

Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2006

Eva Arazimová

Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Eva Arazimová

### Obří planety sluneční soustavy

Astronomický ústav UK

Vedoucí bakalářské práce: Doc. RNDr. Marek Wolf, CSc.

Studijní program: Fyzika, obecná fyzika

2006

Ráda bych na tomto místě poděkovala všem, kteří mi byli nápomocni při tvorbě této práce. Zvláště pak děkuji vedoucímu práce, Doc. RNDr. Marku Wolfovi, CSc., za cenné rady a odborné vedení.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce.

V Praze dne 16. února 2006

Eva Arazimová

# Obsah

<b>Abstrakt</b>	<b>5</b>
<b>1 Sluneční soustava jako celek</b>	<b>6</b>
1.1 Vznik . . . . .	6
1.2 Klasifikace objektů . . . . .	6
1.2.1 Slunce . . . . .	6
1.2.2 Planety . . . . .	8
1.2.3 Měsíce . . . . .	10
1.2.4 Planetky . . . . .	11
1.2.5 Komety . . . . .	11
1.2.6 Meteorická hmota . . . . .	12
<b>2 Jupiter</b>	<b>13</b>
2.1 Stavba a složení . . . . .	13
2.2 Atmosféra . . . . .	14
2.3 Magnetosféra . . . . .	15
2.4 Prstence . . . . .	16
2.5 Měsíce . . . . .	18
<b>3 Saturn</b>	<b>23</b>
3.1 Stavba a složení . . . . .	23
3.2 Atmosféra . . . . .	24
3.3 Magnetosféra . . . . .	25
3.4 Prstence . . . . .	25
3.5 Měsíce . . . . .	28
<b>4 Uran</b>	<b>33</b>
4.1 Stavba a složení . . . . .	33
4.2 Atmosféra . . . . .	34
4.3 Magnetosféra . . . . .	35
4.4 Prstence . . . . .	35
4.5 Měsíce . . . . .	36

<b>5 Neptun</b>	<b>40</b>
5.1 Stavba a složení . . . . .	40
5.2 Atmosféra . . . . .	41
5.3 Magnetosféra . . . . .	42
5.4 Prstence . . . . .	42
5.5 Měsíce . . . . .	43
<b>6 Závěr</b>	<b>47</b>
<b>Literatura</b>	<b>57</b>

Název práce: Obří planety sluneční soustavy

Autor: Eva Arazimová

Katedra: Astronomický ústav UK

Vedoucí bakalářské práce: Doc. RNDr. Marek Wolf, CSc.

e-mail vedoucího: wolf@mbox.cesnet.cz

Abstrakt: Cílem této bakalářské práce je přehledně shrnout současné poznatky o velkých planetách sluneční soustavy a velké planety na základě těchto informací porovnat. V první části práce, nazvané Sluneční soustava jako celek, jsme se zabývali jejím vznikem a klasifikací v ní se nacházejících objektů. Shrnuli jsme základní vlastnosti centrálního tělesa sluneční soustavy, Slunce, a vlastnosti a rozdělení planet, měsíců, planetek, komet a meteorické hmoty. V dalších kapitolách jsou zpracovány postupně planety Jupiter, Saturn, Uran a Neptun. Na začátku každé kapitoly se nachází stručný úvod charakterizující těleso planety a její pohyb, za kterým následují podkapitoly pojednávající o stavbě a složení planety, její atmosféře, magnetosféře, prstencích a měsících. Pro větší přehlednost byly do textu vloženy převzaté obrázky dokumentující diskutované vlastnosti planet a také původní graf závislosti sklonu dráhy měsíců planet na jejich velké poloose. V závěru práce jsme planety rozdělili na plynné a ledové obry, odůvodněnost rozdělení jsme ukázali na jejich rozdílné stavbě a složení a porovnali jsme jejich další vlastnosti.

Klíčová slova: sluneční soustava, plynní obří, ledoví obří, Kelvin-Helmholtzův mechanismus, gravitační rezonance

Title: Giant planets in the Solar System

Author: Eva Arazimová

Department: Astronomical Institute of the Charles University

Supervisor: Doc. RNDr. Marek Wolf, CSc.

Supervisor's e-mail address: wolf@mbox.cesnet.cz

Abstract: The aim of this bachelor work is to overview current knowledge about the giant planets of the Solar System and to compare them on the basis of this information. In the first part of the work named The Solar System as the whole we dealt with its origin and classification of the objects situated inside. We resumed the basic features of the central body of the Solar System, the Sun, and characteristics and division of planets, satellites, asteroids, comets and meteor material. The planets Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune are dealt with in sequence in further chapters. There we situated a brief preface characterising the body and the motion of the planet, behind which subchapters dealing with the construction and composition, atmosphere, magnetosphere, rings and satellites of the planet are following. For the purpose of a better illustration we embedded taken figures documenting the discussed features of the planets and also an original plot of inclination-semimajor axis characteristic of the planetary satellites into the script. In the conclusion of the work we divided the planets into gaseous and ice giants, the reasonability of the division we demonstrated on their different construction and composition and we compared their further aspects.

Keywords: Solar System, gaseous giants, ice giants, Kelvin-Helmholtz mechanism, gravitational resonance

# Kapitola 1

## Sluneční soustava jako celek

### 1.1 Vznik

Sluneční soustava vznikla před 4,56 miliardami let. Tento časový údaj byl určen metodou radionuklidů použitou na chondritické meteority. Vznikla z oblaku mezihvězdného plynu a prachu, který se, možná v důsledku exploze blízké supernovy, začal hroutit. Centrální část oblaku se gravitačně smršťovala a začala se zahřívat, dokud nebyla teplota tak vysoká, že došlo ke spuštění termonukleárních reakcí. Vnější část oblaku se kvůli zachování momentu hybnosti zploštila na disk s největší hustotou v jeho střední rovině. Část tohoto materiálu postupně ztuhla a vznikl tak roj malých úlomků hmoty gravitačně vázaných ke Slunci. Tyto částičky prošly procesem dalšího nahromadění a spojování, který posilností vzájemných působení a poruch, gravitačních i negravitačních, dal vzniknout množství různých těles, které nyní pozorujeme ve sluneční soustavě. Ve vnější části mlhoviny byla také největší tělesa schopna nahromadit značné množství plynu a projít částečným zhroucením. Utvořila se tak kolem nich mlhovina, ze které vznikly podobnými procesy shlukování a spojování jejich měsíce. Tato teorie vzniku sluneční soustavy z pramlhoviny vychází z myšlenek I. Kanta a P. S. Laplace a současná představa o průběhu procesu byla vyvinuta v 50. a 60. letech minulého století O. Yu. Schmidtem, V. S. Safronