bestimmt z.B., ob Konvektion nur außerhalb des metallischen Bereichs oder auch innerhalb davon stattfindet. Diese Frage ist wesentlich, um z.B. im Rahmen von evolutionären Modellen den Verlauf der Abkühlung des Planeten seit seiner Entstehung aus der protostellaren Gas- und Staubwolke zu erforschen. Der heutige Wert des abgestrahlten Energieüberschusses bestimmt dabei im Wesentlichen die Anfangsbedingungen, so daß eine detaillierte Klärung des Abkühlungsprozesses auch von hohem kosmogonischem Interesse ist. Die Vermessung der Schwerefeldparameter Saturns durch Cassini hat in dieser Beziehung bereits einige wichtige neue Ergebnisse geliefert.

## Atmosphäre

Die Wolkenhülle Saturns erscheint im Fernrohr eintöniger als die des Jupiters. Das parallel zum Äquator angeordnete System von Bändern und Zonen ist erwartungsgemäß auch vorhanden, aber durch ihren geringen Kontrast weniger auffallend. Größere fleckenartige Strukturen in den Wolkenbändern sind im Gegensatz zu Jupiter eher selten (bzw. von der Erde aus schwieriger zu beobachten), treten aber durchaus sporadisch in Erscheinung. Das gilt besonders in den Sommermonaten der nördlichen Hemisphäre, wo es aufgrund des höheren Energieeintrags durch die Sonne zu Störungen in den nördlichen Äquatorialbändern kommt. Dabei treten z.T. gewaltige Wirbelstürme auf, die sich durch helle Wolken aus Ammoniak eis verraten. Einen solchen Sturm konnte man z.B. 1994 selbst mit Amateurfernrohren beobachten.

Die Windgeschwindigkeiten in der Saturnatmosphäre erreichen am Äquator fast  $500 \text{ m/s}$  (Jupiter ca.  $150 \text{ m/s}$ ). Das ist vielleicht auch die Ursache dafür, daß es keine langlebigen Wirbel (wie die WOS auf Jupiter) in der Saturnatmosphäre gibt, weil die starken zonalen Winde sehr effektiv zu ihrer Zerstörung

beitragen. Genauso wie bei Jupiter findet man in der Saturnatmosphäre zyklonale und antizyklonale Wolkensysteme. Bei den Vorbeiflügen der Voyager-Sonden konnten z.B. ein ausgedehnter rötlicher Fleck mit einer Ausdehnung von 6000 x 10000 km auf der nördlichen Halbkugel und ein ähnlicher, etwas kleinerer Fleck (3000 x 5000 km) auf der südlichen Halbkugel fotografiert werden.



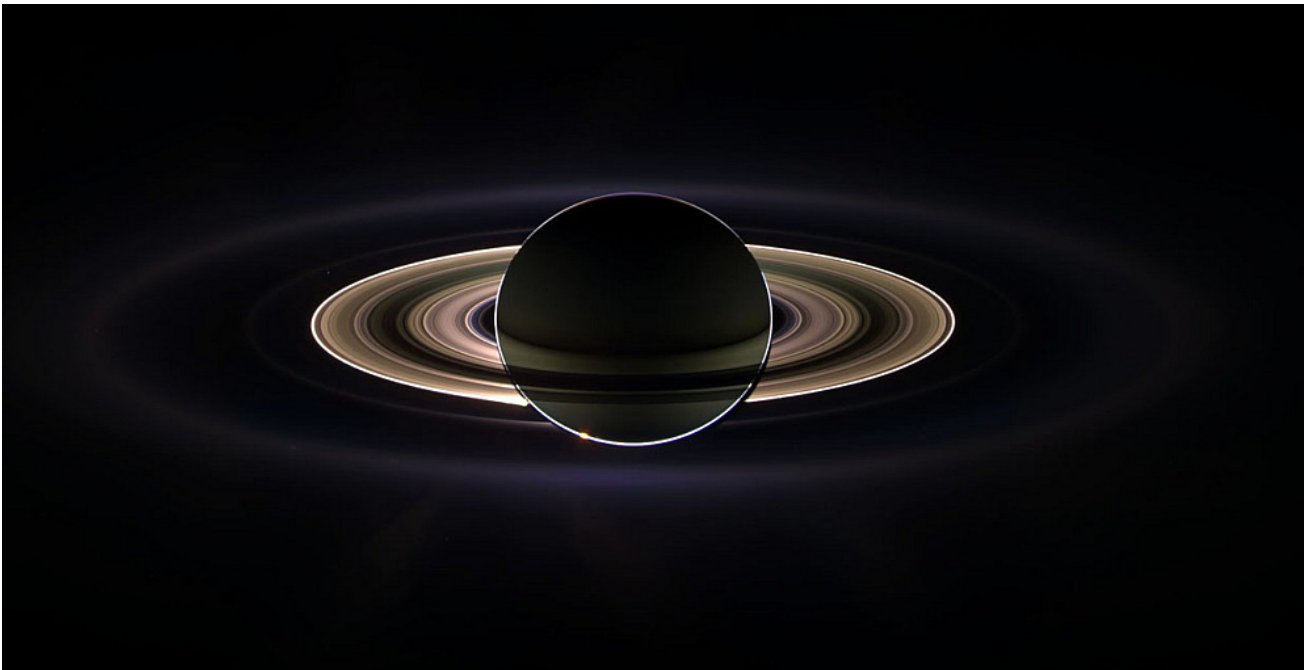
Detailaufnahme der Saturnatmosphäre im nahen Infrarot (750 nm) mit einer Auflösung von 17 km/Pixel (Cassini). Deutlich sind runde, aufquellende Wolkenformationen erkennbar.

Der Aufbau und die Bestandteile der Wolken sind weitgehend mit denen Jupiters identisch. Aufgrund der verschiedenen Druck- und Temperaturverhältnisse liegen die einzelnen Wolkenschichten jedoch in größerem vertikalem Abstand. Die oberste Schicht bilden Ammoniakwolken. Darunter schließt sich eine Schicht aus auskondensierten Ammoniumhydrogensulfid an, welches u.a. die bräunliche Färbung der Bänder bewirkt. Ungefähr 160 Kilometer unterhalb der Untergrenze der Ammoniakwolken sind die Umgebungsbedingungen so, daß es zur Ausbildung von Wasserdampfwolken kommen kann. Durch die geringere Masse Saturns verteilen sich die Wolken über einen vertikalen Bereich von fast 300 Kilometer. Jupiters starkes Gravitationsfeld erlaubt dagegen nur eine vertikale Ausdehnung zwischen 75 und 100 Kilometer.

Während man bei Jupiter durch „hot spots“ in tiefere Bereiche der Atmosphäre blicken kann, ist das bei Saturn aufgrund der dichteren Wolken nicht möglich.

### Ringsystem

Die Saturnringe bieten bei günstiger Stellung (z.B. wenn die Ringöffnung nahe bei ihrem Maximalwert liegt) bereits in einem gewöhnlichen Amateurfernrohr einen beeindruckenden Anblick. Schon mit relativ kleinen Instrumenten kann man bei ruhiger Luft deutlich die Cassini-Trennung ausmachen, welche den etwas dunkleren A-Ring von dem inneren B-Ring trennt. Mit etwas größeren Fernrohren ist sogar die deutlich schmalere Encke-Teilung im Bereich der Außenringe sichtbar. Unter ganz außergewöhnlichen Sichtbedingungen – wie z.B. auf dem Pic du Midi in den französischen Pyrenäen – konnten einige Beobachter visuell sogar noch weitere Ringteilungen erkennen.



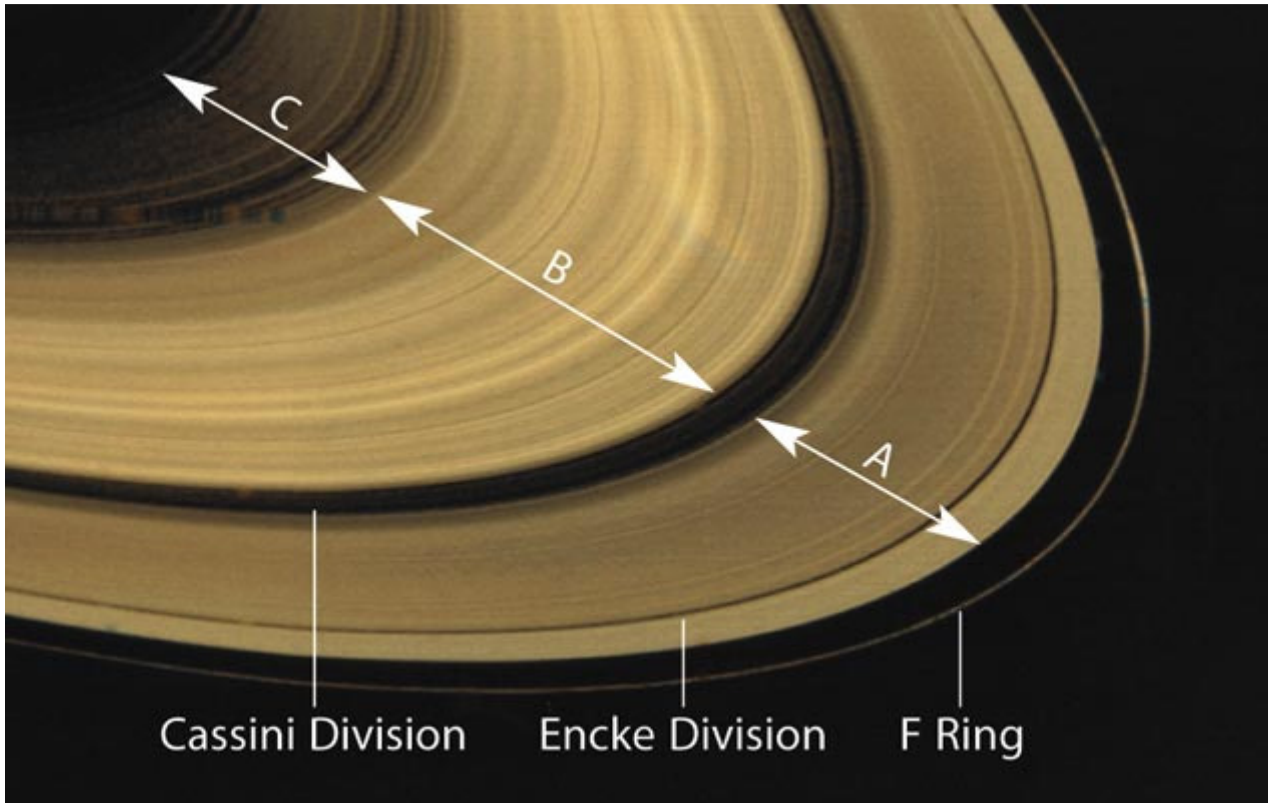
Ringsystem des Saturn, aufgenommen durch Cassini während einer für die Sonde totalen Sonnenfinsternis. Der Ring erscheint hell durch das an den Ringpartikeln gestreute Sonnenlicht.

Aber erst die Telemetrieaufnahmen der Raumsonden Voyager 1 und 2 enthüllten die außerordentliche Komplexität und Dynamik dieses Ringsystems. Man wußte zwar schon vorher, was die Sonden bei ihrem Flug durch das Saturnsystem ungefähr erwarten würden. Aber daß man anstelle von einem halben Dutzend jetzt auf einmal Hunderte von Ringen auf den Aufnahmen zählen konnte, überraschte selbst die am Projekt beteiligten Wissenschaftler. Noch viel mehr interessante Details verdanken wir jedoch der Raumsonde Cassini, die nun schon seit einigen Jahren Saturn umkreist und dabei das Ringsystem aus allen möglichen Perspektiven fotografieren konnte.

Bereits von der Erde aus sind bei großer Ringöffnung leicht Albedounterschiede in den einzelnen Ringen auszumachen. Sie führten Ende des achtzehnten Jahrhunderts zu einer Bezeichnungsweise, die noch heute beibehalten wird. Danach wird der äußerste Ring als A-Ring (oder Außenring), der relativ helle mittlere Bereich als B-Ring und der nur sehr schwer sichtbare innerste Ring als C-Ring oder Flooding bezeichnet. Die Beobachtungen der beiden Voyager-Sonden hat diese Einteilung weiter modifiziert, so daß man darüber hinaus noch von D, E, F und G-Ringen spricht (die Buchstabenreihenfolge widerspiegelt hier die Entdeckungsreihenfolge und nicht mehr die räumliche

Anordnung). Dazu kommt noch ein weiterer, bisher offiziell noch nicht benannter extrem schwacher Ring, der am 17. September 2006 im Streulicht einer „Sonnenfinsternis“ von Cassini entdeckt wurde und sich zwischen dem G- und E-Ring befindet.

Die großen Ringstrukturen selbst bestehen aus einer Vielzahl von Einzelringen, die man als Ringlets bezeichnet.



Hinweis: Alle Entfernungsangaben in den Ringbeschreibungen beziehen sich auf die Entfernung zur Saturnoberfläche (Radius 60268 km)

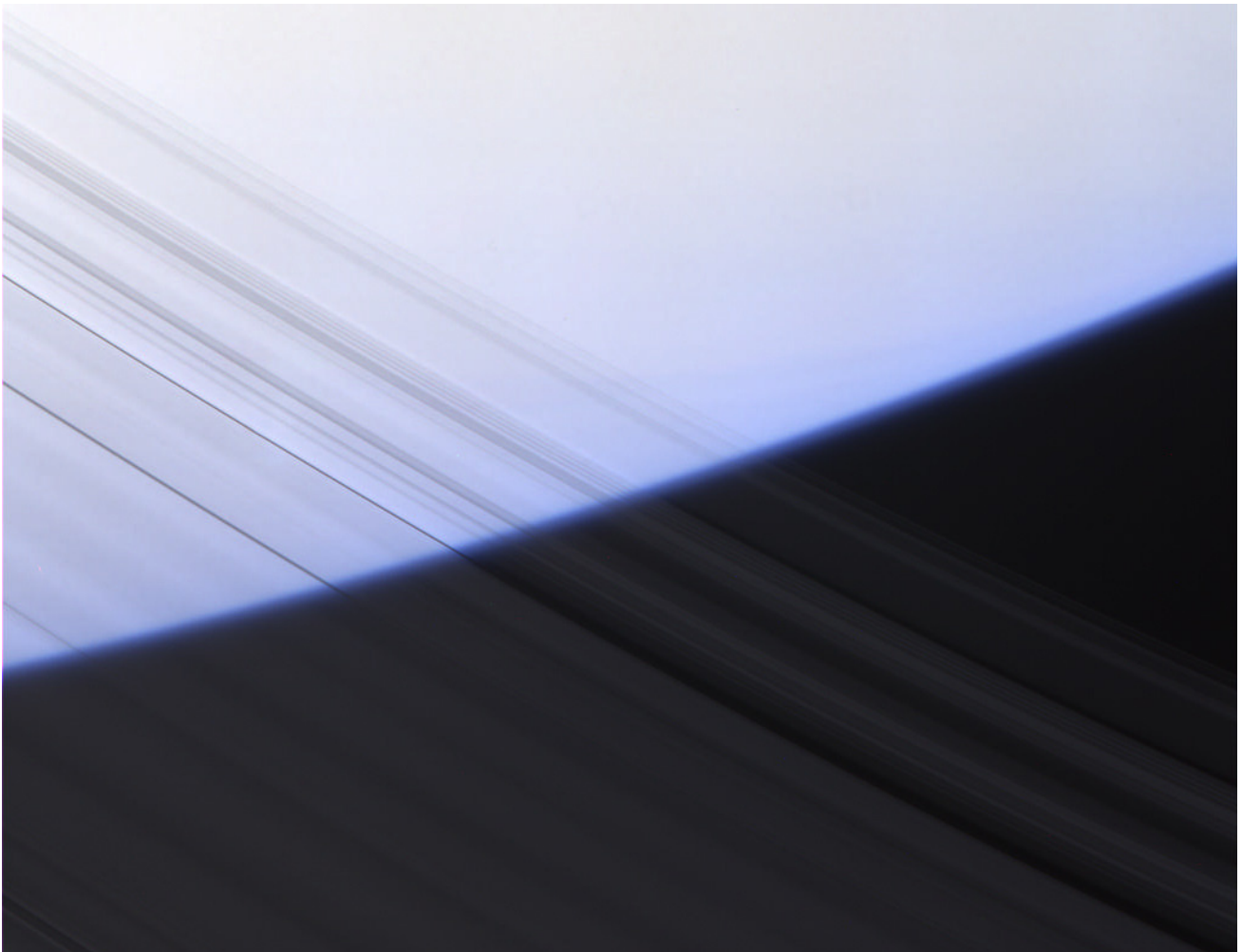
## D-Ring

Besteht aus äußerst schwachen Staubbändern, die sich ungefähr in der Hälfte der Lücke zwischen der Wolkenschicht Saturns und der Innenkante des C-Rings (Entfernung von der Wolkenobergrenze ca. 6630 km) befinden. Der D-Ring wurde 1981 von Voyager 1 entdeckt und ist von der Erde aus prinzipiell nicht nachweisbar. Eine optische Tiefe  $\tau$  von ca.  $10^{-6}$  bedeutet, daß nur der millionste Teil der Ringfläche von Ringteilchen abgedeckt wird. Die Trennung vom C-Ring erfolgt durch die ca. 1200 km breite Guerin-Teilung.

## C-Ring (Flor- oder Krepp-Ring)

Die Innenkante ist ca. 13700 km und die Außenkante ca. 31500 km von der Saturnoberfläche entfernt. Der Flor-Ring wurde 1850 entdeckt und kann von der Erde aus sowohl visuell wahrgenommen als auch fotografiert werden. Die optische Tiefe (Erklärung siehe Jupiter-Ring) variiert zwischen 0.05 und

0.12. Zwischen der Außenkante des C-Rings und der Innenkante des B-Rings befindet sich die 270 km breite Maxwell-Lücke mit dem Maxwell-Ringlet. Davor zieht sich in einer Entfernung von 17600 km das sogenannte Titan-Ringlet hin, dessen Dicke nur ungefähr 5 m betragen dürfte.



Fast durchsichtig erscheint der D- und C-Ring auf dieser Cassini-Aufnahme

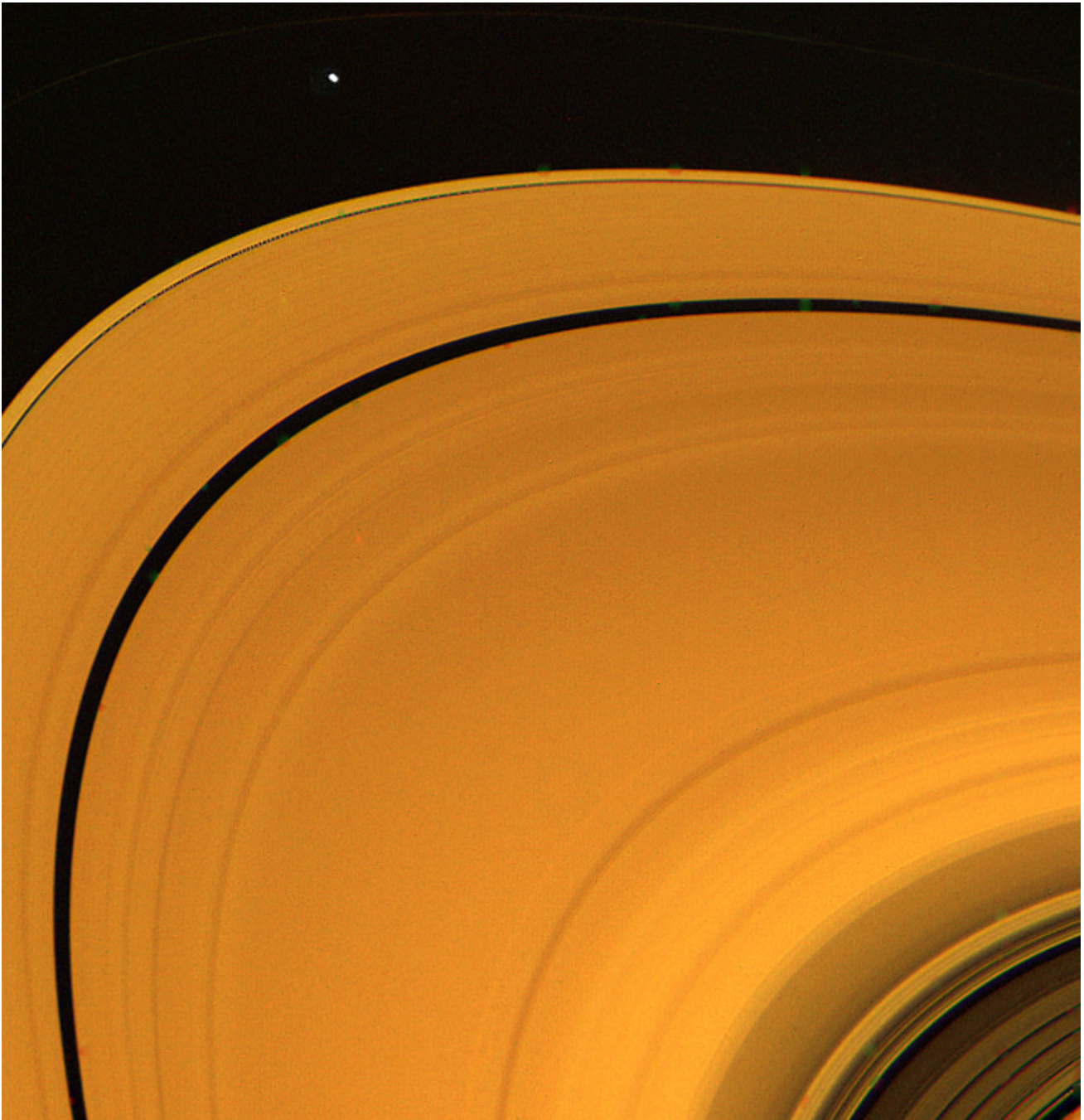
### **B-Ring**

Der sandfarbene B-Ring wird von innen nach außen stetig heller (d.h. die optische Dicke steigt von ca. 0.4 an der Innenkante (Abstand 31700 km) bis auf ca. 1.8 unterhalb der Cassini'schen Teilung bei 59600 km an). In ihm wurden sogenannte Speichen („*spokes*“) entdeckt, die mit Saturn mitrotieren. Sie scheinen aus Staubteilchen zu bestehen, da sie im Auflicht dunkler und im Gegenlicht heller erscheinen als der Ring selbst.

Sowohl die Aufnahmen von Voyager als auch von Cassini zeigen, daß der B-Ring aus einer kaum zählbaren Anzahl von nacheinander angeordneten Ringlets besteht. Die meisten davon sind exakt kreisförmig. Man hat aber auch einige entdeckt, die mehr eine exzentrische Form aufweisen. Außerdem konnten ähnlich wie im A-Ring Anzeichen von wellenartigen Strukturen gefunden werden, die zu einer leichten periodischen Deformation des Rings führen.

An den B-Ring schließt sich die 4600 km breite Cassini'sche Teilung an, die nach den Beobachtungen der Voyager-Sonden und natürlich auch Cassini nicht leer ist, sondern eine Anzahl weiterer, jedoch sehr schwacher Ringe enthält. Darunter befindet sich das sogenannte „charming ringlet“, welches bei günstigen Lichtverhältnissen (Vorwärtsstreuung) alle anderen benachbarten Ringlets überstrahlen kann.

Die scharfe Außengrenze des B-Rings ist nicht konstant. Sie variiert ihren Abstand zum Saturn um bis zu 200 km in einer 2:1-Resonanz mit dem Mond Mimas.



Voyager-Aufnahme des A-Rings. An der Außenkante ist die Encke-Teilung und als schwarzer breiterer Bogen die Cassini-Trennung zu erkennen.

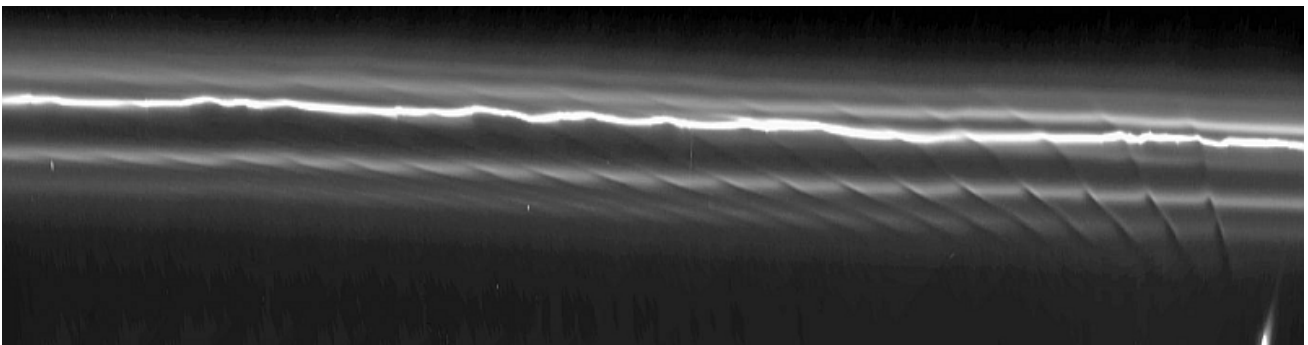
### A-Ring

Der A-Ring beginnt außerhalb der Cassini'schen Trennung (optische Tiefe ca. 0.4 bis 1.0) und setzt sich bis zu einem Abstand von 76500 km fort, wobei er leicht heller wird (optische Tiefe ca. 0.7). Er wird durch die Encke-Teilung (Breite ca. 325 km) in zwei Teilringe gespalten. Der äußere der beiden Teilringe enthält noch die sehr schwer zu beobachtende Keeler-Teilung (Breite ca. 42 km). In ihm kreist der 2005 auf Cassini-Aufnahmen entdeckte Mond Daphnis (Durchmesser ca. 7 km), welcher quasi die Ringlücke staubfrei hält. Die Encke-Teilung enthält zwei sehr dünne, knotige Ringlets sowie den 1990 entdeckten Mond Pan (Durchmesser ca. 30 km).

Bemerkenswerterweise ist die Außengrenze des A-Rings sehr scharf begrenzt, wie die detaillierten Beobachtungen der Cassini-Sonde zeigen. Die Ursache dafür ist in der gravitativen Wechselwirkung mit dem ca. 30 km großen, abgeflachten und auch ansonsten unregelmäßig geformten Mond Atlas zu suchen, der nur wenig außerhalb dieser Kante als „shepherd moon“ seine Bahn zieht. Dabei wird die Bahn durch einen sehr schwachen, ca. 300 km breiten Staubring nachgezeichnet (vorläufiger Name R/2004 S1)

Im A-Ring beobachtet man ähnlich wie im B-Ring Dichtewellen. Eine genaue Analyse dieser Wellen hat ergeben, daß die Dicke dieses Rings kaum 15 Meter übersteigen dürfte.

Die A, B und C-Ringe weisen Strukturen auf, die eher an die Rillen einer Schallplatte erinnern als einer gleichmäßigen Ringfläche. D.h., sie bestehen aus vielen kleinen Ringlets, die durch schmale Lücken bzw. durch Bereiche mit geringerer Teilchendichte voneinander getrennt sind (bzw. durch ein unterschiedliches Albedo getrennt erscheinen).



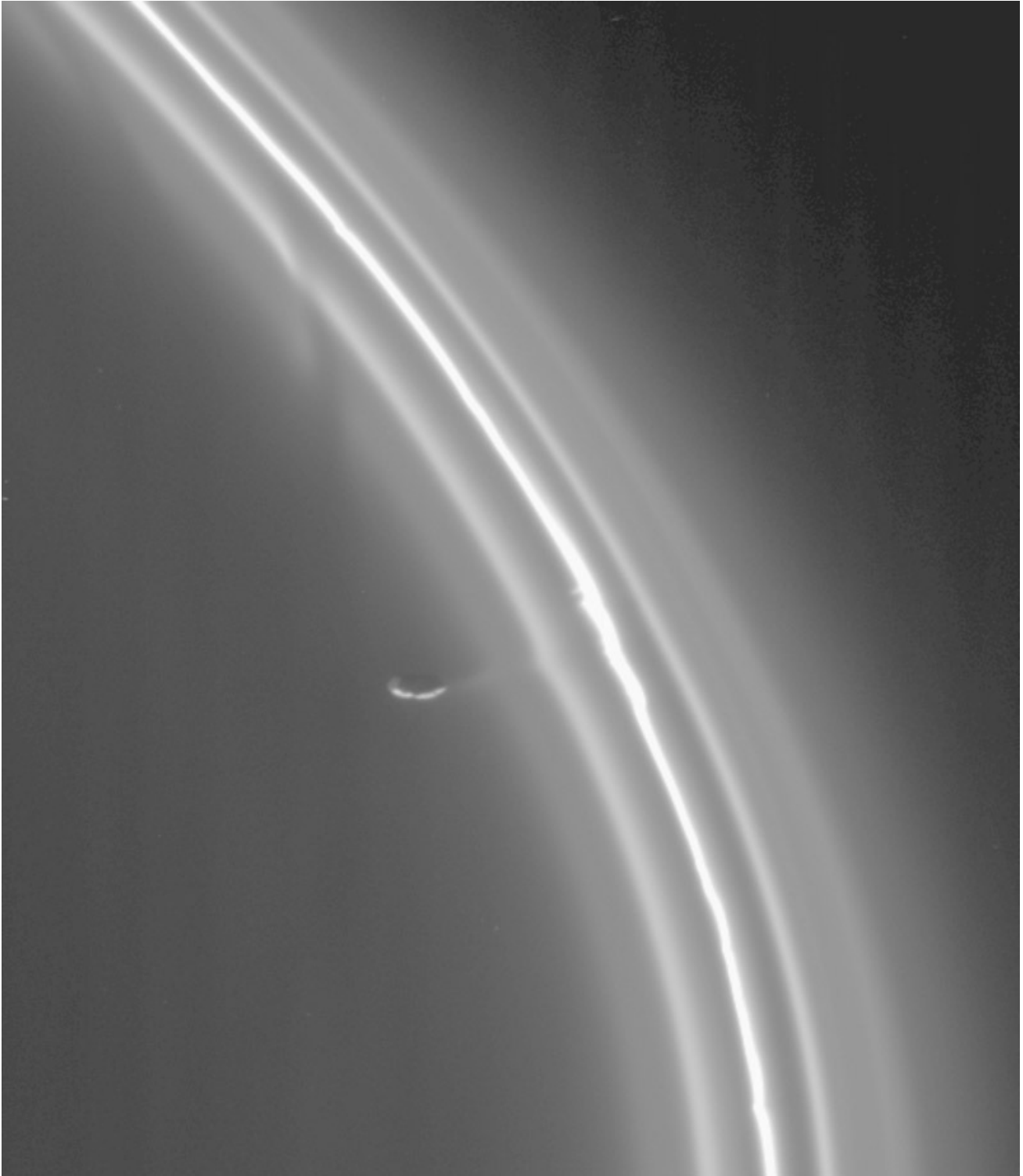
Detailaufnahme des F-Rings mit seltsamen Strukturen (Aufnahme Cassini)

### F-Ring

Der bereits von Pioneer 11 entdeckte F-Ring ist sehr schmal (ca. 100 km) und befindet sich in 79900 km Entfernung von Saturns Wolkenobergrenze bzw. ist ungefähr 3400 km vom äußeren Rand des A-Rings entfernt. Er ist die hellste Struktur des Saturnrings im Gegenlicht und zeigt eine eigentümliche, z.T. verdrehte Form, die – wie ein Vergleich der Voyager 1 und Voyager 2-Aufnahmen zeigte – selbst über kürzere Zeiträume nicht stabil ist. Der F-Ring besteht aus fünf einzelnen Bändern (jedes ca. 30 - 40 km breit), die Knicke, Verbiegungen und knotenähnliche Strukturen aufweisen. In regelmäßigen Abständen von ca. 9000 km wurden z.B. klumpige Strukturen beobachtet, die besonders im innersten

und hellsten Band auffällig sind. Starke Deformationen findet man an der aktuellen Position der Shepherd-Monde Prometheus (Innen) und Pandora (Außen).

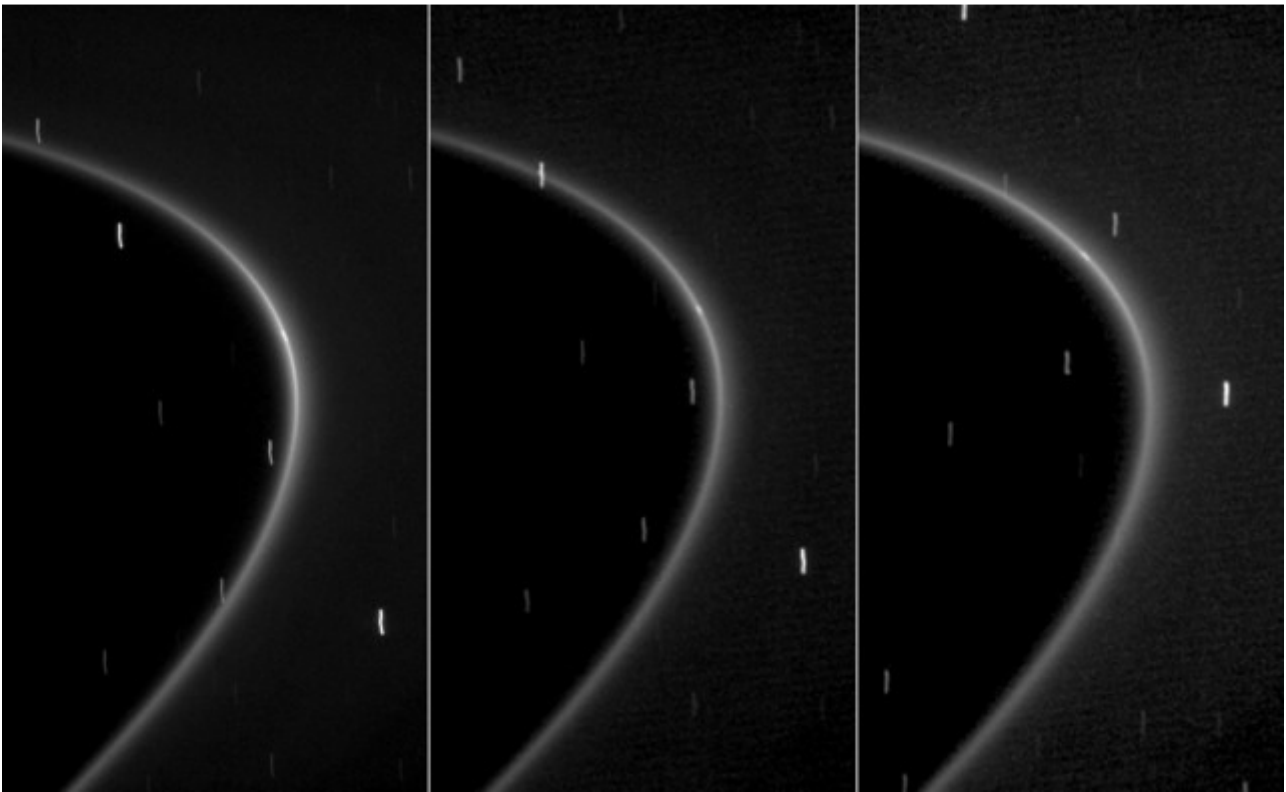
Die Ursache für diese Eigentümlichkeiten liegt in den gravitativen Einflüssen dieser beiden Monde auf die Staubpartikel des F-Rings.



F-Ring mit seinem „Schäfermond“ Prometheus (Aufnahme Cassini)

### G-Ring

Dieser sehr schwache Ring (optische Tiefe ca.  $10^{-4}$  bis  $10^{-5}$ ) befindet sich in einer Entfernung von ca. 104700 km und war auf den Aufnahmen der Voyager-Sonden nur im vorwärtsgestreuten Licht zu sehen. Cassini konnte an der Außenkante dieses Rings eine bogenförmige Verdichtung ausmachen, die ungefähr 10% des Ringumfangs einnimmt und in Resonanz zum Saturnmond Mimas steht (6 Umläufe von Mimas um den Saturn entsprechen 7 Umläufen dieser Verdichtung).



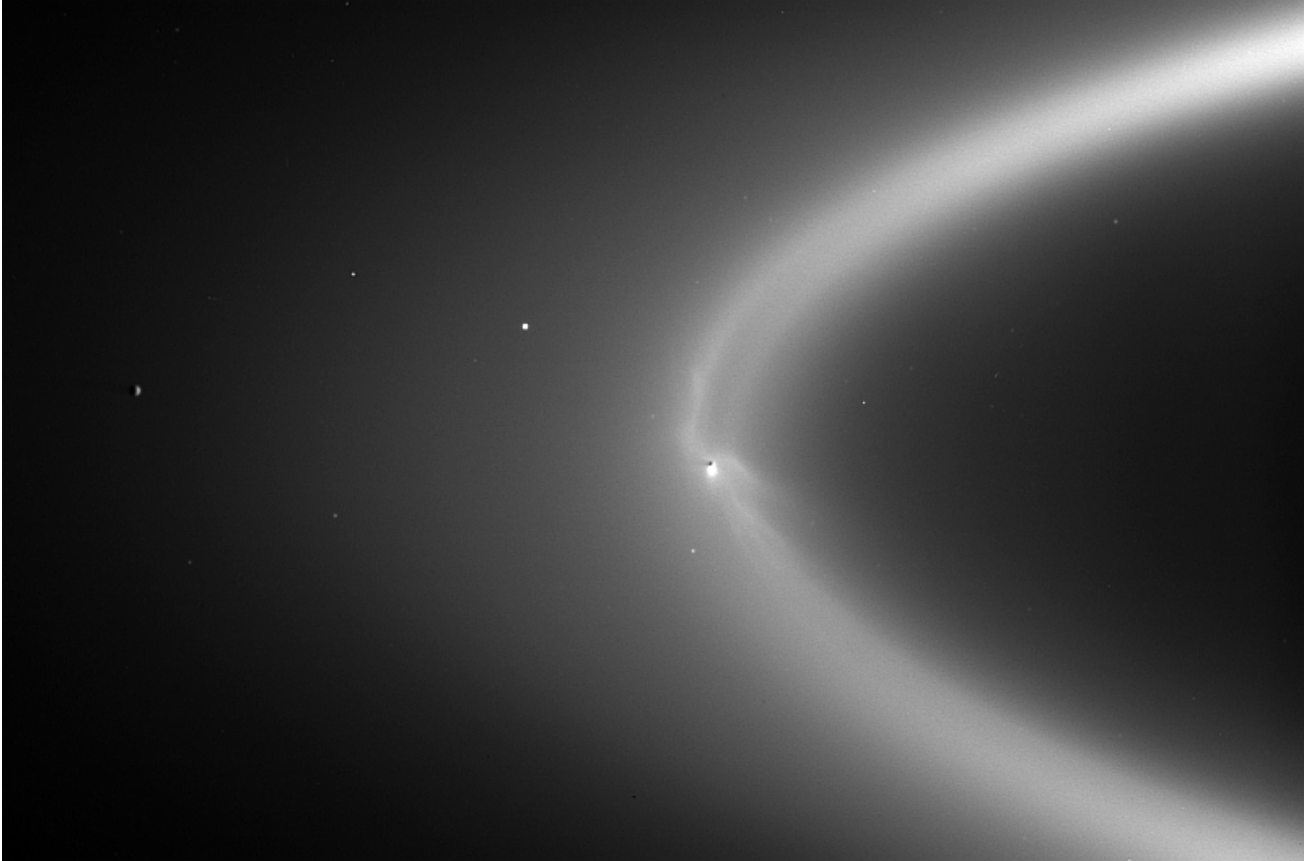
Längerbelichtete Aufnahmen des schwachen G-Rings (Cassini)

Zwischen dem G- und dem E-Ring befindet sich ein weiterer, extrem schwacher Ring, der erst im Jahre 2006 von der Sonde Cassini entdeckt wurde, als sie das Ringsystem quasi im Streulicht der vom Saturn verdeckten Sonne beobachten konnte. Er besteht aus mikroskopisch kleinen Eis- und Staubteilchen und steht in Verbindung mit den Bahnen der Saturnmonde Janus und Epimetheus. Auch im Bereich der Bahn des Mondes Pallene (ca. 4 km Durchmesser) befindet sich ein extrem schwacher Staubring mit einer radialen Ausdehnung von ca. 2500 km.

### E-Ring

Im Bereich der Bahn der Saturnmonde Mimas und Enceladus befindet sich ein weiterer äußerst schwacher (optische Dichte ca.  $10^{-6}$  bis  $10^{-7}$ ), jedoch sehr ausgedehnter Ring (Entfernung Innenkante 120700 km, Entfernung Außenkante  $\geq 420000$  km), der als E-Ring bezeichnet wird. Aus der Analyse des Streulichts sowie aus Messungen des HRD-Detektors („*High Rate Detector*“) von Cassini weiß man, daß er fast ausschließlich aus kleinen Eispartikeln im Größenbereich zwischen 0.3 und 2

Mikrometern besteht. Die Quelle für diese Teilchen ist der Mond Enceladus (Radius 249 km), der - eine der wichtigsten Entdeckungen der gesamten Cassini-Mission - einen aktiven Kryovulkanismus besitzt. So ist es nicht verwunderlich, daß der hellste Teil des Rings mit der Bahn von Enceladus zusammenfällt.



E-Ring und Enceladus. Man erkennt deutlich die von den Geysiren des Eismondes abgeblasenen Wolken aus Eiskristallen. Sie bilden entlang der Mondbahn den schwachen, aber ausgedehnten E-Ring

Seitdem man von der Existenz der Saturnringe Kenntnis hat, beschäftigen die Astronomen eine Vielzahl von damit zusammenhängenden Fragen, von denen einige hier kurz aufgeführt werden sollen. Ein Teil davon konnte mittlerweile bereits zufriedenstellend beantwortet werden. Andere sind noch offen und seitdem die Saturnsonde Cassini einen detaillierten Blick auf die Ringe wirft, ergeben sich neue Fragestellungen, deren Beantwortung die Forschung noch lange beschäftigen wird.

- § Aus was für Stoffen bestehen die Ringe?
- § Wie sind sie entstanden?
- § Warum hat sich die Ringmaterie im Laufe der Zeit nicht zu einem oder mehreren Monden verdichtet?
- § Was bestimmt die äußere Grenze eines Rings?
- § Was für einen Zusammenhang gibt es zwischen den Ringteilungen und den Bahnen der einzelnen Saturn-Monde?
- § Wie dick sind die Ringe und wie viel Masse beinhalten sie?

- § Sind Ringsysteme zeitlich stabile Objekte oder ist ihre Lebensdauer (wenn der Materialnachschub abreißt) begrenzt?
- § Wie bewegen sich die Ringpartikel? Folgen sie Keplerbahnen oder kommt es zu chaotischen Abweichungen mit der Tendenz zur Verklumpung? Welchen Einfluß haben die Saturnmonde auf die Bewegung der Ringteilchen?
- § Wie entstehen die auf Cassini-Aufnahmen sichtbaren wellenförmigen Strukturen in manchen Ringbereichen?
- § Was sind und wie entstehen die von Voyager entdeckten Spokes im zentralen Teil des B-Rings?

Die Saturnringe bestehen hauptsächlich aus Eis- und Gesteinsbrocken unterschiedlicher Größe sowie aus Staub. In den Hauptringen vermutet man einzelne Brocken bis zu einer Größe von maximal 100 Metern. Den größten Teil der Materie umfaßt jedoch Eisklumpen im Zentimeter-Bereich (vielleicht bis 1 Meter Größe), was auch das hohe Albedo des B- und A-Rings (0.65 und 0.60) erklärt. Hinweise auf die Existenz von Wassereis konnte übrigens bereits durch spektralfotometrische Untersuchungen im nahen Infrarotbereich von der Erde aus erbracht werden. Die schwachen Ringe dagegen bestehen – wie bei Jupiter - zum überwiegenden Teil aus mikrometergroßen Staubpartikeln bzw. Eiskristallen. Sie verraten sich dadurch, daß sie das einfallende Sonnenlicht überwiegend zurückstreuen.

Eine detaillierte Analyse der Zusammensetzung des Ringmaterials erfolgte in Form einer „Durchleuchtung“ mittels der Saturnsonde Cassini. Dabei wurden Funksignale unterschiedlicher Wellenlänge durch die Ringe gesandt und anschließend auf der Erde empfangen. Je nach Größe der Ringteilchen kam es dabei zu einer selektiven Absorption dieser Funkwellen, aus der sich Rückschlüsse sowohl auf das Material als auch auf die Partikelgrößen gewinnen lassen.

Lange Zeit nahm man an, daß die Saturnringe noch aus der Zeit der Entstehung unseres Planetensystems stammen. Dem steht jedoch der Fakt gegenüber, daß sie sehr hell erscheinen. Man hat vielmehr erwartet, daß die Ringteilchen im Laufe von Jahrtausenden Staubpartikel akkumulieren und damit immer dunkler werden (die Außenhaut alter Kometenkerne ist z.B. dunkler als Kohle). Da sie aber sehr viel Licht reflektieren, können sie nach Meinung einiger Planetologen höchstens einige Hundert Millionen Jahre alt sein. Dieser Befund ließ sich auch anhand von Daten, welche während der Cassini-Mission gesammelt wurden, im Wesentlichen bestätigen. Es ist deshalb bei weitem wahrscheinlicher, daß sich die Ringe z.B. durch Kometeneintrag (die ja zu einem großen Teil aus Eis bestehen) immer wieder erneuern. Das Eis einzelner Ringbereiche kann aber auch aus kryovulkanischen Prozessen stammen, wie man es beim Saturnmond Enceladus sehr gut beobachtet hat. Cassini fand bereits bei seinem ersten nahen Vorbeiflug an dem 1789 von WILHELM HERSCHEL (1738-1822) entdeckten Saturnmond Anzeichen für eine extrem dünne Wasserdampfatmosphäre. Später konnten auch die Quellen dieser Gashülle - die allein schon aufgrund der geringen Schwerkraft nicht dauerhaft sein kann - in Form von geysir-ähnlichen Fontänen identifiziert werden, die sich von der Oberfläche des Eismondes bis in eine Höhe von 500 km erheben.

Erstaunlich ist auch die geringe Dicke der Hauptringe. Sie beträgt höchstens einige Hundert Meter, ist aber wahrscheinlich noch bedeutend geringer (ungefähr 50 Meter, teilweise sogar nur 5-10 Meter). Nur die äußeren, optisch dünnen Ringe G und E erreichen eine vertikale Ausdehnung von einigen Hundert bis zu 1000 km. Die Abflachung einer ursprünglich ausgedehnten rotierenden Scheibe aus sehr vielen Einzelpartikeln ist ein komplizierter dynamischer Prozeß der viel damit zu tun hat, daß ein

physikalisches System immer den Zustand minimaler Energie einzunehmen bestrebt ist. Da die Teilchen aufgrund des 3. Keplerschen Gesetzes in unterschiedlichem radialem Abstand  $r$  zum Saturn verschiedene Umlaufgeschwindigkeiten  $v(r)$  besitzen, kommt es zu einem Effekt, den man als „keplerian shear“ bezeichnet. In dichten Ringbereichen können sich die Teilchen nicht mehr völlig frei bewegen, da sie öfters mit ihren Nachbarn zusammenstoßen und es somit zu einer Zufallskomponente  $\bar{v}$  in ihrer Geschwindigkeitsverteilung kommt. Dadurch sinkt die Orbitalgeschwindigkeit in einem Abstand  $r$  vom Planeten auf einen Wert unterhalb der Keplergeschwindigkeit (bezeichnet man mit  $\omega$  den Bahndrehimpuls, dann gilt etwa  $\omega \sim r^{-3/2}$ ) und die Ringmaterie verhält sich dynamisch wie ein zähes Medium. Die inelastischen Stöße der Ringpartikel untereinander bedingen demnach einen Impuls- und Energieaustausch, der umso effektiver ist, je größer die Zufallsgeschwindigkeiten  $\bar{v}$  und je größer die Partikeldichten (die man z.B. mittels der optischen Tiefe  $\tau$  beschreiben kann) sind. Konkret bedeutet das, daß bei kleiner optischer Tiefe die Zufallsgeschwindigkeiten in der Tendenz die Ringdicke erhöhen während es bei großer optischer Tiefe genau umgekehrt ist. Neben Stößen, dem Zerbrechen von Teilchen und der Anregung von Wellenphänomenen (z.B. Schallwellen) führt auch der Poynting-Robertson-Effekt zu einer Abnahme des Bahndrehimpulses. Teilchen, die auf diese Weise Impuls verlieren (d.h. abgebremst werden), müssen zwangsweise in Richtung Planeten fallen während Teilchen, die Impuls aufnehmen, entsprechend dem dritten Keplerschen Gesetz weiter nach außen wandern. Das Ergebnis dieser kollektiven Wechselwirkung ist, daß sich eine rotierende Partikelwolke im Laufe der Zeit immer weiter abflacht um (astronomisch gesehen) relativ rasch zu einer dünnen Scheibe zu zerfließen. Da dabei quasi Rotationsenergie verbraucht wird, der Gesamtdrehimpuls der Scheibe aber erhalten bleibt, wird sich die Scheibe unerbittlich ausbreiten und dabei immer dünner werden bis ein Quasi-Gleichgewichtszustand minimaler Rotationsenergie erreicht ist. In diesem Gleichgewichtsfall bewegen sich dann die Ringpartikel relativ autonom auf ihrer Bahn und es kommt nur noch selten zu Zusammenstößen. Dieser Sachverhalt läßt sich überprüfen, in dem man das Rotationsverhalten größerer Ringpartikel untersucht. Kommt es öfters zu Kollisionen, dann sollten die Ringteilchen relativ schnell um ihre eigene Achse rotieren. Treten dagegen Kollisionen seltener auf, dann werden im Ring die Teilchen überwiegen, deren Rotationsgeschwindigkeit eher gering ist. Die Idee ist, daß langsam rotierende Brocken einen meßbaren Temperaturunterschied zwischen der Seite, der von der Sonne beleuchtet wird und dem im Schatten liegenden Teil, aufweisen. Rotieren sie dagegen schnell, dann stellt sich eine für beide Seiten nahezu identische Gleichgewichtstemperatur ein. Die Messungen der Raumsonde Cassini bestätigen eindeutig den ersten Fall.

In optisch sehr dünnen Ringen spielen individuelle Kollisionen der meist nur Mikrometergroßen Partikel nur eine untergeordnete Rolle. Dort wird die Bewegung der extrem feinen Teilchen durch verschiedene und z.T. unterschiedlich wirkende Prozesse bestimmt. Wesentlich sind neben der Gravitation der Einfluß des Sonnenlichts (z.B. Strahlungsdruck) sowie elektromagnetische Kräfte, die mit der Wechselwirkung geladener Staubpartikel mit dem Magnetfeld des Planeten zu tun haben. Interessant in diesem Zusammenhang ist, daß diese Kräfte – gravitative und nichtgravitative – auf größere und kleinere Staubpartikel unterschiedlich wirken. Nur bei Teilchen mit Durchmessern im Mikrometerbereich heben sich diese Kräfte auf eine diffizile Art und Weise auf, so daß sich die Ringe stark ausbreiten können und trotzdem über größere Zeiträume (quasi-) stabil bleiben (der Nachschub von Staub oder von Wassereispartikeln muß natürlich gewährleistet sein).

Im Bereich der dichten inneren Ringe (bis G) findet man bei Saturn keine größeren Monde. Der Grund ist, daß diese Ringe innerhalb der Roche-Grenze liegen, wo die Gezeitenkräfte deren Entstehung und deren langfristige Existenz verhindern. Knapp außerhalb der Roche-Grenze gibt es jedoch eine Zone, wo kleine und zumeist unregelmäßig geformte Monde gemeinsam mit den Ringen vorkommen können, Beispiele dafür sind die Zwergmonde Pan, Atlas, Prometheus und Pandora, die für einige sonderbare Eigenschaften des A- und F-Rings verantwortlich sind.

Es zeigt sich, daß im Allgemeinen gerade die Monde einen wesentlichen Einfluß auf die Struktur und Dynamik der Ringe – ihre Aufspaltung in Ringlets und in die Entstehung der Ringlücken – haben. Sie beeinflussen die Ringstruktur durch

§ Bahnresonanzen

§ durch die Emission von Staub und Eis bzw. durch Aufsammeln und Binden von Staub

§ durch eine direkte Beeinflussung der Teilchenbahnen durch gravitative Störungsprozesse

Aus der Himmelsmechanik ist bekannt, daß die Wirkung der Schwerkraft durch Bahnresonanzen verstärkt werden kann. Derartige Resonanzen treten auf, wenn z.B. die Umlaufzeiten zweier Monde (oder Planetoiden) ein Verhältnis zweier ganzer Zahlen bilden. Diese Erscheinung wird als Kommensurabilität bezeichnet. Sie bewirkt, daß die Störungen, die beide Körper aufeinander ausüben, zu einem Resonanzeffekt führen. So gibt es z.B. im Planetoidengürtel zwischen Mars und Jupiter Bereiche, die – statistisch gesehen – nur von wenigen bis gar keinen Planetoiden besetzt sind. Diese nach dem amerikanischen Mathematiker DANIEL KIRKWOOD (1814-1895) benannten Lücken treten immer dort auf, wo die Umlaufzeiten der Planetoiden in einem einfachen Zahlenverhältnis zur Umlaufzeit Jupiters um die Sonne stehen (z.B. 1:2, 2:5 etc.). Dabei entstehen die stärksten Resonanzen dort, wo für die Umlaufzeiten ein Verhältnis der Form  $m=n+1$  (z.B. 2:1 oder 5:6) gilt. Ein Beispiel ist die Hekuba-Lücke, die der 1:2 –Resonanz mit Jupiter entspricht. Immer wenn Jupiter einmal um die Sonne gekreist ist, würde ein Planetoid innerhalb der Lücke zwei Umläufe absolvieren. Dabei kommt er Jupiter zweimal sehr nahe (Oppositionsstellung), wobei die dabei auftretenden Bahnstörungen langfristig den Planetoiden zum Verlassen der Resonanzzone zwingen würden. Den gleichen Vorgang beobachtet man auch bei den Saturnringen. Die Cassini-Teilung wird z.B. durch eine Kommensurabilität mit dem ca. 400 km großen Mond Mimas hervorgerufen. Die Ringteilchen an der Außenkante des B-Rings umkreisen den Saturn in etwa der halben Zeit als der Saturnmond Mimas. Man hat es hier also mit einer typischen 2:1 –Resonanz zu tun. Diese Resonanz bewirkt, das Ringteilchen systematisch aus der dazugehörigen Umlaufbahn entfernt werden, was die scharfe Außenkante des B-Rings erklärt. Teilchenbahnen an der Außenkante des A-Rings sind dagegen in einer 7:6-Resonanz mit den Monden Janus und Epimetheus (da hier zwei Monde beteiligt sind, spricht man auch von einer Laplace-Resonanz).

Was passiert nun physikalisch? Ringteilchen, Mond und Planet bilden ein System, das man nicht isoliert betrachten darf. Wenn sich ein Teilchen des Innenrings einem (äußeren) Mond nähert (was aufgrund der Resonanz periodisch erfolgt), wird es von diesem gravitativ angezogen und damit beschleunigt. Nach der Passage des Punktes des geringsten Abstandes verringert sich dessen Geschwindigkeit wieder bis die ursprüngliche Keplergeschwindigkeit erreicht wird. So wäre zumindest das Szenario, wenn das Ringteilchen nicht auch noch unter dem gravitativen Einfluß Saturns liegen würde. Durch die Annäherung an den Mond nimmt sowohl der Bahndrehimpuls als auch die

Bahnenergie ab was dazu führt, daß sich die Bahnform des Teilchens zunehmend von einer Kreisform in eine Ellipse umwandelt. Da das Teilchen aber im Laufe der Zeit mit anderen Ringteilchen kollidieren wird, ist diese Ellipsenform nicht dauerhaft. Sie nähert sich aufgrund dieser Dissipationsprozesse wieder einem Kreis an, aber diesmal – und das ist wesentlich – mit einem geringeren Durchmesser als vor der Wechselwirkung. Ein äußerer Mond ist also in der Lage, ein Ringteilchen nach innen hin in Richtung Saturn zu verschieben.

Im Endeffekt entsteht ein Gleichgewichtszustand, und zwar zwischen der Ausbreitungstendenz eines Ringes (Impulsumverteilung durch interne Kollisionen der Ringteilchen) und dem „Freifegen“ der Lücken durch die Wechselwirkung mit den Monden.

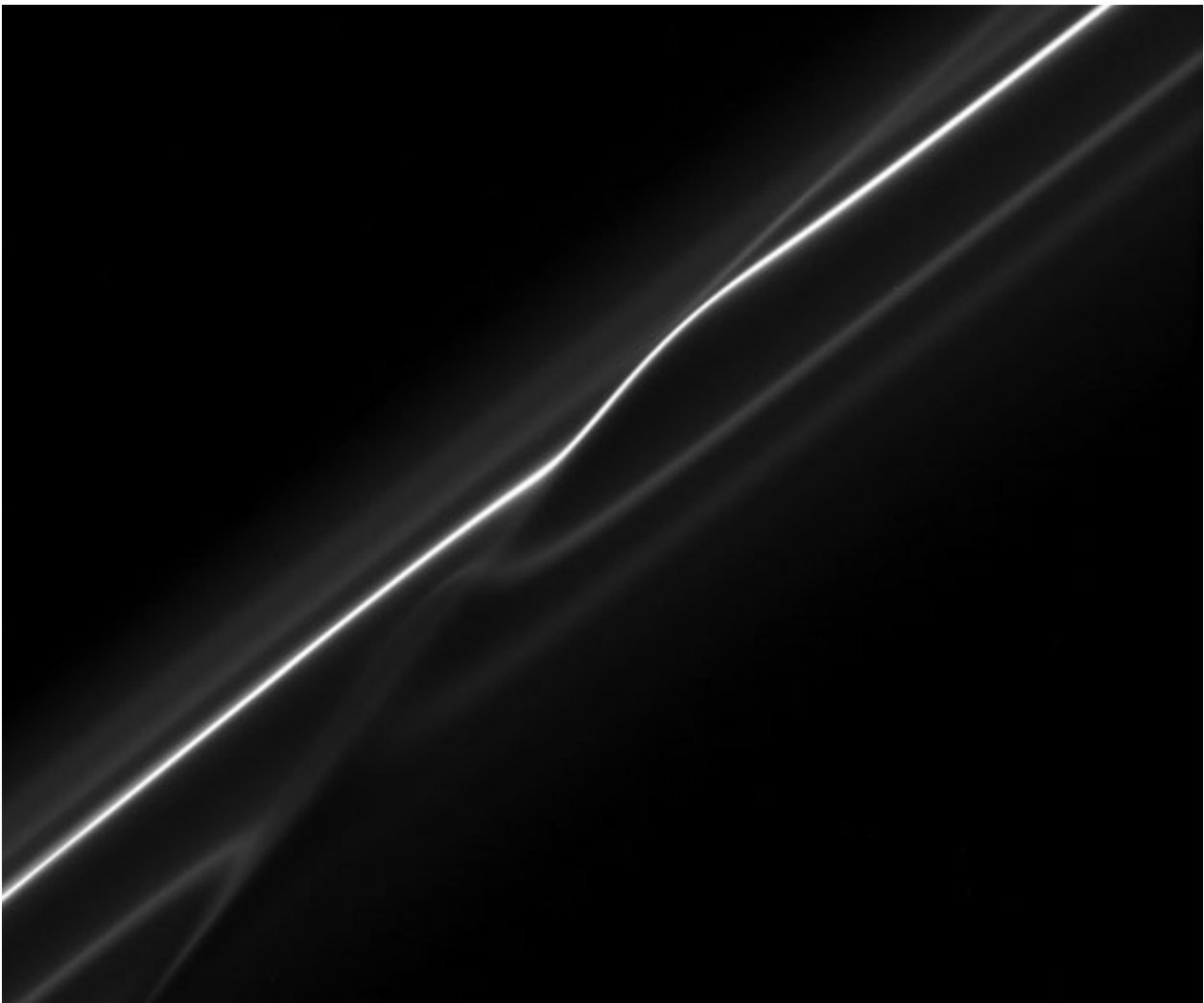


Diese spektakuläre Aufnahme zeigt die beiden Shepherd-Monde Pandora (links) und Prometheus (rechts). Pandora befindet sich außerhalb des feinen F-Rings. Die Gravitationskräfte beider Monde stabilisieren die Bahnen der feinen Ringpartikel. (Aufnahme Cassini)

Besonders interessant ist dieser Vorgang, wenn sich die Ringteilchen zwischen zwei kleinen Monden befinden. Das ist z.B. beim F-Ring der Fall und die Monde sind Prometheus (Größe 144 x 68 km) und Pandora (Größe 110 x 62 km). Prometheus läuft auf der Innenseite und Pandora außerhalb des F-Rings entlang, wobei ihre gemeinsame gravitative Wirkung den Ring zusammenhält. Wesentlich ist dabei, daß sie sehr klein sind und beide ungefähr die gleiche Masse haben. In der bildhaften Sprache der Astronomen verhalten sie sich wie zwei Schäferhunde, die eine Schafherde zusammentreiben. Deshalb werden derartige Mondpaare auch als „Shepherd Moons“ bezeichnet.

Da sich der innere Mond schneller bewegt als die Ringteilchen, besteht die Tendenz, daß er die in seiner Nähe befindlichen „mitzieht“, d.h. diese Ringteilchen gewinnen an Energie (ihr Bahnradius vergrößert sich). Der äußere Mond bewegt sich dagegen langsamer als die Ringteilchen, was den entgegengesetzten Effekt verursacht, d.h. er bremst die Ringteilchen in seiner Nähe ab (d.h. ihr Bahnradius verringert sich). Im Zusammenspiel dieser Wechselwirkungen werden durch Teilchenkollisionen im Ring die Geschwindigkeiten tendenziell wieder ausgemittelt was dazu führt, daß sich die Ringteilchen letztlich genau zwischen den beiden Mondbahnen konzentrieren. Das bedeutet, sie können diese Region nicht mehr verlassen. Sie sind darin quasi gefangen.

Der F-Ring selbst ist sehr kompliziert aufgebaut. Man findet in ihm bandartige Strukturen, Verdickungen und Verdrehungen, die auf gravitative Einflüsse der Saturnmunde sowie auf komplizierte elektromagnetische Wechselwirkungen mit dem Saturn-Magnetfeld und dem umgebenden Plasma hindeuten. Besonders hervorzuheben ist, daß er aus einem dichteren Kernbereich (z.T. verklumpt) und mehreren, um ihn herumgeschlungenen Staubbändern besteht. Auf Detailaufnahmen der Cassini-Sonde wirkt er deshalb teilweise schwadenhaft in Richtung der Bahn von Prometheus verbreitert.



Der F-Ring besteht aus vielen, z.T. gebogenen und deformierten Staubbändern (Cassini)

Aus der von den Voyager-Sonden gemessenen Streufunktion des vom Ring gestreuten Lichts konnte man bereits in den 80ziger Jahren ableiten, daß es sich bei dem Ringmaterial zum überwiegenden Teil um mikrometergroße silikatische Staubkörnchen handelt (wie die Jupiter-Ringe), die von der Oberfläche der begleitenden Shepherd-Monde stammen.

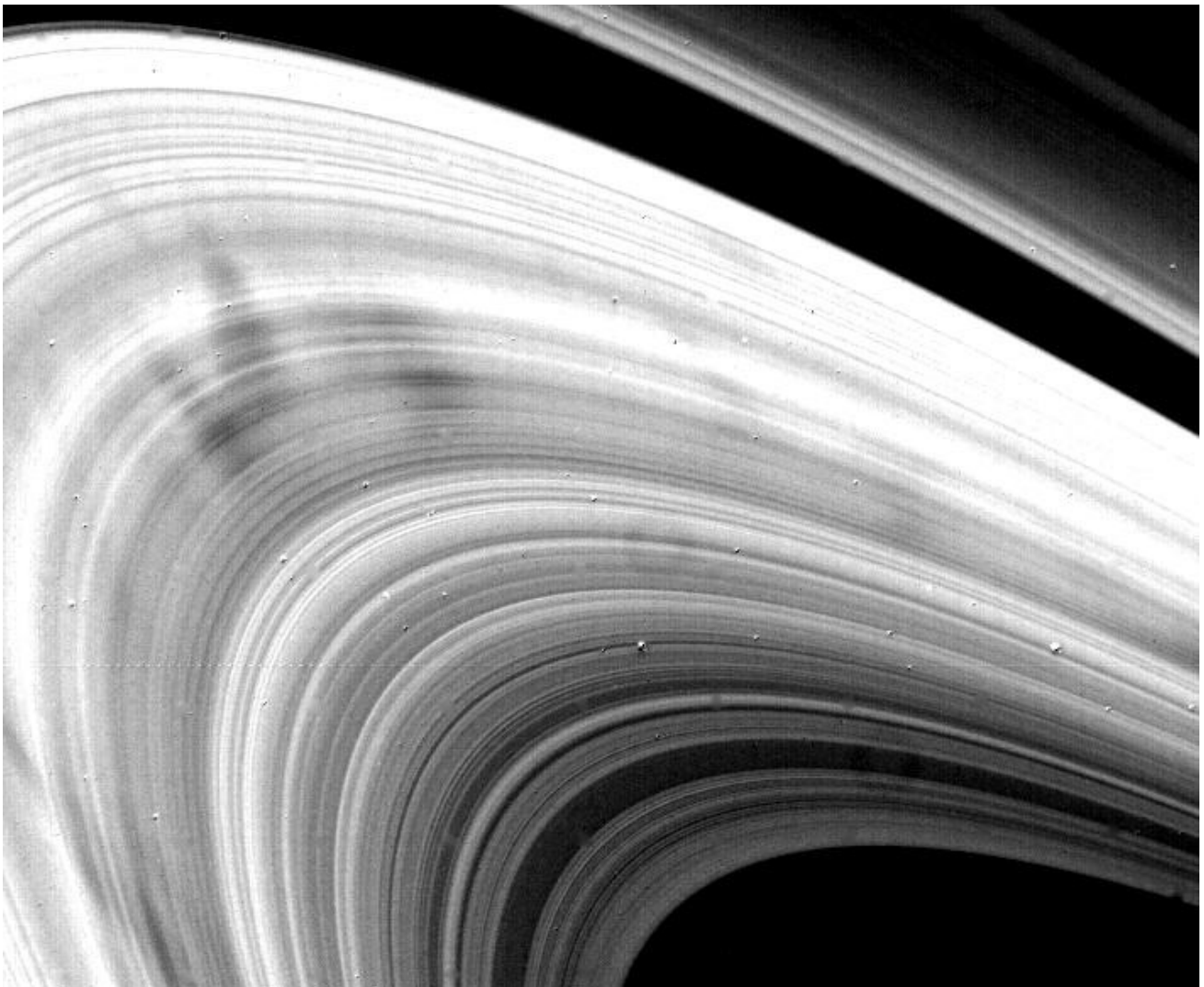
Mond	Dichte	Umlaufperiode
Pandora	700 kg/m <sup>3</sup>	0.6385 Tage
Prometheus	700 kg/m <sup>3</sup>	0.6130 Tage

Eine in diesem Zusammenhang wichtige und auch nicht ganz unerwartete Entdeckung betrifft eine neue Gruppe von Kleinkörpern mit einer Ausdehnung in der Größenordnung von 100 Metern, welche den Saturn in der Ringebene umkreisen. Da sie für „Monde“ nun wirklich zu klein sind, hat man für sie den Namen „Moonlets“ erfunden. Einige von ihnen konnten auf hochauflösenden Cassini-Aufnahmen des mittleren Bereichs des A-Rings ausgemacht werden. Aufgrund ihrer geringen Größe können sie im Ring keine durchgehenden Lücken erzeugen. Lediglich im Bereich ihrer Position im Ring sind lokale „Ausdünnungen“ nachzuweisen. Man schätzt, daß es im gesamten Ringsystem bis zu 10 Millionen dieser schwer zu beobachtenden Objekte geben kann. Die Auswirkungen von Resonanzen und gravitativen Störungen auf die Form der Ringe, wie sie von den Saturnmonden hervorgerufen werden, sind nach den Untersuchungen von Cassini außergewöhnlich vielfältig und deshalb auch Gegenstand intensiver Forschung. Bereits Voyager 2 hat zwei Dichtewellen im A-Ring entdeckt, wobei der Abstand zwischen diesen beiden Wellen rund 400 km betrug. Verursacht werden sie durch Störungen des Saturnmondes Mimas (Durchmesser knapp 400 km). Seine Gravitation lenkt die Teilchen im Ring auf eine bestimmte Art und Weise ab, wobei sich im Ring eine Reihe von dichten und weniger dichten Staubbänder ausbildet, die sich von der Störquelle in Form einer Longitudinalwelle wellenförmig - und zwar radial nach Außen in Richtung Mond - wegbewegen. Man erkennt das auf den Aufnahmen deutlich an der zunehmenden Amplitude und Wellenlänge der Wellenstrukturen in Richtung der Mondposition.

Von anderer Art sind die transversalen Biegewellen. Sie führen zu wellenförmigen Deformationen, deren Amplitude das 10 bis 100 fache der Ringstärke übersteigen kann. Man muß sich das so vorstellen, als ob der extrem flache Ring quasi ein spiralförmiges Wellblechmuster aufgeprägt bekommt. Im Detail konnten derartige Wellen, die Ringteilchen aus der Ringebene herausheben, jedoch erst von Cassini beobachtet werden. Sie entstehen immer dann, wenn ein Mond ober- oder unterhalb des Rings vorbeizieht. Im Gegensatz zu den spiralförmigen Dichtewellen laufen sie immer nach Innen, d.h. in Richtung Saturn, aus.

Ein anderes, von Cassini genauer untersuchtes Phänomen betrifft den innersten D-Ring. Sein Querschnitt erscheint im Gegensatz zu den anderen Hauptringen gebogen wie ein Welldach, wobei sich seit dem Voyager-Encounter die Struktur kontinuierlich verstärkt hat. Außerdem haben sich im Laufe der Zeit die Abstände von bestimmten Ringlets im Bereich des Rings verändert. Berechnungen zeigen (HEDMAN et.al. 2006), daß die Ausfurchung ihren Ausgang von einer kleinen Störung genommen haben muß, die ungefähr im Jahre 1984 aufgetreten ist. Als Ursache kommt ein Impakt eines mehrere Meter großen Kometenkerns in Frage.

Eine weitere überraschende Entdeckung der Wissenschaftler des Voyager-Projekts sind die sogenannten „spokes“ im B-Ring. Darunter versteht man speichenartige dunkle Strukturen, die im oberen Teil des B-Rings auftreten und in radialer Richtung eine Länge von bis zu 10000 km erreichen. Sie sind nach den Voyager-Beobachtungen sehr kurzlebig (30 Minuten bis 4 Stunden). Man vermutet, daß es sich dabei um Staubwolken handelt, die durch elektromagnetische Kräfte über die Ringflächen angehoben werden. Eine allgemein anerkannte Erklärung für dieses Phänomen gibt es noch nicht. Es kristallisiert sich aber immer mehr heraus, daß es sich hier um eine komplizierte Wechselwirkung zwischen aufgeladenen mikrometergroßen Staubteilchen und dem im Magnetfeld Saturns eingeschlossenen Gas handelt. Eine neue Erklärung dafür, wie es zu der elektrostatischen Aufladung der Staubteilchen kommt, stammt von deutschen Wissenschaftlern vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (G.JONES, 2006). Sie vermuten, daß die primäre Ursache gewaltige elektrische Entladungen („Blitze“) in der Saturnatmosphäre sind. Dabei sollen Elektronenströme entstehen, welche entlang der Magnetfeldlinien die Ringe durchqueren und dabei den dort vorhandenen Staub elektrisch aufladen. Da sich Ladungen gleichen Vorzeichens abstoßen, erhebt sich der Staub über die Ringebene und es entstehen die unter bestimmten Sichtwinkeln gut sichtbaren dunklen Schlieren über dem hellen B-Ring.



Im B-Ring treten sogenannte „spokes“ auf, die als dunkle Schatten auf den hellen Ringbereichen erscheinen

Diese Erklärung ist aber noch eine reine Hypothese, da noch nicht einmal bekannt ist, wie in der Saturnatmosphäre die postulierten Entladungen respektive Gewitter entstehen sollen. Auf jeden Fall handelt es sich bei den „Spokes“ um ein sehr komplexes Phänomen, dessen Deutung noch viel Forschungsarbeit erfordert.

Spokeartige Strukturen hat man übrigens auch (nachträglich) auf Saturnzeichnungen, die Ende des 19. Jahrhunderts angefertigt wurden, entdeckt...

Durch die Einwirkung der solaren UV-Strahlung auf die Wassereisteilchen der Ringe werden beständig Wassermoleküle freigesetzt, die dissoziiert zu einer „Ringatmosphäre“ aus Sauerstoffmolekülen führen (der leichte Wasserstoff entweicht zum größten Teil in den Weltraum). Diese unerwartete Entdeckung gelang im Jahre 2006 mit zwei Instrumenten an Bord der Raumsonde Cassini: dem Ionen- und neutralen Massenspektrometer („*Ion and Neutral Mass Spectrometer*“, INMS) und dem Cassini Plasmaspektrometer (CAPS). Die dichten Bereiche der Saturnringe sind demnach in eine ähnlich dichte „Gashülle“ eingebettet, wie der Mond Enceladus.

## Magnetfeld

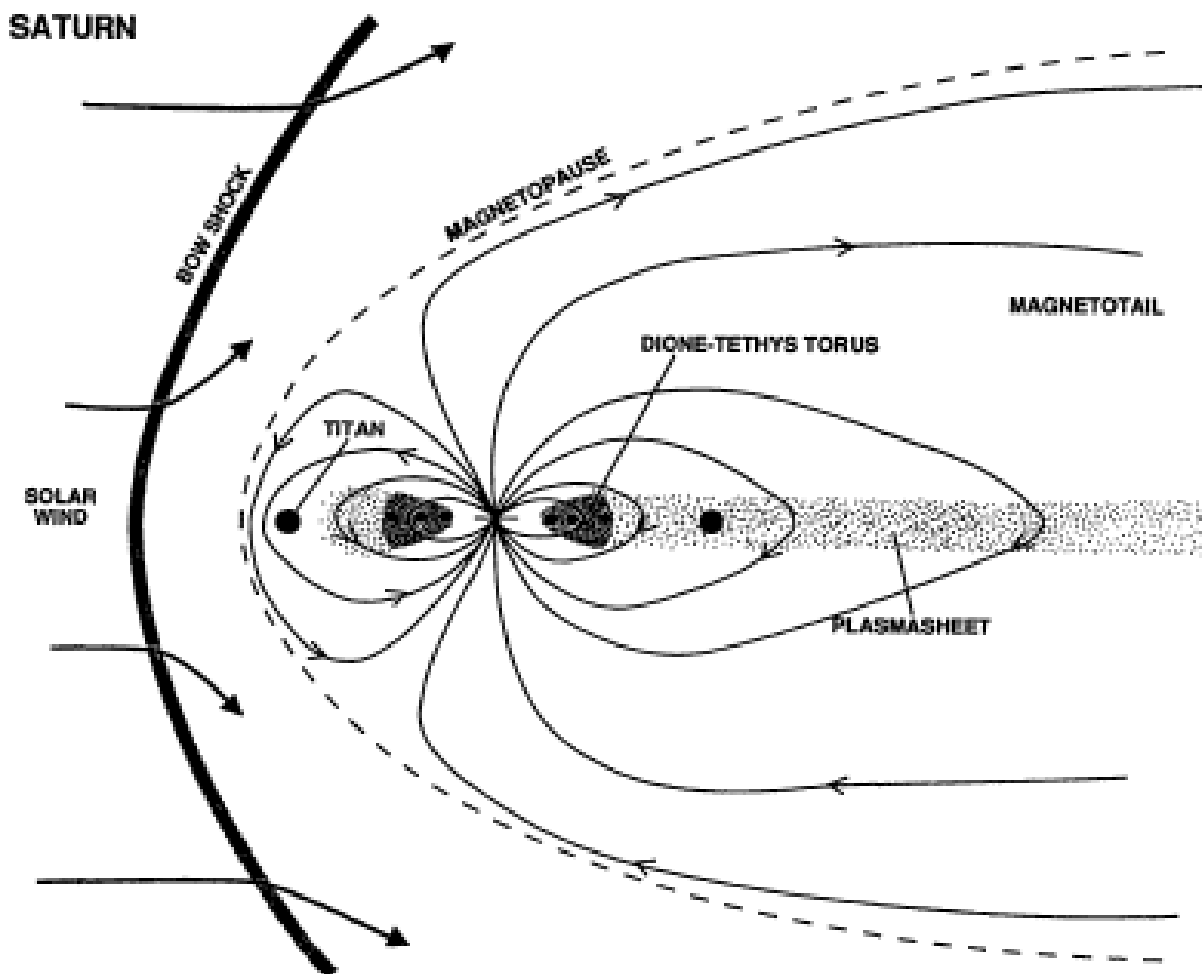
Die Stärke des Magnetfeldes von Saturn ist deutlich geringer als das von Jupiter. Im Gegensatz zum Jupiter fällt die Achse des fast idealen Dipolfeldes genau mit der Rotationsachse zusammen. Die magnetische Feldstärke über dem Äquator von Saturn hat einen Wert von etwa  $2 \times 10^{-5}$  T (ist also etwas geringer als bei der Erde ( $3 \times 10^{-5}$  T)) während das erzeugende magnetische Moment ca. 550-mal größer als das der Erde ist.

Oberhalb der Wolkendecke von Saturn hat sich eine Ionosphäre herausgebildet, deren (kinetische) Temperatur in der Größenordnung von 1000 K sein dürfte.

Die Größe bzw. Ausdehnung der Magnetosphäre beträgt nur etwa 1/5 von Jupiter. Die Stoßfront, wo der Sonnenwind mit dem Magnetfeld in Wechselwirkung tritt, befindet sich in ca. 25 bis 30 Saturnradien ( $R_{Sat}$ ) Entfernung, wobei dieser Abstand wie bei Jupiter mit der Sonnenaktivität variiert. Die sich daran anschließende Magnetopause liegt in rund 20  $R_{Sat}$  Abstand (wiederum von der Vorderseite des Planeten gemessen), also unter normalen Bedingungen knapp außerhalb der Bahn des Mondes Titan. Zur Zeit des Maximums der Sonnenaktivität kann sich die Magnetopause sogar bis innerhalb der Titan-Bahn zurückziehen und der Mond gerät direkt in den Bereich des einfließenden Sonnenwindplasmas.

Saturn besitzt mehrere Strahlungsgürtel. Ihre Dynamik und ihre Physik wird maßgeblich von den größeren inneren Monden (z.B. Rhea, Mimas, Dione Tethys) und vom Saturnring beeinflusst. Die in den Strahlungsgürtel eingefangenen Elektronen, Protonen und Ionen werden beispielsweise von den Monden und den Ringpartikeln absorbiert, wenn sie auf deren Oberfläche auftreffen. Andererseits schlagen sie aus dem Oberflächenmaterial Teilchen heraus, welche die Teilchenpopulation im Strahlungsgürtel verstärken. In einer Entfernung von ca. 3  $R_{Sat}$  findet man eine erhöhte Konzentration von  $O^+$ -Ionen und weiter außen von Protonen. Sie werden offensichtlich durch energiereiche Strahlung aus der Oberfläche der inneren Eismonde herausgeschlagen in einem Prozeß, den man als

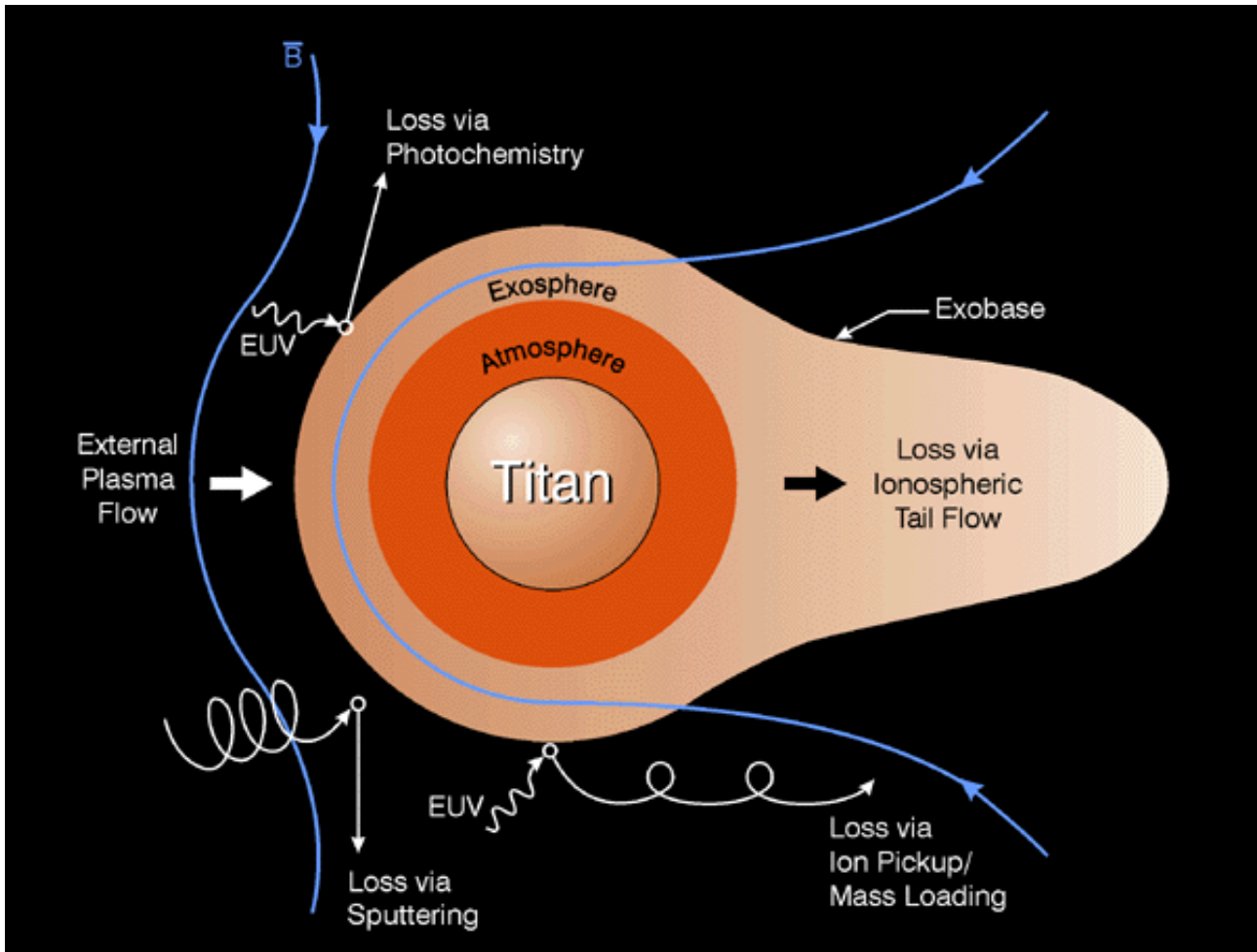
„*surface sputtering*“ bezeichnet. Diese Ionen bilden eine Plasmascheibe, die synchron mit dem Magnetfeld von Saturn mitrotiert und die bis fast zur Titanbahn reicht. Der äußere Strahlungsgürtel wird dagegen aus Teilchen aus der oberen Atmosphäre und Ionosphäre des Titan – des größten Saturnmondes – gespeist. Sie enthält deshalb neben Wasserstoffionen auch Stickstoffionen. Die Prozesse, welche bei der Wechselwirkung zwischen dem im Strahlungsgürtel eingebetteten Gastorus mit dem Saturnmond Titan stattfinden, sind äußerst interessant. Dieser Gasschlauch, der im Bereich der Titanbahn einen Durchmesser von  $\sim 14 R_{Sat}$  hat, beginnt etwa bei  $8 R_{Sat}$  und endet bei  $25 R_{Sat}$  und enthält überwiegend Wasserstoffgas, welches sich durch die charakteristische Lyman- $\alpha$ -Strahlung nachweisen läßt. Die mittlere Teilchendichte liegt bei  $10 - 20 \text{ cm}^{-3}$ .



### Aufbau der Magnetosphäre des Saturns

Titan ist mit einem Durchmesser von 5150 km der zweitgrößte Mond im Sonnensystem. Ungewöhnlich ist, daß er eine sehr dichte Stickstoff-Atmosphäre besitzt, die reich an Kohlenwasserstoffen ist. Der Oberflächendruck beträgt etwa 1.5 bar und ist damit höher als der Atmosphärendruck auf der Erdoberfläche. Voyager 1 hat außerdem eine Ionosphäre entdeckt (auf der Tagseite zu einem großen Teil durch die extreme UV-Strahlung der Sonne verursacht), die in einer Höhe von rund 1200 km eine Elektronendichte von  $2400 \text{ cm}^{-3}$  aufweist. In 1900 km Höhe schließt sich als Grenzfläche die Ionopause an, wo sich der Ionosphärendruck mit dem Druck des aus der Magnetosphäre anfließenden Plasmas im Gleichgewicht befindet. Sie kann aber nicht verhindern, das

Plasma aus dem Strahlungsgürtel in die Ionosphäre und die darunter liegende Atmosphäre eindringt und dort neutrale Atome und Moleküle ionisiert. Gerade deshalb ist diese Grenzschicht gleich in mehrfacher Hinsicht interessant und wird gegenwärtig (2005) durch die Raumsonde Cassini intensiv erforscht. Weiterhin muß man bedenken, das Titan auf seiner Umlaufbahn ständig von Magnetosphärenplasma sowie von dem im Gasterus vorhandenen Neutralgas umströmt wird, da er sich langsamer bewegt als die mit dem Saturnmagnetfeld korotierende Gasscheibe. Zusätzlich ist noch zu erwähnen, das Titan kein eigenes oder zumindest kein durch die Voyager-Sonden nachweisbares Magnetfeld besitzt.



### Aufbau der Ionosphäre des Saturnmondes Titan

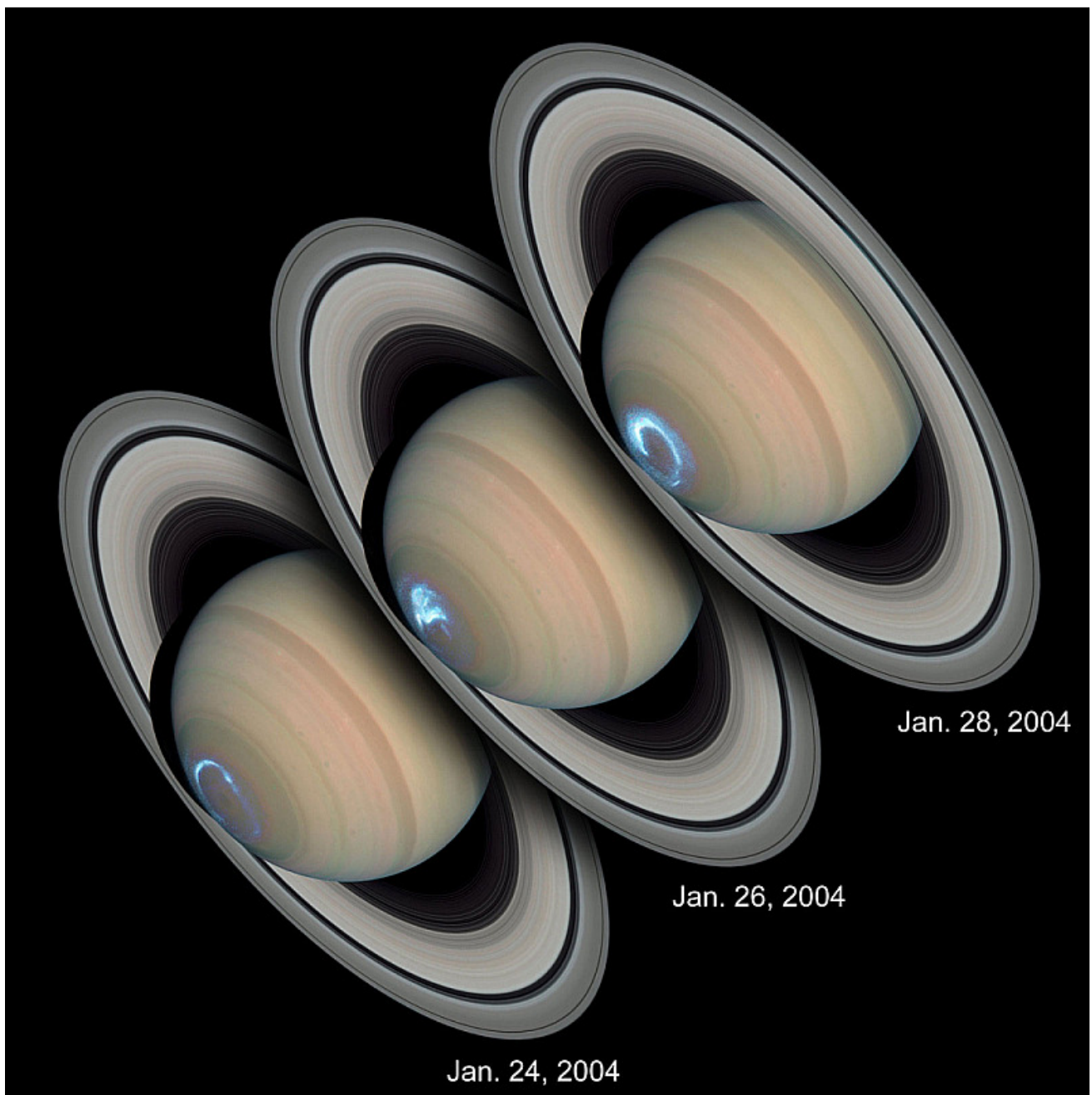
Als Ergebnis dieser Wechselwirkung werden die Magnetfeldlinien in der Titan-Ionosphäre abgebremst und zurückgehalten. Die Magnetfeldlinien legen sich quasi um den Mond und bilden in Bewegungsrichtung einen magnetischen Schweif, in dem sich die mitgerissenen Ionen ansammeln und später an den Torus freigegeben werden. Aber auch neutrale Gasteilchen können gemäß der Jeans-Gleichung die oberen Atmosphärenschichten verlassen und bilden eine weitere Teilchenquelle.

Da sich Titan nahe der Magnetopause bewegt, sind die physikalischen Wechselwirkungsvorgänge stark von der Intensität des einfließenden Sonnenwindes abhängig. Immer wenn er den subsolaren Punkt seiner Bahn erreicht, gelangt er in die Nähe dieser Schicht oder – bei erhöhter Sonnenaktivität – durchstößt er sie sogar und taucht in den turbulenten Bereich des Magneto-sheath bzw. direkt in den

Sonnenwind ein. Die dabei entstehenden Phänomene werden z.Z. in aufwendigen Computersimulationen untersucht. Noch detailliertere Erkenntnisse erhofft man sich aus den Ergebnissen der Cassini-Mission, die im Jahre 2004 mit ihren Meßkampagnen beim Saturn begonnen hat.

Gerade im Fall vom Saturn ist es eine interessante Frage, welchen Einfluß eigentlich das Ringsystem auf die innere Magnetosphäre hat. Die Ringe stellen Barrieren im innersten Strahlungsgürtel dar. Sie filtern quasi alle geladenen Teilchen aus dem Magnetfeld heraus. Deshalb ist die Konzentration an geladenen Partikeln in diesem Bereich auch unmeßbar klein. Die Magnetosphäre im Bereich der Ringe ist in dieser Hinsicht so gut wie leer. Es existiert lediglich eine dünnen Wolke aus Sauerstoffmolekülen, die aus dem Ringmaterial freigesetzt werden.

In der Saturn-Magnetosphäre gibt es weitere schmale Regionen, in denen die Elektronen- und Ionenkonzentration äußerst gering ist. Sie fallen mit den Bahnen einiger innerer Monde zusammen.



**Daten****BAHNPARAMETER**

Große Halbachse ( $10^6$ km)	1433.53
Umlaufszeit (siderisch) in Tagen	10759.22
Umlaufszeit (tropisch) in Tagen	10746.94
Perihelabstand ( $10^6$ km)	1352.55
Aphelabstand ( $10^6$ km)	1514.50
Mittlere Bahngeschwindigkeit (km/s)	9.69
Max. Bahngeschwindigkeit (km/s)	10.18
Min. Bahngeschwindigkeit (km/s)	9.09
Bahnneigung (Grad)	2.485
Numerische Exzentrizität	0.0565
Sidereale Rotationsperiode (Stunden)	10.656
Länge eines Tages (Stunden)	10.656

**PLANETENPARAMETER**

Masse ( $10^{24}$ kg)	568.46
Volumen ( $10^{10}$ km <sup>3</sup> )	82713
Äquatorradius (km) 1 bar Niveau	60268
Polradius (km) 1 bar Niveau	54364
Abplattung	0.09796
Mittlere Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	687
Schwerebeschleunigung (m/s <sup>2</sup> ) 1 bar Niveau	10.44
Entweichgeschwindigkeit (km/s)	35.5
Albedo	0.342
Geometrisches Albedo	0.47
Solarkonstante (W/m <sup>2</sup> )	14.90
Strahlungstemperatur (K)	81.1

**ATMOSPHERE**

Dichte bei p=1 bar (kg/m <sup>3</sup> )	~0.19
Skalenhöhe (km)	59.5
Temperatur bei p=1 bar (K)	~134
Mittleres Molekulargewicht (g/mol)	2.07

# Uranus



Der Planet Uranus bietet keinen aufregenden Anblick in einem Fernrohr. Er erscheint im Okular als winzig kleines bläulichgrünes Scheibchen von maximal 4.6“ Durchmesser ohne irgendwelche Struktur. Zwar erreicht er mit 5<sup>m</sup>.5 eine Helligkeit, wo er unter günstigen Bedingungen gerade noch mit dem freien Auge auffindbar ist. Trotzdem war er den Astronomen der Antike bis zu seiner Entdeckung durch WILHELM HERSCHEL völlig unbekannt.

FRIEDRICH WILHELM HERSCHEL (1738-1822) war einer der berühmtesten Astronomen seiner Zeit. Von Beruf Musiker (er wurde am 15.11.1738 in Hannover geboren, ging dann später aus politischen Gründen nach England wo er von 1788 an bis zu seinem Tod am 25.8.1822 in Slough bei Windsor lebte) beschäftigte er sich als Dreißigjähriger neben seiner Tätigkeit als Organist sehr intensiv mit dem Bau von Spiegelteleskopen. Diese Teleskope waren zu seiner Zeit sehr begehrt und haben in Europa

weite Verbreitung gefunden. Im Gegensatz zu heutigen Spiegelteleskopen bestand ihre Optik aus geschliffenen und polierten Metallspiegeln, die er aus einer speziellen Bronzelegierung hergestellt hat.

HERSCHEL'S große Stunde schlug am Abend des 13. März 1781, als er im Sternbild Zwillinge beim Versuch Fixsternparallaxen zu messen, auf ein scheibchenförmiges Objekt stieß, welches sich später als ein neuer Planet weit hinter der Saturnbahn entpuppen sollte. Durch diese Entdeckung wurde er schnell auch außerhalb der wissenschaftlichen Community bekannt und berühmt. Zu Ehren seines Herrn und Gönners König GEORG III von England (1738-1820) nannte er diesen neuen Planeten „Georgium sidus“. JOHANN ELERT BODE (1747-1826) in Berlin war so begeistert, daß er von der „wichtigsten Entdeckung unter allen, die jemals am Himmel gemacht wurden“ sprach. Nur der vorgeschlagene Name paßte ihm nicht. Er schlug deshalb für Herschel's „Georgssterne“ in Fortführung der alten Tradition den Namen „Uranus“ vor und so blieb es dann auch bis heute (die Logik ergibt sich daraus, daß – gemäß der „römischen Form“ der griechischen Mythologie – Jupiters Vater Saturn und Saturns Vater Uranus war).

1787 entdeckte HERSCHEL noch die beiden Uranus-Monde Titania und Oberon. Weitere Monde fanden 1851 WILLIAM LASSELL (1799-1880, Umbriel und Ariel) und 1948 wurde schließlich „Miranda“ durch GERARD P. KUIPER (1905-1973) entdeckt. Heute (2005) sind insgesamt 27 Uranus-Satelliten bekannt. Sie sind übrigens alle nach Personen aus WILLIAM SHAKESPEARE'S Dramen und ALEXANDER POPE'S literarischen Werk benannt.

Aufgrund dieser Entdeckungen konnte sich HERSCHEL nun hauptberuflich der Astronomie widmen. 1816 hat man ihn geadelt. Seine Schwester KAROLINE HERSCHEL (1750-1848) wurde durch die Entdeckung von 8 Kometen bekannt (nach ihr ist der Planetoid „Lucretia“ benannt) und sein Sohn JOHN FREDERICK WILLIAM HERSCHEL (1792-1871) setzte die Beobachtungen seines Vaters am Südhimmel fort.

Wie sich nachträglich herausstellte, wurde Uranus bereits vor HERSCHEL beobachtet, aber nicht als Planet erkannt. Er konnte z.B. in den Aufzeichnungen so berühmter Astronomen wie JOHN FLAMSTEED (1646-1719), JAMES BRADLEY (1692-1762), TOBIAS MAYER (1723-1762) und PIERRE CHARLES LEMONNIER (1715-1799, der ihn 1756 in eine seiner Sternkarten einzeichnete) nachgewiesen werden.

Neben seiner Bahn und ungefähren Größe war über Uranus lange Zeit nur recht wenig bekannt. Spektroskopisch ließen sich starke Absorptionsbanden von Methan im roten Teil des Spektrums nachweisen. Sie bewirken, daß der Planet im Fernrohr in einer blaugrünen Farbe erscheint. Genauere Daten über die physische Beschaffenheit dieses Planeten konnten jedoch erst 1986 beim Vorbeiflug von Voyager 2 ermittelt werden.

## Allgemeines

Uranus bildet zusammen mit Neptun die Gruppe der Großplaneten. Seine siderische Umlaufzeit liegt bei 83,75 Jahren. Die Exzentrizität seiner Bahn beträgt 0,0462, so daß sein Sonnenabstand zwischen den beiden Extremwerten 18,33 AU (Perihel) und 20,11 AU (Aphel) schwankt. Ein Kuriosum, welches noch seiner Erklärung harret, ist die Tatsache, daß die Rotationsachse des Planeten fast in der Ebene liegt, die durch seine Bahn um die Sonne vorgegeben ist (genauer, sie ist nur rund 8° gegen die



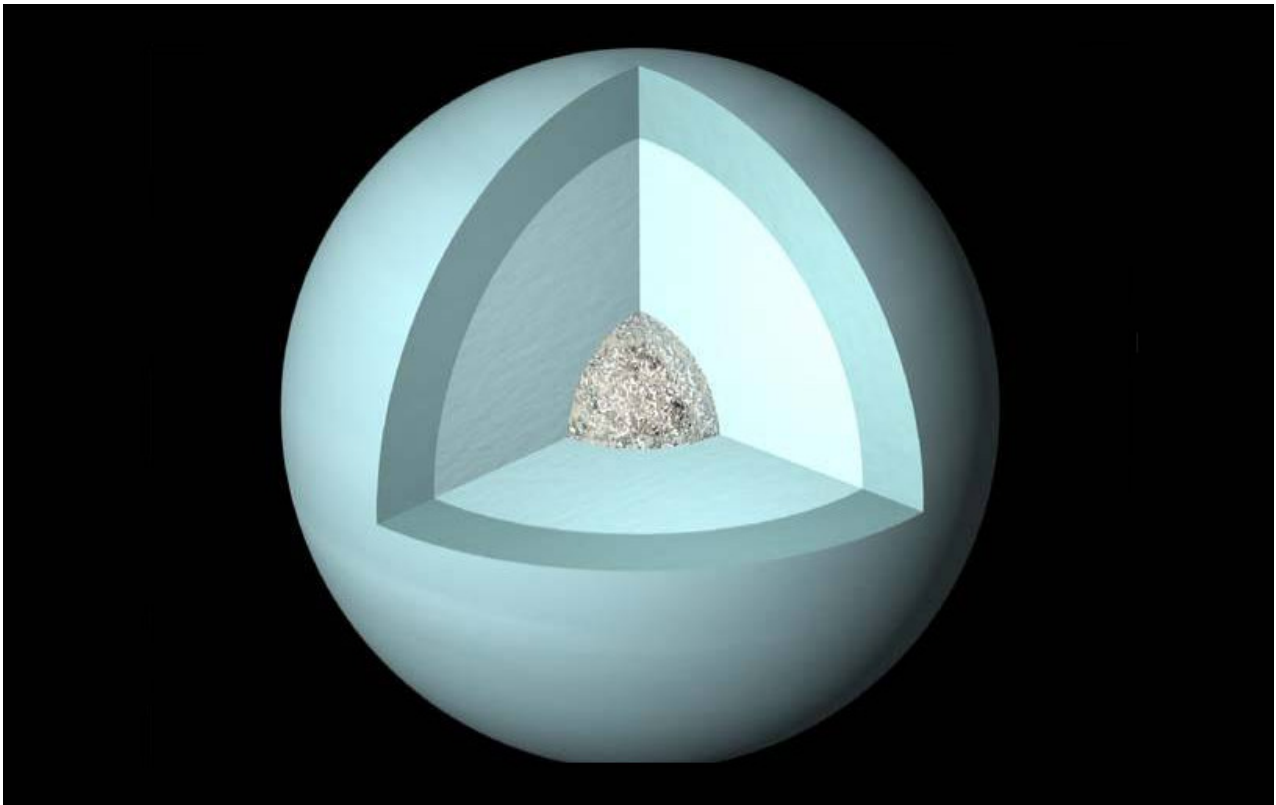
## Innerer Aufbau

Der innere Aufbau der Großplaneten Uranus und Neptun unterscheidet sich stark von dem der Riesenplaneten Jupiter und Saturn. Das ist auch zu erwarten, da sie eine geringere Masse, eine andere chemische Zusammensetzung und eine größere mittlere Dichte als Jupiter und Saturn besitzen. Gerade aufgrund ihrer geringeren Masse sind sie z.B. nicht in der Lage, die physikalischen Bedingungen in ihrem tiefen Inneren aufzubauen, die zur Ausbildung einer Schale von metallischem Wasserstoff notwendig sind. Aus der vergleichsweise großen mittleren Dichte und aus der Abplattung des Uranus (0.0229) läßt sich weiter folgern, daß er einen relativ großen Kern (etwa Erdgröße) aus Metallen und Silikaten besitzen muß. Darüber erstreckt sich ein ausgedehnter Mantel aus festen bzw. flüssigen Wasser (56 %) welches nach modernen Modellvorstellungen als weitere Beimengungen u.a. Methan ( $CH_4$ , ca. 36%) und Ammoniak ( $NH_3$ , ca. 8%) enthält. Diese Schicht ist für den Planetologen besonders interessant, weil darin Prozesse ablaufen, die für die Entstehung und Aufrechterhaltung des von Voyager 2 entdeckten Magnetfeldes (Stärke ca.  $23 \cdot 10^{-6}$  Tesla) verantwortlich sind. Nach der Dynamo-Theorie ist dazu eine gewisse elektrische Leitfähigkeit in der Größenordnung von  $10 \Omega^{-1} cm^{-1}$  notwendig, die von den in der Schicht enthaltenen Ionen aufgebracht werden muß. Der Druck- und Temperaturbereich, in der sich diese Schicht erstreckt, verläuft zwischen ca. 20 GPa und  $T=2000$  K an der Obergrenze bis zu ca. 600 GPa und  $T=7000$  K an der Obergrenze der Kernzone. Das „Eis“ befindet sich daher in einem dichten überhitzten Zustand, wo viele Moleküle dissoziiert vorliegen was dazu führt, daß es sich physikalisch eher wie eine Salzschnmelze als eine Flüssigkeit oder Festkörper verhält. In Schockwellenexperimenten hat man auf der Erde versucht, die genauen physikalischen Eigenschaften von derartigen Stoffgemischen („synthetischer Uranus“) unter hohem Druck zu ergründen. Dabei konnte zumindest der theoretisch erwartete Dichtesprung bei einem Druck von ca. 600 GPa bestätigt werden.

Einige Modellrechnungen gehen sogar davon aus, daß an der Kern-Mantelgrenze das Wasser-Ammoniak-Gemisch bei einem Druck von mehr als 600 GPa aufgrund des eingelagerten Wasserstoffs einen spezifisch metallischen Zustand ausbildet und damit leitfähig wird. Da es jedoch so gut wie keine Erkenntnisse über das Hochdruckverhalten von Stoffen und Lösungen in dem hier betrachteten Wertebereich gibt (hier wären insbesondere realistische Zustandsgleichungen und Phasendiagramme interessant) und auch der Temperatur- und Druckverlauf im Planeteninnern hochgradig hypothetisch ist, lassen sich verlässliche Angaben, die über einen groben Überblick hinausgehen, kaum machen.

Oberhalb der „Eis“-Schicht beginnt die zuerst flüssige, dann gasförmige Wasserstoff-Helium-Atmosphäre die als weitere wichtige Gase Wasserdampf, Methan, Äthan, Azetylen und Neon enthält. Wasserstoff liegt dabei ausschließlich in molekularer Form und Helium atomar vor. Diese Schicht nimmt etwa ein Drittel des Planetenradius ein und beginnt in etwa in einem Abstand von 0.8 Uranus-Radien bei einem Druck von 30 GPa und einer Temperatur von ca. 3000 K. Nach Modellrechnungen, die mit den von Voyager 2 gemessenen Gravitationsfeldparametern koinzidieren, tritt an dieser Stelle ein fast abrupter Dichtesprung auf einen Wert von  $1000 \text{ kg m}^{-3}$  auf. Der gesamte Masseanteil der leichten Gase Wasserstoff und Helium liegt in der Größenordnung von lediglich 2 Erdmassen was verglichen mit Jupiter (ca. 300 Erdmassen) zwar sehr gering, aber für die Großplaneten typisch ist.

Ein gewisses mediales Interesse haben 1999 die Experimente von ROBIN BENBEDETTI an der Universität Berkeley (Kalifornien) hervorgerufen. Sie hatte bei Hochdruckexperimenten mit Gasmischen, die Methan in etwa der Konzentration enthielten, wie man sie auch in den Atmosphären der Großplaneten erwartet, die Bildung von reinem Kohlenstoff in Form von Diamanten beobachtet. Daraus wurde die Schlußfolgerung gezogen, daß in diesen Planeten unter gewissen Umständen „Diamanten“ ausregnen können und zwar in Analogie zu irdischen Hagelgewittern. Ob es wirklich so ist, kann jedoch heute niemand sagen.



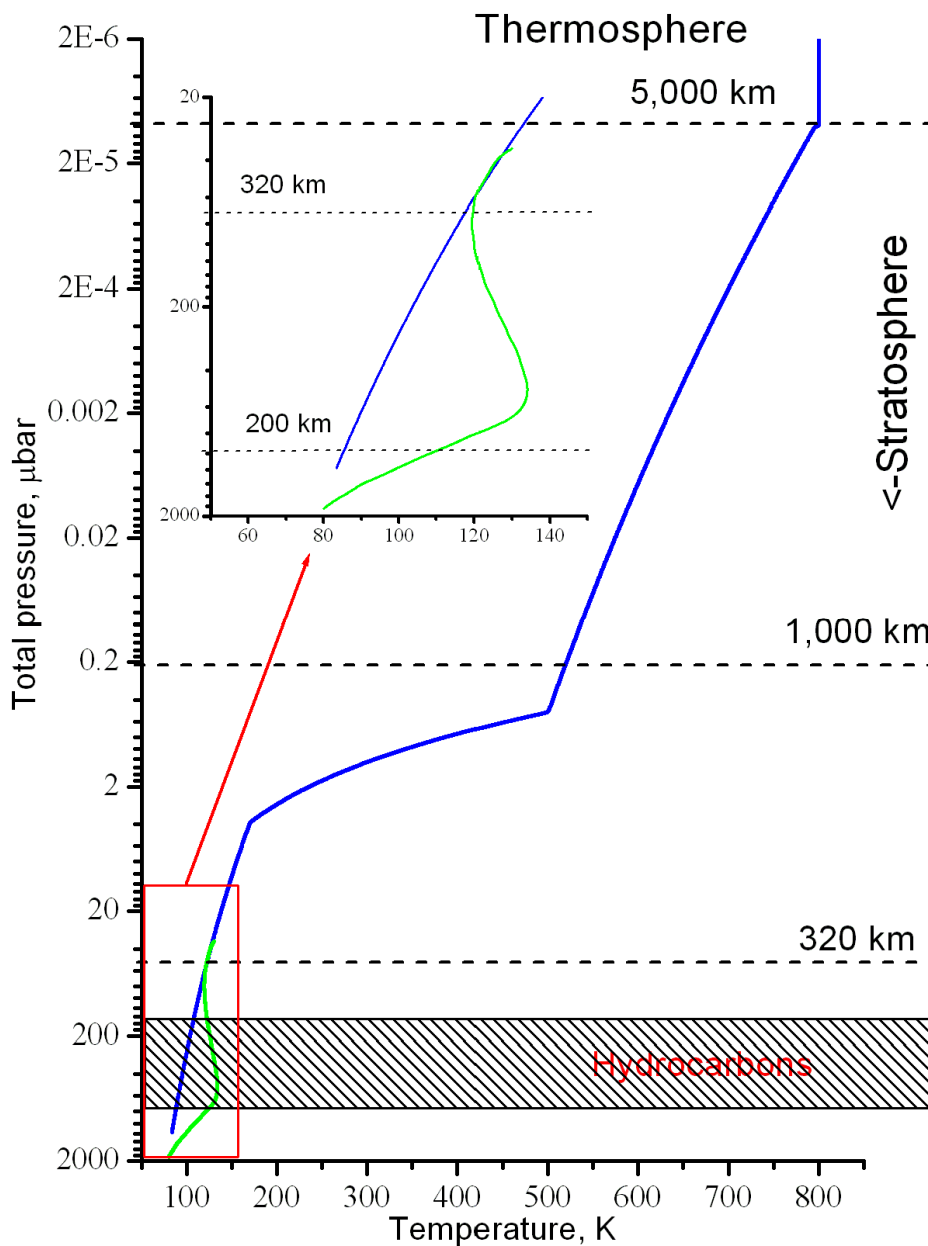
Innerer Aufbau von Uranus. Über dem Gesteinskern erhebt sich eine Schicht aus einer hochkomprimierten, leitfähigen Flüssigkeit, die einen hohen Wasseranteil besitzt.

Uranus zeigt keinen Infrarotexzeß wie Jupiter und Saturn, d.h. er befindet sich mit der von der Sonne erhaltenen Strahlung im Gleichgewicht. Man kann deshalb davon ausgehen, daß er keine oder nur sehr schwache zusätzliche interne Energiequellen besitzt. Das erklärt auch die weitgehend strukturlosen Wolken- und Dunstschichten, die auf eine sehr stabile, also kaum oder gar nicht von Konvektion beeinflusste atmosphärische Schichtung hinweisen.

### Atmosphäre

Das Auffälligste an der Wolkendecke von Uranus ist die fast vollkommene Strukturlosigkeit. Man glaubt fast, man hat es mit einer bläulichgrün eingefärbten Billardkugel zu tun. Erst umfangreiche Bearbeitungen der von Voyager 2 übermittelten Fotos führten zur Entdeckung von streifenförmigen Wolkenmustern, wie man sie in tausendfach kontrastreicherer Form auch von den Riesenplaneten her kennt. Diese Streifenmuster sind konzentrisch zu den Polen angeordnet und die Bewegung von

fleckenartigen Strukturen zeigen, daß man es auch hier mit zonalen Windsystemen zu tun hat, die in Ost-West-Richtung wehen. Dabei wurden Windgeschwindigkeiten von ca. 300 km/h gemessen. Zur Zeit des Vorbeifluges von Voyager 2 zeigte der Südpol des Planeten schon einige Jahrzehnte in Richtung Sonne und der Nordpol war die gleiche Zeit in völlige Dunkelheit getaucht. Die Sonnenstrahlung erreichte nur die polnahen Gebiete und mittlere Breiten der südlichen Hemisphäre. Das scheint aber keinen großen Einfluß auf die großräumigen Zirkulationsmuster in der Uranusatmosphäre zu haben, wie man annehmen könnte. Die zonalen Windsysteme des Planeten werden in erster Linie durch die schnelle Rotation und weniger durch die Sonneneinstrahlung angetrieben.



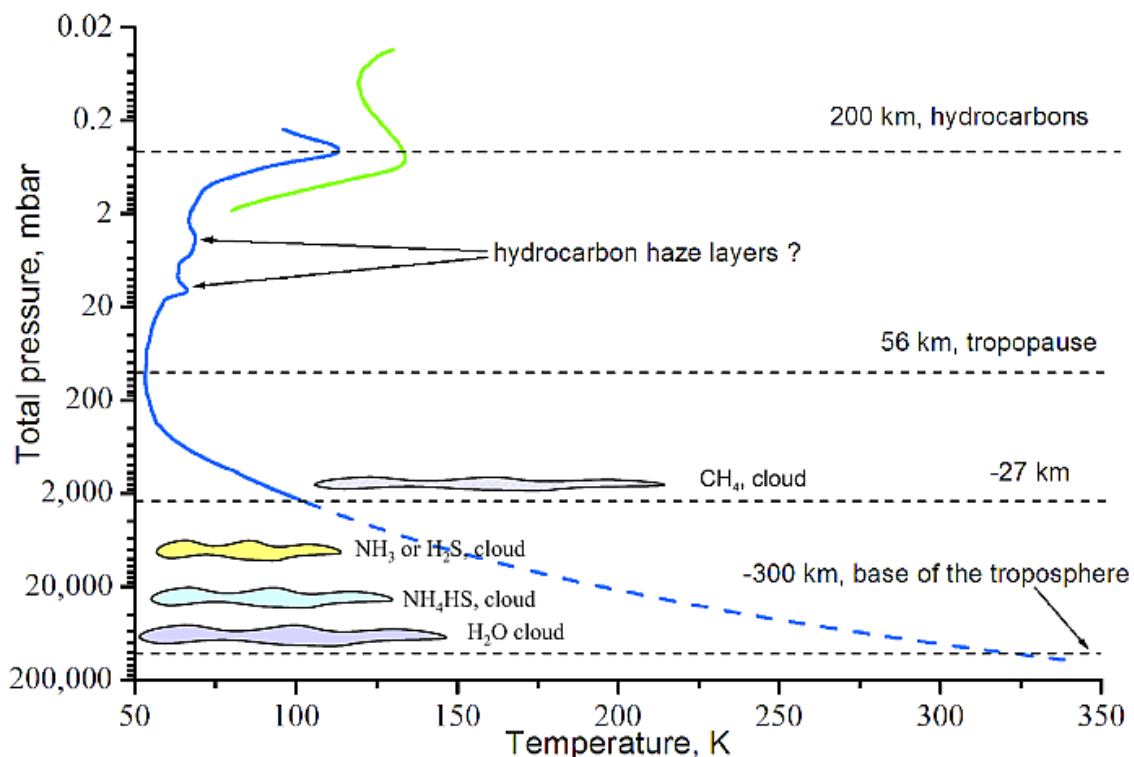
Vertikaler Aufbau der Uranus-Atmosphäre

Die Uranus-Atmosphäre besteht im Wesentlichen aus folgenden Stoffen:

Molekularer Wasserstoff $H_2$	83%
Helium $He$	15%
Methan $CH_4$	2% - 4%
Neon $Ne$	

sowie Äthan ( $C_2H_6$ ), Azetylen ( $C_2H_2$ ) und Wasser ( $H_2O$ ).

Wie man der Tabelle entnehmen kann, stellen Wasserstoff und Helium die wichtigsten Atmosphärenbestandteile dar wobei der Heliumanteil etwas größer ist als beim Planeten Jupiter. Für die bläulichgrüne Farbe ist Methan verantwortlich, welches zu starken Absorptionsbanden im roten Bereich des Spektrums (z.B. bei 541 nm und 619 nm) führt und als Spurengas in der oberen Atmosphäre auftritt. Im unteren Teil der Atmosphäre steigt der Methananteil auf ca. 2 bis 4% an, wobei der exakte Wert nur sehr schwer zu bestimmen ist. Nach gängigen Atmosphärenmodellen erwartet man bei Uranus eine Wolkendecke aus auskondensierten Methan im Druckbereich zwischen 0.09 MPa und 0.13 MPa. Darüber hinaus treten in niederen Breiten auch konvektive „Eiswolken“ aus Methan auf, die z.B. vom Hubble-Teleskop beobachtet und eine zeitlang verfolgt werden konnten. Sie besitzen eine prograde zonale Geschwindigkeitskomponente von 150 bis 550 km/h in bezug auf die Rotationsdauer von 17 Stunden und 14 Minuten. Diese Wolken sind nicht stabil und lösen sich mit der Zeit wieder auf.



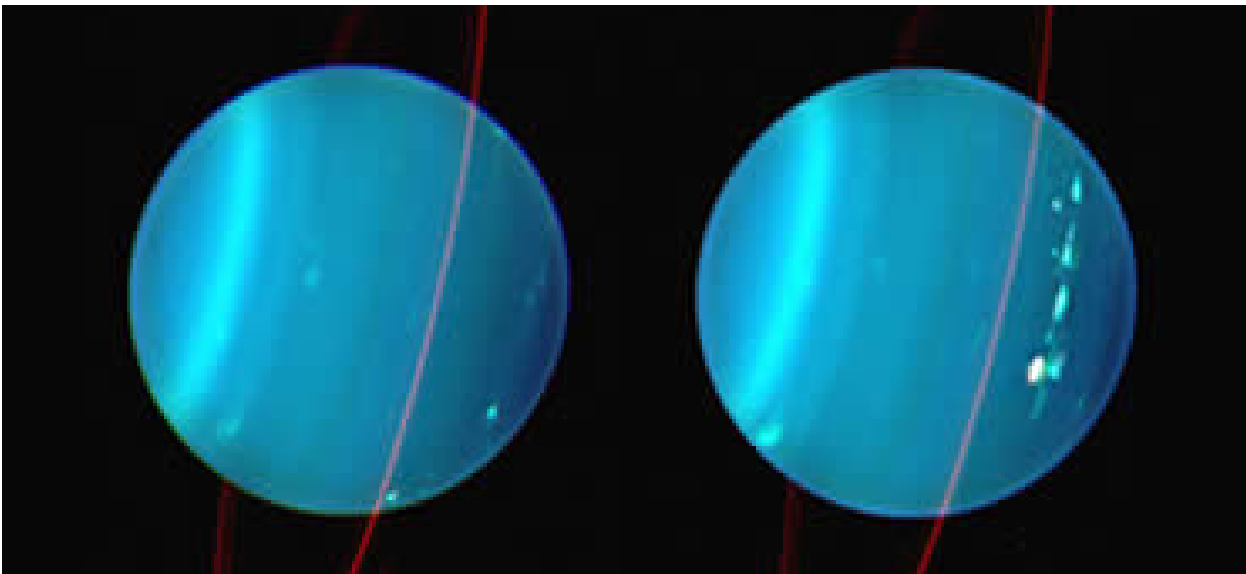
Temperaturprofil und Wolkenschichten der Uranus-Atmosphäre

Neben den Wolken werden auch Hurrikan-ähnliche Wetterphänomene beobachtet, die oft über viele Monate bis hin zu mehreren Jahren stabil sind. Man kann sie z.B. auf Infrarotaufnahmen nachweisen.

Die mittlere Temperatur von Uranus beträgt ungefähr 60 K. Nahe der Tropopause (Grenzschicht zwischen der Stratosphäre und der Troposphäre, gekennzeichnet durch die 0.1 bar-Grenze = 10000 Pa) wurde von Voyager die Minimaltemperatur von 52 K gemessen. Die gleiche Temperatur weisen übrigens auch beide Polgebiete auf, obwohl der Südpol von der Sonne beschienen wird. Offensichtlich reicht diese Strahlung nicht aus, um den Planeten in diesem Gebiet merklich zu erwärmen. Nach innen nimmt die Temperatur rasch zu um an der Atmosphäre-Mantel-Grenze bei  $0.8 R_U$  ca. 3000 K zu erreichen.

Aufgrund der geringen Temperatur der oberen Atmosphärenschichten kann darin sich Ammoniak (welches ca. 0.03% der Jupiter- und Saturnatmosphäre ausmacht) nicht halten, da es ausfriert und nach unten sinkt. Die Uranus-Atmosphäre ist deshalb frei von diesem Gas.

Die dünnen bläulichen Wolken, welche den Planeten lückenlos bedecken, bestehen – je nach Höhe, aus gefrorenem Methan, aus Methan-Tröpfchen und – in tiefer liegenden Schichten – wahrscheinlich aus Wasserdampf. Nachgewiesen werden konnten jedoch nur die Methan-Wolken. Aufnahmen mit dem Hubble-Teleskop, die in den letzten Jahren gewonnen wurden, zeigen wiederholt einzelne weiße Flecken mit einer Ausdehnung von einigen Tausend Kilometern. Dabei handelt es sich um Wolken aus gefrorenem Methan.



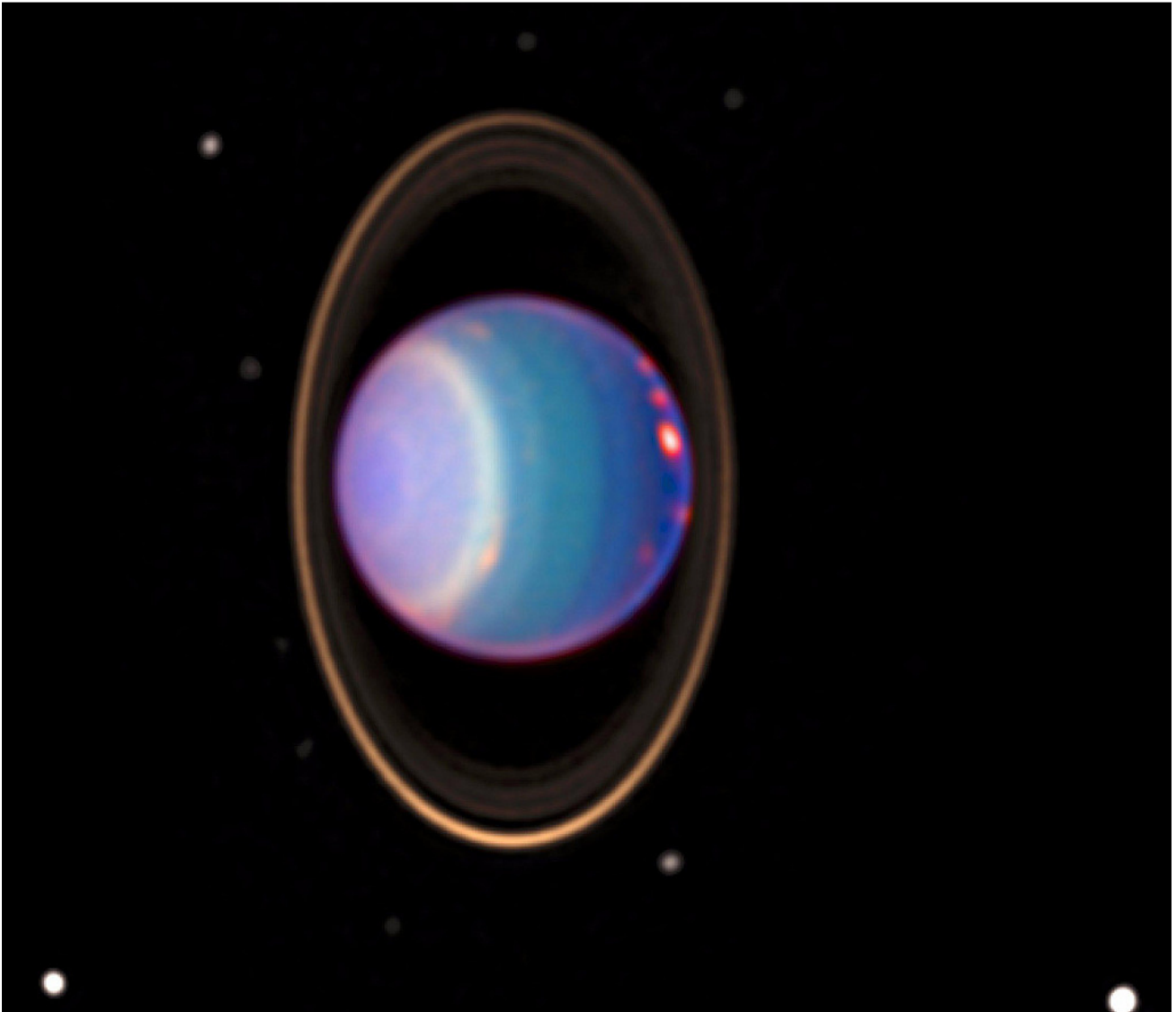
Helle Methanwolken in der Uranus-Atmosphäre. IR-Aufnahme mit dem Keck-Teleskop

Oberhalb der Wolkenschicht geht die Atmosphäre in eine dünne Hochatmosphäre über, die fast ausschließlich aus molekularem Wasserstoff besteht. In diesen Bereich hat man auf der Tagseite des Planeten ein schwaches Leuchten entdeckt, deren Ursache sicherlich mit der Sonneneinstrahlung zusammenhängt, deren Entstehungsmechanismus aber immer noch nicht zufriedenstellend geklärt ist. Diese Emission wird als „Elektroglühen“ bezeichnet.

Ebenso wie die beiden Riesenplaneten Jupiter und Saturn beobachtet man auf Uranus Polarlichtemissionen, die aber nur im EUV-Bereich sichtbar sind.

### Ringsystem

1972 reichte BIBHAS DE eine Arbeit bei einem bekannten astronomischen Journal ein, dessen Herausgeber der bekannte Planetologe CARL EDWARD SAGAN (1934-1996) war. Diese Arbeit wurde prompt abgelehnt mit der Begründung, daß die Voraussetzungen, auf welche deren Inhalt beruhte, nicht allgemein anerkannt sind. Ihr Inhalt war die Voraussage und deren Begründung, daß auch Uranus ähnlich wie Saturn ein Ringsystem besitzen muß...



Falschfarbenaufnahme (Infrarot) des Uranus mit Ringsystem. Aufnahme Hubble-Teleskop

Für das Jahr 1977 war vorhergesagt, daß am 10 März der Planet Uranus den nur knapp  $9^m$  hellen Stern SAO 158687 mit hoher Wahrscheinlichkeit bedecken wird. Das ist – obwohl es genügend Sterne gibt, die sich von einem Planeten bedecken lassen – ein durchaus nicht häufiges Ereignis (man bedenke, der Winkeldurchmesser von Uranus beträgt gerade einmal 4 Bogensekunden!). Photometriert man solch eine Sternbedeckung, dann kann man aus der Art und Weise, wie sein Licht beim Bedeckungsvorgang abfällt, Informationen über die Atmosphäre des entsprechenden Planeten ableiten.

Um möglichst genaue Lichtkurven von dem erwähnten Ereignis zu erhalten, beobachtete der amerikanische Astronom JAMES L.ELLIOT und Kollegen die Bedeckung mit Hilfe des „Kuiper-Airborne-Observatoriums“, gewissermaßen einer fliegenden Sternwarte, bei dem das 91 cm-Teleskop in eine Boeing eingebaut ist. Die Lichtkurven zeigten Überraschendes: Noch bevor der Stern den Planetenrand erreicht hat, wurde er mehrfach abgedunkelt um zugleich wieder in seiner ursprünglichen Helligkeit zu erscheinen. Nach der Passage wiederholte sich der gleiche Vorgang in genau umgekehrter Reihenfolge. Die einzige plausible Erklärung wurde schnell gefunden: Uranus besitzt ein Ringsystem aus mehreren einzelnen Ringen die dicht genug sind, um das Licht eines hindurchscheinenden Sterns merklich abzuschwächen.



Detailaufnahme (farbverstärkt) des Ringsystems (Voyager)

Das war Ansporn genug, um in den darauf folgenden Jahren jede weitere Sternbedeckung weltweit akribisch zu beobachten. Insgesamt wurden dabei neun schmale Ringe entdeckt, die – zwar unlogisch, aber anerkannt – von Innen nach Außen mit 6, 5, 4, Alpha, Beta, Eta, Gamma, Delta und Epsilon bezeichnet werden (Voyager 2 hat zwei weitere Ringe, 1986U1R und 1986U2R entdeckt, so daß insgesamt 11 Ringe bekannt sind).

Der eigentliche Höhepunkt in der Erforschung des Ringsystems war der Vorbeiflug der Voyager 2-Sonde in der dritten Januarwoche des Jahres 1986. Aus den dabei gewonnenen Bilder und Meßwerten ergibt sich folgendes Bild:

- Alle Ringe liegen innerhalb der Roche-Grenze
- Die Breiten der dichteren Hauptringe variieren zwischen etwas mehr als 1 km bis zu etwas über 10 km (Beta-Ring). Nur der am weitesten vom Planeten entfernte Epsilon-Ring erreicht an seinem planetenfernsten Punkt eine Breite von ungefähr 100 km. Die einzelnen Ringe sind durch ausgedehnte Lücken getrennt, die in den äußeren Teilen des Ringsystems z.T. mehr oder weniger dicht mit mikrometergroßen Staubpartikeln durchsetzt sind, wie man auf den Gegenlichtaufnahmen der Voyager-Kameras sehr gut sehen kann.. Die Hauptringe selbst bestehen aus z.T. metergroßen Gesteinsbrocken. Partikel im Millimeter- bzw. Zentimeterbereich scheinen in ihrer Häufigkeit dagegen unterrepräsentiert zu sein. Der Epsilon-Ring ist maximal 100 m dick.
- Die einzelnen Ringe sind teilweise unterschiedlich stark in bezug auf die Äquatorebene des Uranus geneigt und schwach elliptisch. Sie zeigen Strukturen in Form von Breitenschwankungen, wellenartige Ränder und Variationen in der Partikeldichte. Man nimmt an, daß diese Strukturen durch die Wechselwirkung mit den Uranus-Monden verursacht werden.
- Das Material, aus dem die Ringe bestehen, ist sehr dunkel. Es reflektiert weniger als 5% des einfallenden Lichtes und ähnelt von der Beschaffenheit den sogenannten kohligen Chondriten.
- Der Epsilon-Ring wird ähnlich wie der F-Ring Saturns durch zwei Shepherd-Monde zusammengehalten – Cordelia und Ophelia (Durchmesser zwischen 26 und 32 km. Man nimmt an, daß auch andere Ringe durch noch unbekannte „Schäferhundmonde“ stabilisiert werden.
- Mit einem Wert von 0.01 ist der Epsilon-Ring der Ring mit der größten Exzentrizität im Uranus-System. Seine Breite variiert zwischen 20 km an seinem Uranus-nächstem Punkt und 96 km am fernsten Punkt. Er liegt im Gegensatz zu den anderen Ringen genau in der Äquatorebene des Planeten (das ist nicht überzubewerten, da die anderen Ringe nur in Bruchteilen eines Grads von dieser Ebene abweichen).

2005 konnten zwei weitere, äußere Uranusringe auf Aufnahmen, die mit dem Weltraumteleskop Hubble angefertigt wurden, entdeckt werden (M.SHOWALTER, J.LISSAUER). Der Äußere von beiden besitzt eine auffallend blaue Färbung und ähnelt somit dem E-Ring Saturns, der ja bekanntermaßen aus Eispartikeln besteht, die vom Mond Enceladus stammen. Im Fall von Uranus scheint der erst im Jahre 2003 entdeckte Mond Mab (er hat einen Durchmesser von lediglich 24 km und bewegt sich im Zentrum des Rings) die Quelle für die Ringpartikel zu sein, die hier aber überwiegend aus mikroskopisch feinem Staub bestehen.

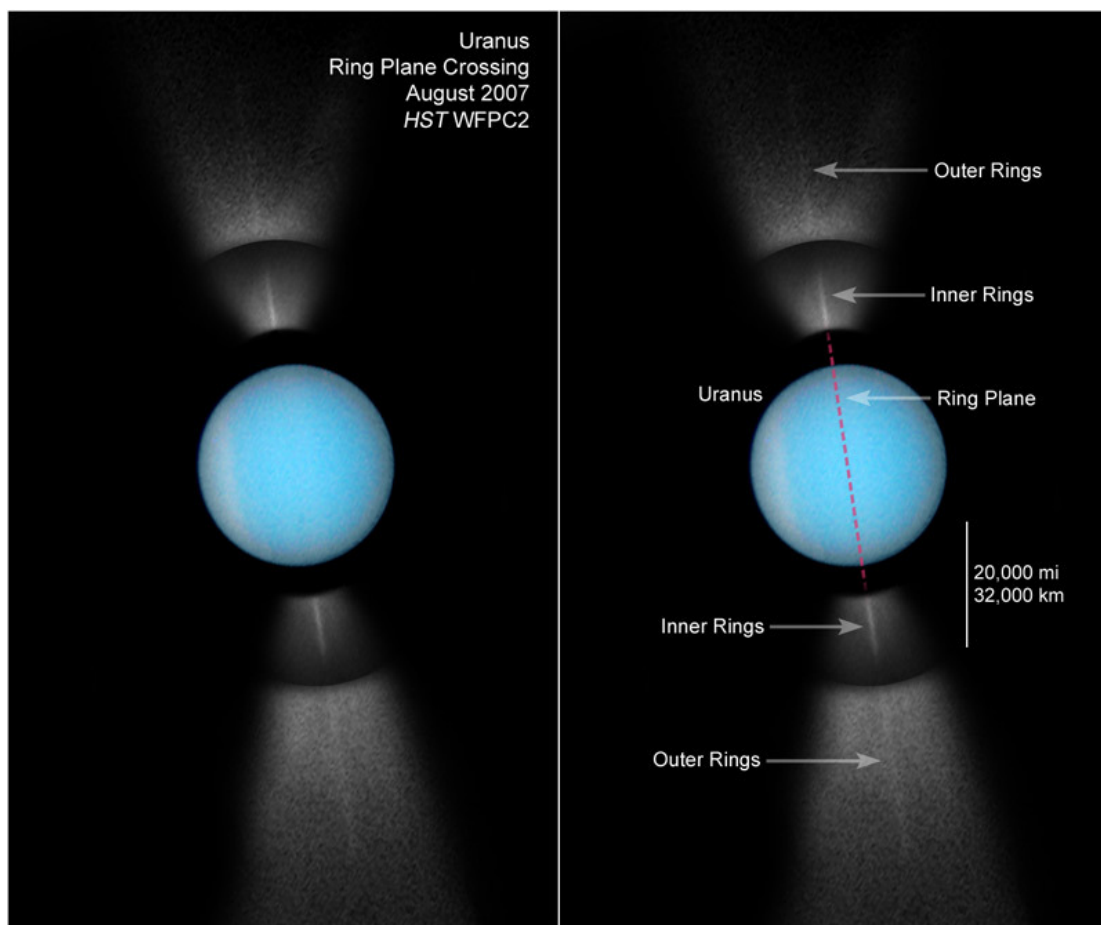
R/2003 U2 ist dagegen auffallend rötlich und ähnelt somit den anderen Staubringen im Sonnensystem. Wahrscheinlich spiegelt in diesem Fall die beobachtete Färbung näherungsweise auch die Eigenfarbe des Materials wider, aus dem der Ring besteht.

Aus himmelsmechanischen Gründen vermutet man, daß die Uranus-Ringe nicht sehr alt sein können (maximal einige Millionen Jahre). Das Fehlen von größeren Mengen Staub in den inneren Bereichen des Ringsystems wird wahrscheinlich durch eine dünne ausgedehnte Wasserstoffatmosphäre oberhalb der dichteren Schichten von Uranus bewirkt, die aufgrund von Stoßprozessen Staub sehr effektiv aus diesen Regionen entfernen kann. Auch Plasmawechselwirkungen und der Poynting-Robertson-Effekt sollte zumindest die Verweildauer der kleineren Partikel im Ring begrenzen. Für den kontinuierlichen Nachschub an Staub könnten Kollisionsprozesse innerhalb der Hauptringe (die ja aus größeren Gesteinsbrocken bestehen) sorgen.

Tabelle: Ringsystem Uranus

# Uranus

	Radius [km]	Radius [Uranus-Radius]	Optische Dicke	Albedo	Breite [km]
Uranus Äquator	25559	1.000			
6	41837	1.636	0.3	0.015	~1.5
5	42235	1.652	0.5	0.015	~2.0
4	42571	1.666	0.3	0.015	~2.5
Alpha	44718	1.750	0.4	0.015	4-10
Beta	45661	1.786	0.3	0.015	5-11
Eta	47176	1.834	0.4	0.015	1.6
Gamma	47626	1.863	1.5	0.015	1-4
Delta	48303	1.900	0.5	0.015	3-7
Lambda	50024	1.957	0.1	0.015	~2
Epsilon	51149	2.006	0.5 – 2.3	0.018	20-96
R/2003 U 2	~66000	2.583	?	?	?
R/2003 U 1	97734	3.824	?	?	?



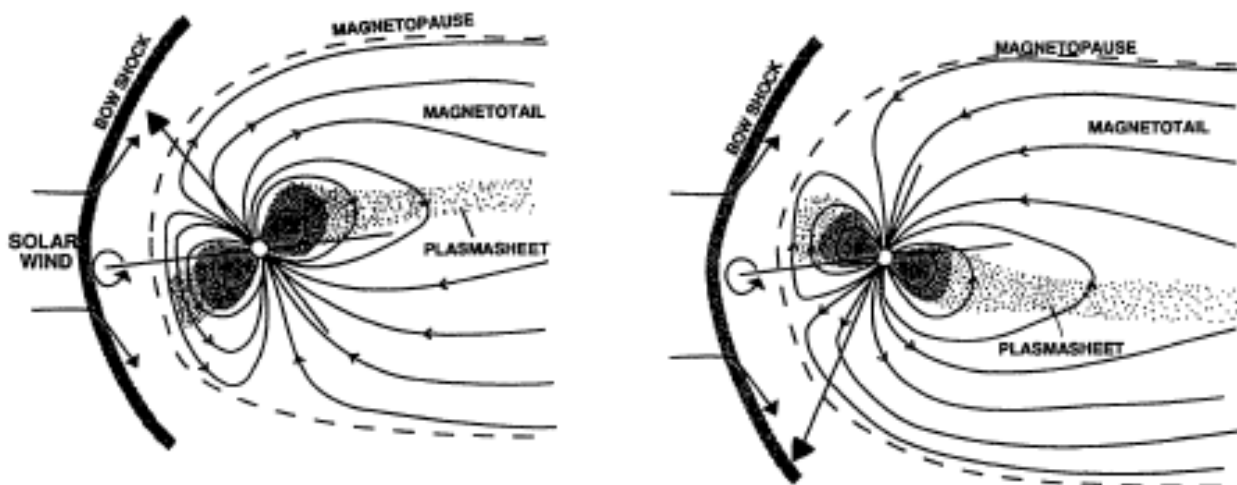
Ringaufnahmen mit der Weitwinkel-Planetenkamera des Hubble-Teleskops

## Magnetfeld

Als im Januar 1986 Voyager 2 das Uranus-System durchquerte, machte es eine ungewöhnliche und unerwartete Entdeckung: Die Achse des Magnetfeldes von Uranus ist um fast  $60^\circ$  zur Rotationsachse geneigt, wobei der Mittelpunkt des Dipolfeldes um ca.  $0.3 R_U$  außerhalb des Planetenmittelpunktes liegt. Da das Magnetfeld mit dem Planeten mitrotiert, entsteht im Bereich des magnetischen Schweifes eine korkenzieherartig verdrehte Feldstruktur. Ansonsten ähnelt die Magnetosphäre in ihrer Struktur der Magnetosphäre der Erde. Die Stoßregion befindet sich in etwa  $33 R_U$  Entfernung und die Magnetopause ist ungefähr  $25 R_U$  vom Planeten entfernt. Voyager 2 konnte auch den Magnetschweif bis in eine Entfernung von 10 Millionen Kilometern nachweisen.

Mit ca. 23 bis  $25 \mu\text{T}$  erreicht die Magnetfeldstärke an der Wolkenobergrenze fast die Werte der Erde, während das magnetische Moment (wegen der Größe des Planeten) das Dipolmoment der Erde um den Faktor 50 übersteigt.

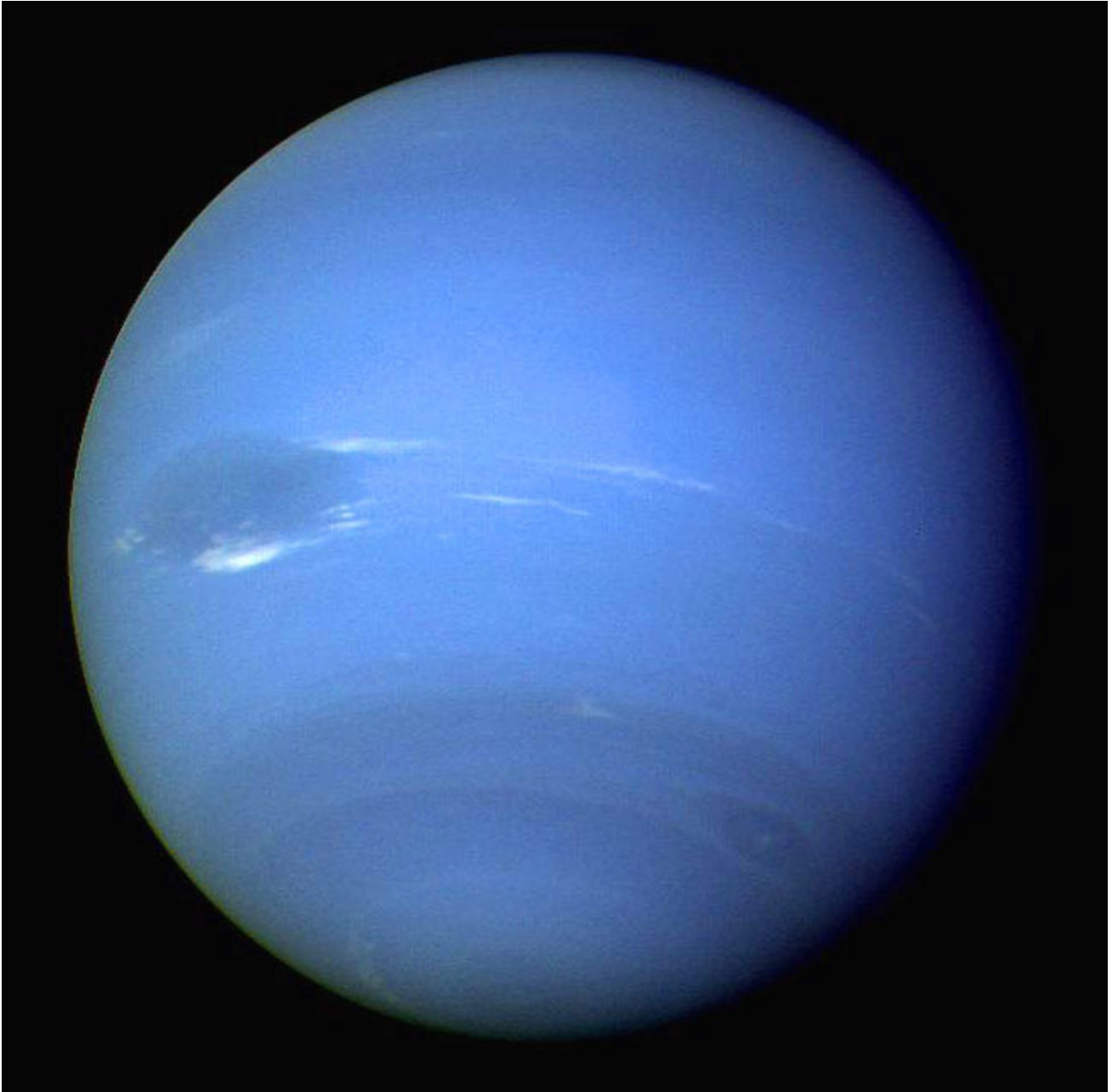
Während des Voyager-2-Vorbeifluges Ende Januar 1986 registrierten die Meßinstrumente auch die Existenz von Strahlungsgürteln. Es scheint, daß sie von Wasserstoffionen dominiert werden. Ionen schwerer Elemente ließen sich nur sehr wenige nachweisen. Man vermutet, daß die sehr dunkle Färbung der inneren Monde und der Ringpartikel durch die Partikelstrahlung in diesem Bereich verursacht wird.



1984 beobachtete der Satellit I.U.E. („*International Ultraviolet Explorer*“) intensive Leuchterscheinungen an der Grenze zwischen der Uranus-Atmosphäre und dessen Magnetosphäre, die als „electroglow“ bezeichnet werden und sich bis in eine Höhe von 50000 Kilometern erstrecken.

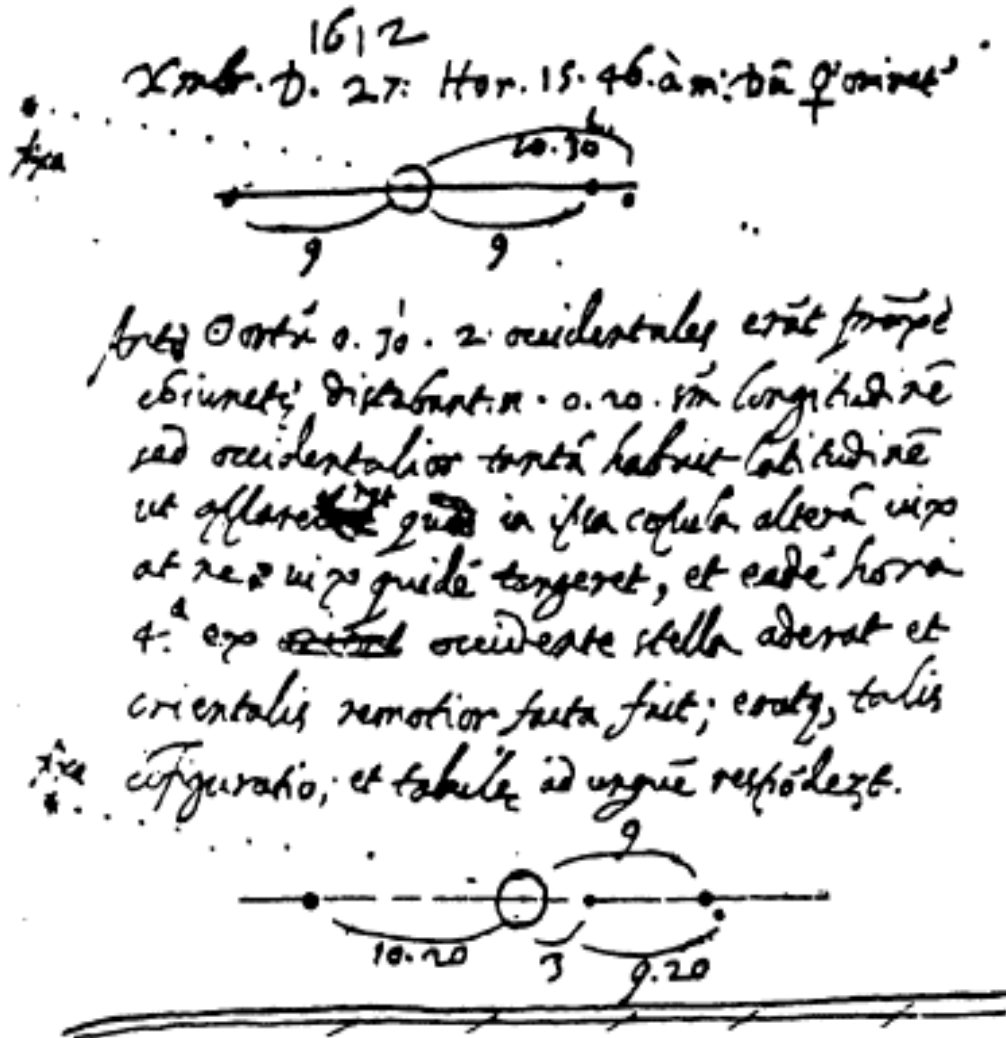
<b>Daten</b>	
<b>BAHNPARAMETER</b>	
Große Halbachse ( $10^6$ km)	2872.46
Umlaufszeit (siderisch) in Tagen	30685.4
Umlaufszeit (tropisch) in Tagen	30588.74
Perihelabstand ( $10^6$ km)	2741.3
Aphelabstand ( $10^6$ km)	3003.62
Mittlere Bahngeschwindigkeit (km/s)	6.81
Max. Bahngeschwindigkeit (km/s)	7.11
Min. Bahngeschwindigkeit (km/s)	6.49
Bahnneigung (Grad)	0.772
Numerische Exzentrizität	0.0457
Sidereale Rotationsperiode (Stunden)	-17.24
Länge eines Tages (Stunden)	17.24
<b>PLANETENPARAMETER</b>	
Masse ( $10^{24}$ kg)	86.832
Volumen ( $10^{10}$ km <sup>3</sup> )	6833
Äquatorradius (km) 1 bar Niveau	25559
Polradius (km) 1 bar Niveau	24973
Abplattung	0.02293
Mittlere Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	1270
Schwerebeschleunigung (m/s <sup>2</sup> ) 1 bar Niveau	8.87
Entweichgeschwindigkeit (km/s)	21.3
Albedo	0.300
Geometrisches Albedo	0.51
Solarkonstante (W/m <sup>2</sup> )	3.71
Strahlungstemperatur (K)	58.2
<b>ATMOSPHÄRE</b>	
Dichte bei p=1 bar (kg/m <sup>3</sup> )	~0.42
Skalenhöhe (km)	27.7
Temperatur bei p=1 bar (K)	~76
Mittleres Molekulargewicht (g/mol)	2.64

## Neptun



Wenn es auch weitgehend unbekannt ist, GALILEO GALILEI (1564-1642) – der berühmte italienische Naturforscher – war der erste Mensch, der den Planeten Neptun gesehen hat. Er wußte natürlich nicht, daß das Sternchen, welches er Anfang Januar 1613 in sein Notizbuch neben Jupiter und seinen Monden eintrug, der über 200 Jahre später offiziell entdeckte Planet Neptun war. Diese frühe Beobachtung Neptuns ist in mehrfacher Hinsicht bemerkenswert. In der Nacht vom 3. Januar 1613 zum 4. Januar 1613 kam es zu einer der seltenen Neptun-Bedeckungen durch Jupiter. Beide Planeten befanden sich zur Opposition zur Erde und ihre Oppositionsschleifen berührten sich so, daß Jupiter über Neptun hinweg wandern konnte. Dieser Vorgang dauerte ungefähr 9h 45min. GALILEI hat

während dieser Zeit an seinem selbstgebauten Fernrohr gesessen, natürlich ohne etwas von dieser außergewöhnlichen Konjunktion zu bemerken. Auf einigen seiner Skizzen von Jupiter und seinen Monden ist ein Sternchen verzeichnet, welches heute als Planet Neptun identifiziert wird.



Galileos Notizbucheintrag vom 27. Dezember 1612. Der durch ein punktierte Linie gekennzeichnete Bezugsstern hat sich als der Planet Neptun herausgestellt.

Die eigentliche Entdeckung von Neptun wird auch heute noch als ein Meilenstein der Astronomiegeschichte und als Triumph der Himmelsmechanik verstanden. Er ist der Planet, der quasi auf dem Papier, rein rechnerisch, vorhergesagt und danach – nur knapp zwei Vollmonddurchmesser vom berechneten Ort entfernt – auch wirklich aufgefunden wurde. Dieser Umstand ist allein Grund genug, die Geschichte dieser Entdeckung etwas genauer zu schildern.

Wie bereits im Kapitel über Uranus erwähnt, hat man nach seiner Entdeckung durch HERSCHEL noch eine ganze Anzahl von Beobachtungen (in Form von Positionsbestimmungen) gefunden, die vor dem eigentlichen Entdeckungszeitpunkt datieren. Nach der Entdeckung hat man die Bewegung dieses Planeten natürlich mit höchster Präzision und Akribie weiter verfolgt, so daß Anfang des 19. Jahrhunderts genügend Beobachtungen vorlagen, um seine Bahnelemente mit großer Genauigkeit zu

bestimmen und daraus Ephemeriden zu rechnen. Aber bereits 1811 fiel einigen Astronomen auf, daß die berechneten Örter von den beobachteten bis zu 20'' abwichen. 1821 unternahm A. BOUVARDS (der bei LAPLACE angestellt war) eine weitere Analyse des Beobachtungsmaterials ohne die bestehenden Diskrepanzen aufklären zu können. Durch FRIEDRICH WILHELM BESSEL (1784-1846), dem berühmten Astronomen aus Königsberg, wurde die Diskussion angestoßen, ob diese Abweichungen nicht vielleicht durch einen weiteren, außerhalb der Uranusbahn befindlichen und unbekanntem Planeten hervorgerufen werden. Er widmete sich zwar dem Problem, konnte es aber auch nicht lösen.

Später, um 1845, begannen zwei damals noch junge und unbekannte Mathematiker, URBAIN JEAN JOSEPH LEVERRIER (1811-1877) in Frankreich und JOHN COUCH ADAMS (1819-1892) in England, sich mit dem „Uranus-Problem“ zu beschäftigen, wobei beide von vornherein von der These ausgingen, daß die Abweichungen der Uranusbahn von der berechneten Bahn durch einen unbekanntem Planeten verursacht werden. Ihr Ziel war es, die Position dieses unbekanntem Planeten möglichst genau zu bestimmen, damit man ihn im Fernrohr auffinden kann. Zur damaligen Zeit gab es weder Taschenrechner noch Computer, mit denen man derartige Probleme heute löst. Dafür gab es die mittlerweile in Vergessenheit geratene Logarithmentafel, welche die „Himmelsmechaniker“ der damaligen Zeit auswendig „im Kopf“ hatten, und mit deren Hilfe die aufwendigen Berechnungen gemäß der Newtonschen Theorie ausgeführt wurden.

Im Herbst 1845 lagen die Ergebnisse von ADAMS vor und Anfang 1846 die von LEVERRIER. ADAMS Vorhersagen führten im Folgejahr, genauer am 4. und 12. August 1846 zur Beobachtung des neuen Planeten. Nur wurden die Beobachtungen nicht ausgewertet, da gültige Sternkarten von der entsprechenden Gegend fehlten. Auf diese Weise wurde diese günstige Gelegenheit verpaßt.

Am 23. September 1846 erreichte JOHANN GOTTFRIED GALLE (1812-1910) in Berlin ein Brief von LEVERRIER mit der Bitte, nach dem von ihm berechneten Planeten Ausschau zu halten. Da es an diesem Tag klar war, machte sich GALLE und sein Assistent D'ARREST noch am gleichen Abend an die Arbeit und fanden prompt nach knapp einer Stunde Beobachtungszeit einen Stern, der in den neuen Berliner Akademischen Sternkarten nicht eingezeichnet war. Nach einem Tag Ungewißheit konnten sie die Eigenbewegung dieses „Sterns“ zweifelsfrei mit ihrem neunzölligen Refraktor messen und damit war Neptun entdeckt. LEVERRIER wurde berühmt und ADAMS hatte das Nachsehen. Heute weiß man, daß dem Franzosen die größere Ehre gebührt, wie vor kurzem angestellte Forschungen in den alten Archiven, wo die Aufzeichnungen von LEVERRIER und ADAMS aufbewahrt werden, zeigen.

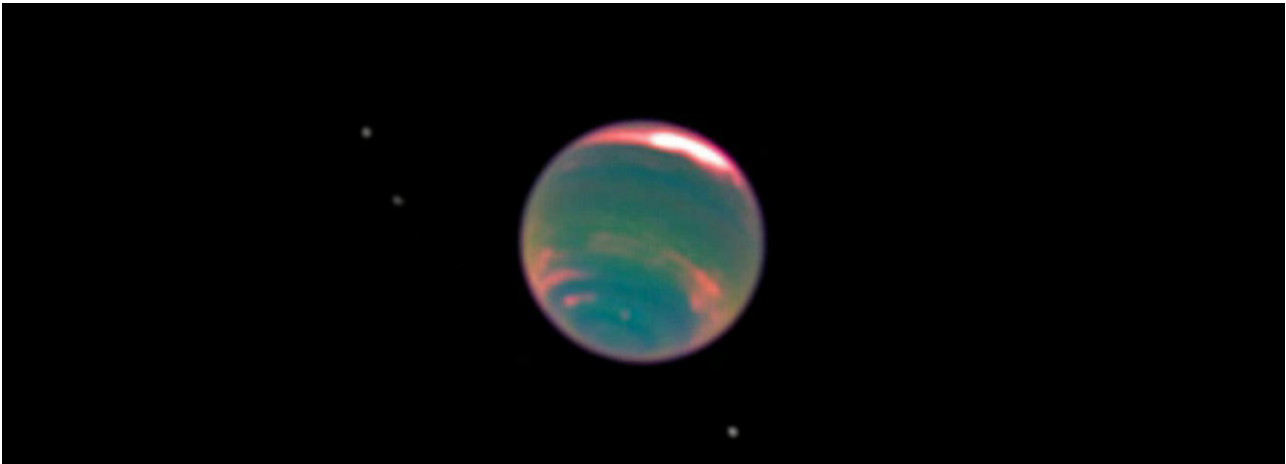
Bereits einen Monat später, im Oktober 1846, gelang dem Briten WILLIAM LASSELL (1799-1880) die Entdeckung des ersten Neptunmondes. Er hat den Namen Triton erhalten. Seit Voyager 2 wissen wir auch, wie es auf seine Oberfläche aussieht... Heute (2007) sind insgesamt 13 Neptunmonde bekannt.

Übrigens, als man später die Aufzeichnungen des französischen Astronomen J.J.L. LALANDE überprüft hat, stellte man fest, daß er im Jahre 1795 zweimal die Position des Neptun – den er für einen Stern gehalten hatte – in seinem Beobachtungstagebuch notierte. Während GALILEI ihn mit einem Jupitermond verwechselte, verwechselte LALANDE ihn mit einem gewöhnlichen Stern.

## Allgemeines

Neptun benötigt 164.794 Jahre für einen Umlauf um die Sonne. Dabei variiert sein Sonnenabstand zwischen 4.464 Milliarden km (29.84 AU) und 4.545 (30.38 AU) Milliarden km, was eine Bahnexzentrizität von 0.009 ergibt. Bis zum Zeitpunkt des Rendezvous mit Voyager 2 Ende August 1989 war recht wenig über die physikalische Beschaffenheit dieses Planeten bekannt. Man wußte im Prinzip nur, daß er sehr stark Uranus ähnelt.

Unter sehr guten atmosphärischen Bedingungen kann man bereits mit einem Amateurinstrument bei hoher Vergrößerung (z.B. in einem 8-zölligen Spiegelteleskop) ein winzig kleines schwach bläuliches Scheibchen erkennen, welches aber ansonsten keine Einzelheiten preisgibt. Das gilt übrigens auch für größere Fernrohre. Erst mit modernen Großteleskopen mit adaptiver Optik (z.B. den Keck-Teleskopen auf Hawaii) und dem Hubble-Teleskop ist man in der Lage, Einzelheiten in der Atmosphäre Neptuns auszumachen.



Aufnahme des Neptun mit dem Hubble-Teleskop durch ein Methanfilter. Die helleren Strukturen stellen Methanwolken dar.

Während der Opposition erreicht Neptun eine Helligkeit von ca.  $7^m.7$ . Wenn man genau weiß wo er zwischen den Sternen steht, kann man ihn ohne große Mühe mit einem guten Feldstecher auffinden.

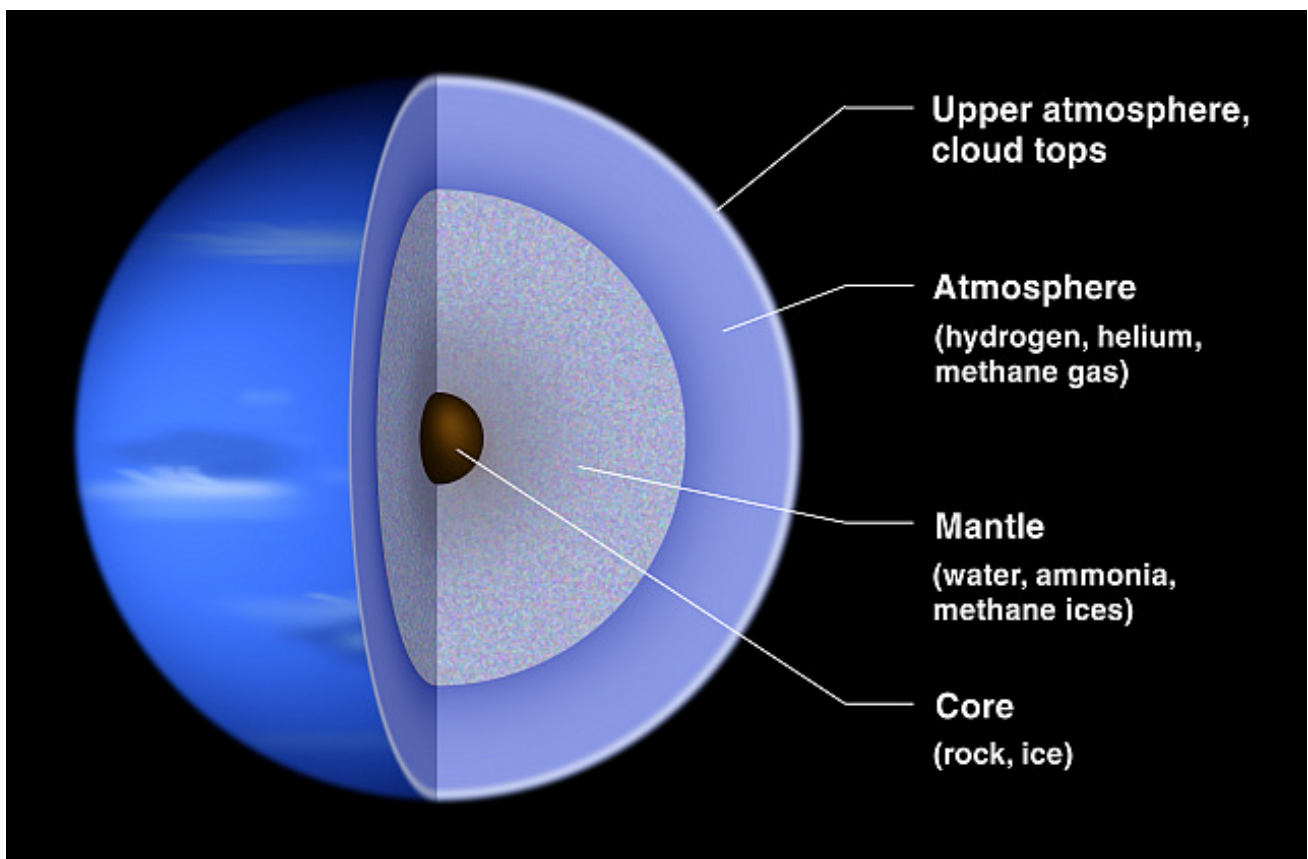
Obwohl er mit einem Durchmesser von 49528 km etwas kleiner ist als Uranus, besitzt er doch eine größere Masse:  $1.028 \cdot 10^{26}$  kg. Das ergibt eine mittlere Dichte von  $1640 \text{ kg/m}^3$ . Die Rotationsachse ist  $29.56^\circ$  gegenüber der Bahnebene geneigt. Die Bahnebene selbst hat eine Neigung von  $1.77^\circ$  in Bezug auf die Ekliptik.

Die inneren Schichten des Planeten rotieren mit einer Periode von 16.11 Stunden. Die äußeren Schichten, in denen sich die Wolken befinden, zeigen wie bei allen großen Planeten eine differentielle Rotation. Im Mittel konnte von Voyager 2 durch Verfolgung markanter Wolkenstrukturen eine Periode von 17.8 Stunden gemessen werden.

Neptun hat für das äußere Sonnensystem eine große Bedeutung. Aufgrund seiner Masse (ca.  $17 M_E$ ) beeinflusst er die Bahnen einer ganzen Gruppe von Kuiper-Belt-Objekten (wie z.B. den Plutinos) und von Pluto selbst.

### Innerer Aufbau

Uranus und Neptun haben einen ähnlichen inneren Aufbau. Aufgrund der größeren mittleren Dichte vermutet man, daß der feste Kern, der aus schwereren Elementen besteht (in der Zusammensetzung vielleicht mit chondritischen Meteoriten vergleichbar), etwas größer ist als bei Uranus. Im Zentrum des Planeten erwartet man einen Druck von 600 GPa bei einer Temperatur von ca. 3000 K. Über diesem Kern befindet sich eine Schicht aus „Eis“ (besser gesagt, eine unter hohem Druck stehende und überhitzte Masse aus Wasser, Methan und Ammoniak plus flüssigen Wasserstoff und Helium, bis ungefähr  $0.8 - 0.85 R_N$ ) und wiederum darüber eine ausgedehnte Wasserstoff- Heliumatmosphäre. Darin ist als wesentlichstes Spurengas in größeren Mengen Methan (ca. 1.5 bis 2%) enthalten, dessen Absorptionseigenschaften aus den gleichen Gründen wie bei Uranus für die bläuliche Farbe Neptuns verantwortlich sind.



Innerer Aufbau Neptuns.

Vor einiger Zeit konnten Wissenschaftler der Universität Berkeley in Kalifornien eine interessante Entdeckung auf dem Gebiet der Hochdruckphysik machen. Sie setzten flüssiges Methan in einem speziellen Gefäß einem Druck aus, wie er auch im Innern von Uranus und Neptun herrscht. Als sie dann mit einem Laser das Methan auf ungefähr 3000 K erhitzen entstand Diamantstaub. Daraus wird von einigen Planetologen die Schlußfolgerung gezogen, das es im Innern der beiden Großplaneten Gebiete geben könnte, wo Methan bzw. dort auch vorhandene Hydrocarbonate in Diamant umgewandelt werden. Oder anders ausgedrückt, Uranus und Neptun sind Welten, wo es Diamanten regnet ... – eine Erkenntnis, die den Managern von de Boor zu denken geben sollte.

Berechnungen zeigen, daß die Zone, in der dieser Vorgang wahrscheinlich stattfindet, im oberen Zehntel des Planeten angesiedelt sein muß. Dort spalten die hohen Temperaturen Methan in Kohlenstoff und Wasserstoff auf und der hohe Umgebungsdruck wandelt den Kohlenstoff schließlich in Diamantstaub um. Dieser Vorgang wurde auch herangezogen, um eine weitere Eigenschaft Neptuns zu erklären. Im Gegensatz zu Uranus strahlt Neptun rund 2.7-mal mehr Energie ab, als er von der Sonne erhält. Ursache dafür könnte der Zerfall von radioaktiven Stoffen sein (z.B. Uran, Kalium und Thorium), die im Kern eingelagert sind oder aber die kontinuierliche Bildung von Diamanten, bei der ein ähnlich großer Betrag an Energie freigesetzt wird. Aber das ist alles nur Hypothese...

## Atmosphäre

Im Gegensatz zu Uranus beobachtet man in der Atmosphäre Neptuns gar nicht selten das Entstehen und Vergehen heller Wolken. Ansonsten zeigt der Planet nur eine wenig ausgeprägte Bänderstruktur. Während des Vorbeiflugs von Voyager 2 konnten diese Wolken sowie andere mysteriöse atmosphärische Erscheinungen etwas detaillierter untersucht werden. Am Auffälligsten war der „Große Dunkle Fleck“ (GDS – „*great dark spot*“), der zu dieser Zeit bei ungefähr 20° südlicher Breite zu sehen war (spätestens seit 1994 ist er wieder verschwunden). Er war oval, hatte ungefähr die Größe der Erde (Durchmesser ca. 12000 x 8000 km) und die Wolken in ihm bewegten sich antizyklonal mit einer Periode von 16 Tagen. Kurz, er war ein dunkelblauer Pedant des Großen Roten Flecks auf Jupiter. Aufnahmen in verschiedenen Spektralbereichen führten schließlich zu der Erkenntnis, daß er sich in tieferen Schichten der Neptunatmosphäre befinden muß als die ihn am südlichen Rand begleitenden weißen Zirren aus gefrorenem Methan. Diese zirusartigen Wolken schweben ungefähr 50 km oberhalb der normalen Wolkendecke, denn auf den Voyager-Fotos kann man deutlich ihren Schattenwurf erkennen.

Ein kleinerer dunkler Wirbel mit einem helleren Zentrum bei 54° südlicher Breite hat den Namen „D2“ bekommen.

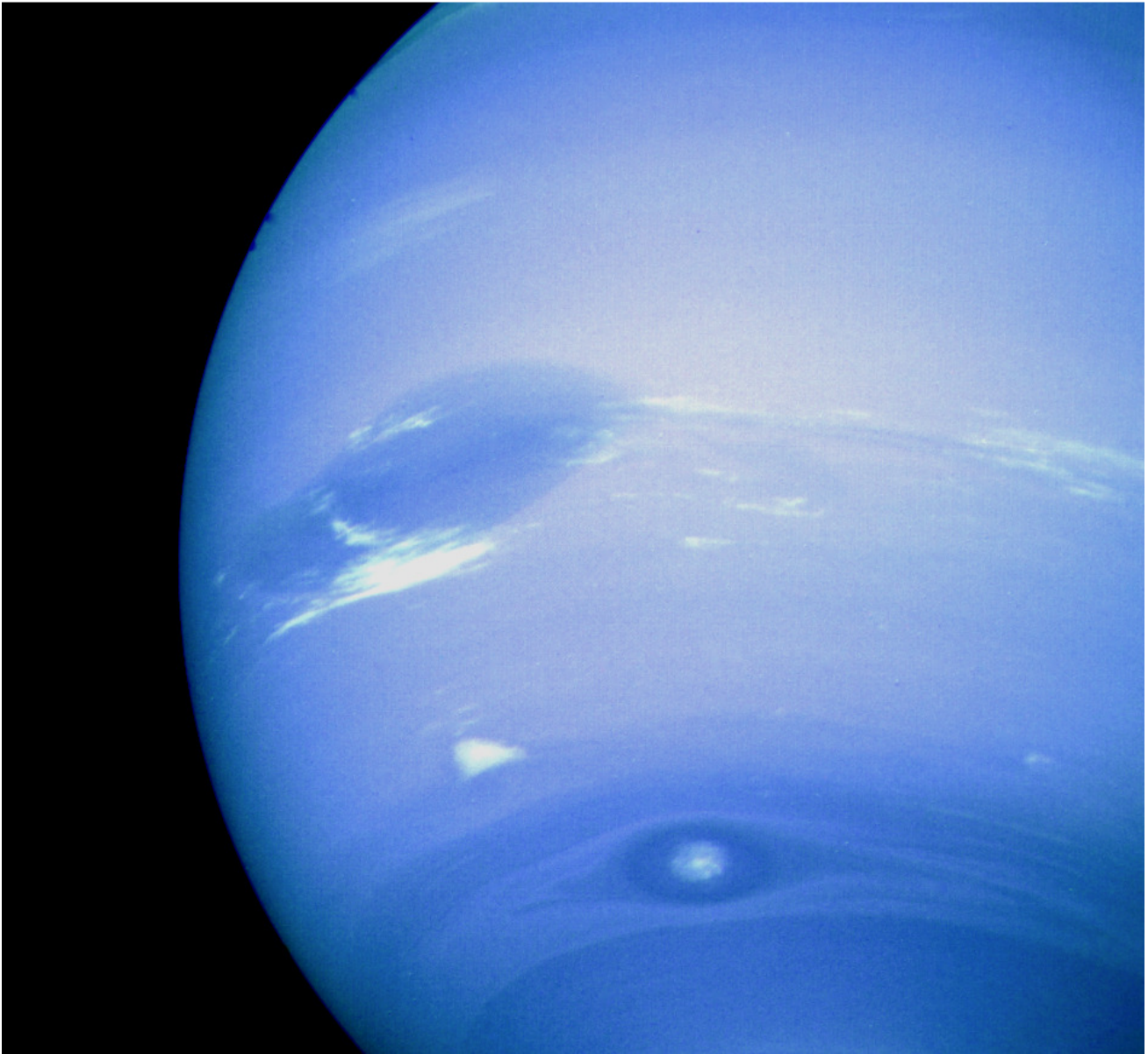
Die Temperatur  $T_w$  an der Wolkenobergrenze beträgt ungefähr 55 K und ist damit genauso groß wie bei Uranus. Aufgrund der größeren Entfernung erwartet man jedoch eine Gleichgewichtstemperatur  $T_g$  von ca. 43 K. Vergleicht man den Energiefluß bei diesen beiden Temperaturen, dann erhält man nach dem Stefan-Boltzmannsche Gesetz folgendes Verhältnis:

$$\frac{E_w}{E_g} = \left( \frac{T_w}{T_g} \right)^4 = 2.7 \quad [1.3]$$

Das bedeutet, daß eine innere Energiequelle die Atmosphäre von unten her heizt. Das erklärt auch die größere Dynamik und den größeren Strukturreichtum der Neptunatmosphäre gegenüber der eintönigeren Uranusatmosphäre.

Seitdem Neptun ab 1994 regelmäßig auf dem Beobachtungsprogramm des Hubble Weltraumteleskops steht, haben sich neue Erkenntnisse über das großräumige Wettergeschehen ergeben. Es scheint so, als ob sich die Strömungsverhältnisse in Zeiträumen von einigen Jahren ändern können. Einmal erscheinen einzelne weiße Wolken bevorzugt in den Polregionen, dann verschwinden sie wieder. Dafür

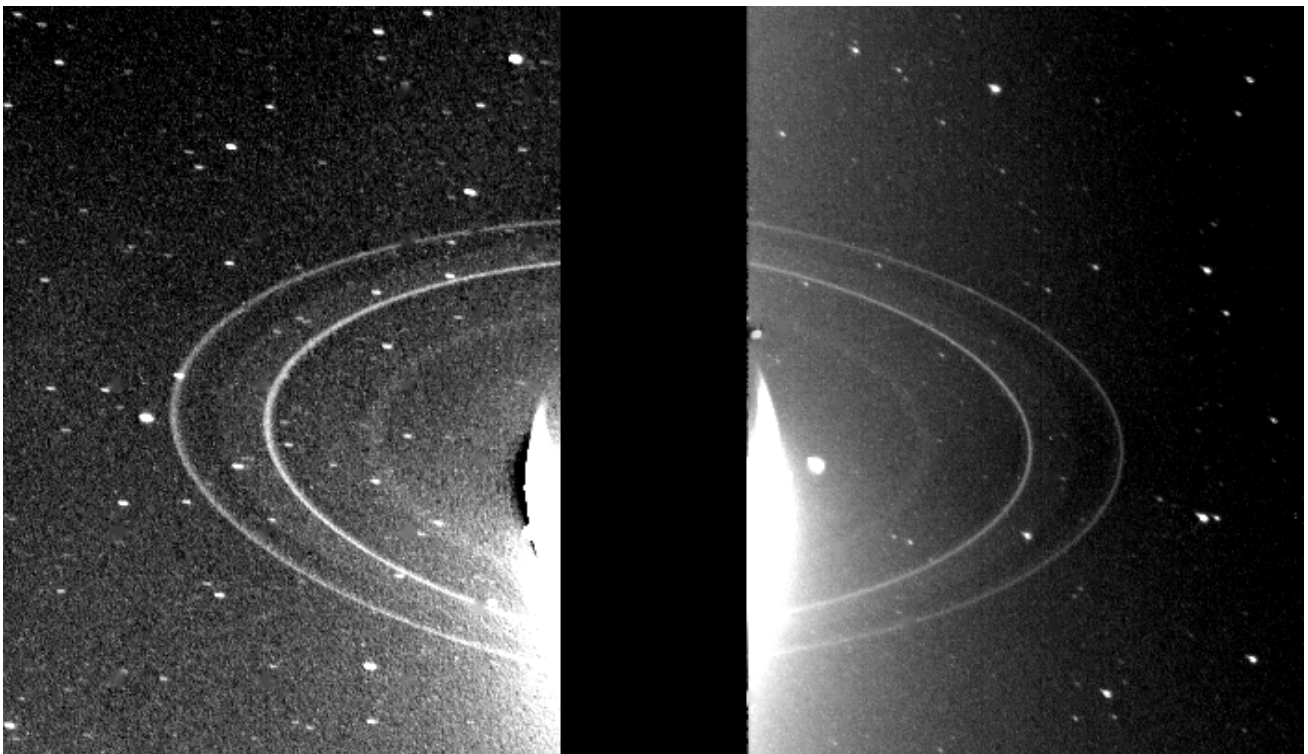
tauchen in den südlichen Breiten hellere Wolkenbänder auf, die ihre Position lange Zeit beibehalten. Kurz, die Neptunatmosphäre zeigt eine eigenartige Dynamik, die noch nicht ganz verstanden ist. Leider wird es noch sehr lange dauern bis sich wieder einmal eine Planetensonde in diesen Bereich des Sonnensystems verirrt und hilft die vielen Fragen zu beantworten, die Voyager 2 aufgeworfen hat und letztendlich unbeantwortet ließ.



Der sogenannte „Große Dunkle Fleck“ auf Neptun, umgeben von weißen Wolken aus gefrorenen Methan. Aufnahme Voyager

## Ringsystem

Der Erstdnachweis der Uranusringe bei einer Sternbedeckung hat dazu geführt, daß man auch Sternbedeckungen durch Neptun eine größere Aufmerksamkeit widmete. Ab 1984 waren diese Bemühungen von Erfolg gekrönt. Die Lichtkurven verschiedener Beobachtergruppen bei verschiedenen Sternbedeckungen zeigten zwar eindeutig, daß offensichtlich auch Neptun dünne Ringe besitzt, diese aber nicht kreisförmig sind, sondern eher die Gestalt von Bögen („Arcs“) haben. Alles in allem etwas rätselhaft. Während die Theoretiker noch zu erklären suchten warum das so ist, erreichte Voyager 2 1989 den Planeten und konnte die Ringe fotografieren. Insgesamt konnten 5 reguläre Ringe nachgewiesen werden. Der äußerste Ring, der den Namen „Adams“ erhalten hat, befindet sich in einem Abstand von ca. 62900 km vom Zentrum des Planeten. Er ist vollständig geschlossen, zeigt aber drei auffällige und zwei weniger auffällige Verdickungen mit einer Länge zwischen  $1^\circ$  und  $10^\circ$  innerhalb eines Segments von ca.  $40^\circ$ . Die drei Hellsten dieser „Bögen“ haben nach der Losung der Französischen Revolution von 1789 die für astronomische Objekte ungewöhnlichen Namen „Gleichheit“, „Freiheit“ und „Brüderlichkeit“ erhalten. Sie sind selbst von der Erde aus nachweisbar. Die Entstehung dieser „Arc’s“ ist dagegen schwerer zu verstehen. Sie haben offensichtlich etwas mit dem Mond Galatea und anderen, noch unbekannten Shepherd-Monden zu tun. Galatea hat einen Durchmesser von 158 km und bewegt sich in 0.429 Tagen einmal an der Innenkante des Adams-Rings um Neptun. Die Gravitationswirkung und die Bewegung dieser Monde führen nach Meinung einiger Wissenschaftler zu speziellen Resonanzonen auf dem Ring, wo sich dann die leichteren Ringpartikel, die wahrscheinlich aus Eis bestehen, bevorzugt ansammeln. Eis hat ein höheres Albedo als Gestein, wodurch diese Region heller als der übrige Ring erscheint.



Um die Ringe besser sichtbar zu machen, wurde Neptun aus dieser Voyager-Aufnahme ausgeblendet.

Wie Beobachtungen mit den 10m Keck-Teleskopen in den Jahren 2002 und 2003 zeigten, scheinen die „Arc’s“ keine stabilen Objekte zu sein. Alle Ringbögen mit Ausnahme von Liberte’ sind seit dem Besuch von Voyager 2 mehr oder weniger zerfallen und auch Letzterer ist in Auflösung begriffen. Auch ihre Positionen in Bezug zum Arc Fraternite’ haben sich deutlich verändert. Diese Beobachtungen sind durch eine Theorie gegenwärtig nur schwer zu erklären. Wahrscheinlich spielt bei diesem Auflösungsprozeß der Mond Galatea eine Rolle, der im Bereich der Neptunringe seine Bahn zieht. Auf jeden Fall verändern sich diese Ringstrukturen schneller als jemals erwartet wurde.

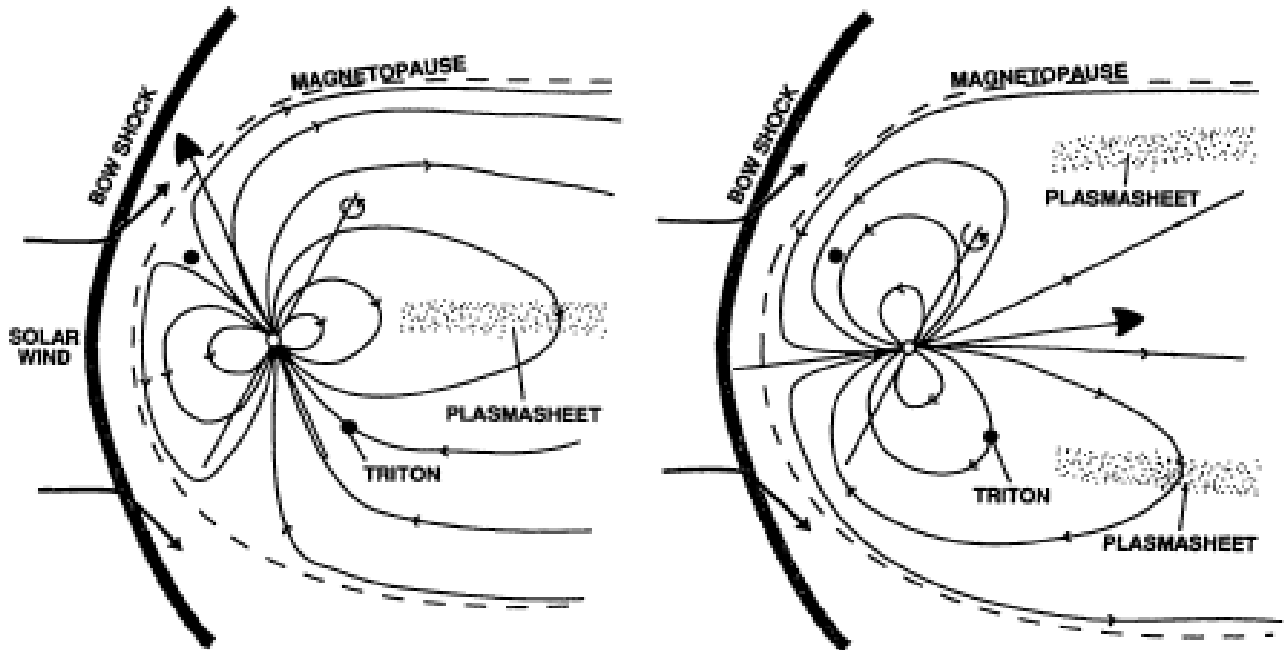
Neben dem außergewöhnlichen Außenring hat Neptun noch 4 weitere Ringe, die von Innen nach Außen mit den Namen „Galle“, „LeVerrier“, „Lassell“ und „Arago“ versehen wurden (DOMINIQUE FRANCOIS JEAN ARAGO (1786-1853) war Direktor der Pariser Sternwarte und hat als einer der Ersten einen unbekanntem Planeten zur Erklärung der Uranus-Störungen in die Diskussion gebracht). Galle und Lassell sind relativ breit, LeVerrier und Arago ziemlich schmal (siehe Tabelle). Sie bestehen überwiegend aus mikrometergroßen Staubteilchen und – zumindest Teile des Adams-Rings - aus Eispartikel.

Tabelle: Neptuns Ringe

	Radius [km]	Radius [Neptun-Radius]	Optische Dicke	Albedo	Breite [km]
Neptun Äquator	24766	1.000			
Galle	~41900	1.692	~0.00008	~0.015	~2000
LeVerrier	~53200	2.148	~0.002	~0.015	~110
Lassell	~53200	2.148	~0.00015	~0.015	~4000
Arago	~57200	2.310			~100
-	61950	2.501			
Adams	62933	2.541	~0.0045	~0.015	~50
Courage	62933	2.541	0.12		~15
Liberte	62933	2.541	0.12		~15
Egalite’ 1	62933	2.541	0.12	~0.04	~15
Egalite’ 2	62933	2.541	0.12	~0.04	~15
Fraternite’	62933	2.541	0.12		~15

## Magnetfeld

Genauso wie Uranus fällt auch bei Neptun die starke Neigung des Magnetfeldes zur Rotationsachse auf ( $47^\circ$ ). Das Zentrum des Dipolfeldes ist sogar um 0.55 Neptunradien gegenüber der Planetenmitte versetzt. Auch die Magnetfeldstärke an der Wolkenobergrenze ist mit ca.  $10 \mu\text{T}$  (variabel aufgrund des Offsets) im Vergleich zum Uranus nur geringfügig geringer.



Da durch die Rotation des Planeten das Magnetfeld spiralförmig verdreht wird, können sich im Inneren der Magnetosphäre keine stärkeren Strahlungsgürtel ausbilden. Die in diesem Bereich angetroffenen Wasserstoff- und Stickstoffionen stammen zum größten Teil aus der Atmosphäre des Neptunmondes Triton. Aus den Voyager 2 -Daten hat man abgeschätzt, daß dieser Mond pro Sekunde ca. 200 g Stickstoff- und Wasserstoffionen an die Magnetosphäre abgibt. Das koinzidiert mit der Entdeckung eines Torus aus Wasserstoffgas im Bereich seiner Umlaufbahn mit einer Teilchendichte von ungefähr  $300 \text{ Teilchen pro cm}^3$ , wobei jedoch die Ionendichte innerhalb dieses Torus rund 10000 fach geringer ist als die Dichte der neutralen Gaskomponente.

<b>Daten</b>	
<b>BAHNPARAMETER</b>	
Große Halbachse ( $10^6$ km)	4495.06
Umlaufszeit (siderisch) in Tagen	60189
Umlaufszeit (tropisch) in Tagen	59799.9
Perihelabstand ( $10^6$ km)	4444.45
Aphelabstand ( $10^6$ km)	4545.67
Mittlere Bahngeschwindigkeit (km/s)	5.43
Max. Bahngeschwindigkeit (km/s)	5.50
Min. Bahngeschwindigkeit (km/s)	5.37
Bahnneigung (Grad)	1.769
Numerische Exzentrizität	0.0113
Sidereale Rotationsperiode (Stunden)	16.11
Länge eines Tages (Stunden)	16.11
<b>PLANETENPARAMETER</b>	
Masse ( $10^{24}$ kg)	102.43
Volumen ( $10^{10}$ km <sup>3</sup> )	6254
Äquatorradius (km) 1 bar Niveau	24764
Polradius (km) 1 bar Niveau	24341
Abplattung	0.01708
Mittlere Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	1.638
Schwerebeschleunigung (m/s <sup>2</sup> ) 1 bar Niveau	11.15
Entweichgeschwindigkeit (km/s)	23.5
Albedo	0.290
Geometrisches Albedo	0.41
Solarkonstante (W/m <sup>2</sup> )	1.51
Strahlungstemperatur (K)	46.6
<b>ATMOSPHÄRE</b>	
Dichte bei p=1 bar (kg/m <sup>3</sup> )	~0.45
Skalenhöhe (km)	19.1-20.3
Temperatur bei p=1 bar (K)	~72
Mittleres Molekulargewicht (g/mol)	2.53-2.69



## **Literatur zum Thema**

K. Lindner: **Taschenbuch der Astronomie**, Fachbuchverlag Leipzig, 1997

H. Bernhard, K.Lindner, M.Schukowski: **Wissenspeicher Astronomie**, Volk und Wissen 1995

A.Unsöld, B.Baschek: **Der neue Kosmos**, Springer-Verlag 2004

A.Weigert, H.J. Wendker: **Astronomie und Astrophysik**. Ein Grundkurs, Wiley-VCH 2004

H. Karttunen et.al.: **Fundamental Astronomy**, Springer-Verlag 2000

B.W. Jones: **Discovering the Solar System**, Wiley 2000

McBride, Gilmour: **Introduction to the Solar System**, Cambridge University Press 2004

McNab, Younger: **Die Planeten**, RM Buch- und Medienvertrieb 1999



## Index

### A

Adams, John Couch 82  
Amalthea, Jupitermond 29  
Antizyklone, Jupiter 16  
Arago, Dominique Francois Jean 88  
Arcs 87  
Ariel, Uranusmond 67  
Atlas, Saturnmond 50, 56  
Atmosphäre, Jupiter 13  
Atmosphäre, Neptun 85  
Atmosphäre, Saturn 44  
Atmosphäre, Uranus 70

### B

Benbedetti, Robin 70  
Bessel, Friedrich Wilhelm 82  
BiegeWellen 59  
Blitze, Jupiter 14  
Bode, Johann Elert 67  
Bouvarde, A. 82  
Bradley, James 67  
Burke, Bernard 33

### C

Cassini (Sonde) 2, 4, 5, 17, 29, 39, 40, 44, 45, 46, 47, 48, 49,  
50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 61, 63, 64  
Cassini 'sche Trennung 38, 46, 49, 50  
Cassini, Giovanni D. 38  
Copernicus, Nicolaus 5  
Cordelia, Uranusmond 76  
Corioliskraft 7, 15

### D

d'Arrest, H.L. 82  
Daphnis, Saturnmond 50  
Diamant 70, 84  
Dichtewellen 50  
Dunham, E. 68

### E

Eis 10, 21, 28, 43, 52, 54, 56, 69, 84, 87  
Elektroglühen 73, 78  
Elliot, J.L. 68  
Elliot, James L. 75

Enceladus, Saturnmond 52, 53, 54, 61, 76  
Encke, Johann Franz 39  
Encke-Teilung 39, 46, 49, 50  
Epimetheus, Saturnmond 52, 56  
Europa (Jupitermond) 4, 6, 66

### F

Flamsteed, John 67  
Franklin, Kenneth 33

### G

Galatea, Neptunmond 87, 88  
Galilei, Galileo 4, 38, 80, 82  
Galileischen Monde 4  
Galileo (Sonde) 4, 5, 6, 8, 13, 15, 17, 19, 24, 25, 28, 29  
Galle, Johann Gottfried 82  
Ganymed (Jupitermond) 4  
Georg III von England 67  
Gezeitenkräfte 56  
Gleichgewicht, hydrostatisches 40  
Gleichgewichtsfigur 40  
Gossamer-Ringe, Jupiter 29, 30  
Gravitationspotential 40  
Großer Dunkler Fleck (GDS) 85  
Großer Roter Fleck (GRF) 5, 14, 15, 16, 17  
Großplaneten 2  
Guillot 43

### H

Hedman 59  
Herschel, Friedrich Wilhelm 38, 54, 66, 67, 81  
Herschel, John Frederick William 67  
Herschel, Karoline 67  
Hochdruckexperimente 8  
Hooke, Robert 5, 17  
Hubble, Weltraumteleskop 3, 6, 18, 23, 24, 27, 36, 39, 41, 68,  
72, 73, 74, 76, 77, 83, 85  
Huygens, Christian 38

### I

Innere Aufbau, Uranus 69  
Innerer Aufbau, Jupiter 8  
Innerer Aufbau, Neptun 84  
Innerer Aufbau, Saturn 42  
Io (Jupitermond) 4, 6, 7, 34, 35, 36  
Ionosphäre, Saturn 61  
IUE 24

## J

Janus, Saturnmond 52, 56  
Jetstream, Jupiter 17  
Jones, G. 60

## K

Kallisto (Jupitermond) 4, 6  
Keeler, James 39  
Keeler-Teilung 50  
Kirkwood, Daniel 56  
Kuiper, Gerard P. 67  
Kuiper-Airborne-Observatorium 75

## L

Lalande, J.J.L. 82  
Laplace, Pierre Simon de 38  
Laplace-Resonanz 56  
Lassell, William 67, 82  
Lemonnier, Pierre Charles 67  
Leverrier, Urbain Jean Joseph 82  
Levy, David H. 5, 23  
Lichtgeschwindigkeit, Bestimmung 5  
Lissauer, J. 76  
Loubeyre, Paul 9

## M

Mac Low, Mordecai-Mark 27  
Magnetfeld, Jupiter 33  
Magnetfeld, Neptun 89  
Magnetfeld, Saturn 61  
Magnetfeld, Uranus 78  
Magnetosphäre, Jupiter 33, 34, 35, 36, 61, 62, 64, 78, 89  
Marius, Simon 4  
Maxwell, James Clerk 39  
Maxwell-Lücke 48  
Mayer, Tobias 67  
Mie-Streuung 29  
Mimas, Saturnmond 49, 52, 56, 59, 61  
Mink, D. 68  
Miranda, Uranusmond 67

## N

Navier-Stokes-Gleichungen 18

## O

Oberon, Uranusmond 67  
Ophelia, Uranusmond 76

## P

Pallene, Saturnmond 52  
Pan, Saturnmond 50, 56  
Pandora, Saturnmond 51, 56, 57, 59  
Pioneer (10) 5  
Pioneer (11) 5, 28  
Pluto 5  
Pope, Alexander 67  
Poynting, John Henry 30  
Poynting-Robertson-Effekt 30, 55, 76  
Prometheus, Saturnmond 51, 56, 57, 58, 59

## R

Resonanzen 56  
Riesenplaneten 2  
Ringatmosphäre 61  
Ringlets 50  
Ringsystem, Jupiter 28  
Ringsystem, Neptun 87  
Ringsystem, Saturn 46  
Ringsystem, Uranus 74  
Robertson, Howard Percy 30  
Roche-Grenze 56, 76  
Römer, Olaf 5  
ROSAT 24  
Rossby-Zahl 15, 16  
Rotationsdauer, Jupiter 6  
Rotationssysteme, Jupiter 6

## S

Sagan, Carl Edward 74  
Saumon 43  
Shakespeare, William 67  
shepherd moon 50, 51, 57, 59, 76, 87  
Shoemaker, Caroline 5, 23  
Shoemaker, Eugene 5, 23  
Shoemaker-Levy 9, Komet 5, 14, 23, 27  
Showalter, M. 76  
Sonnenwind 34  
spokes, Saturnring 48, 60

Strahlungsdruck 55  
Strahlungsgürtel, Jupiter 33  
Strahlungsgürtel, Saturn 61  
Strahlungsüberschuß 43, 85  
Strahlungsüberschuß, Jupiter 11

## T

Thebe, Jupitermond 29  
Thommes, E. 2  
Titan, Saturnmond 62  
Titania, Uranusmond 67  
Trägheitsmoment 40

## U

Ulysses 5, 24  
Umbriel, Uranusmond 67

## V

Virialsatz 44  
Voyager (1) 4, 5, 7, 28, 40, 46, 47, 50, 62  
Voyager (2) 3, 29, 30, 34, 40, 44, 50, 59, 67, 68, 69, 70, 75,  
78, 82, 83, 85, 86, 87, 88, 89

## W

Wasserstoff, metallischer 8, 9, 11, 43, 69  
Wasserstoff, Phasendiagramm 11  
Weiße ovale Flecke (WOS) 16, 18  
Wigner, Eugen P. 9  
Windsysteme, Jupiter 15  
Wolkenformationen, Jupiter 15

## Z

Zyklone, Jupiter 16

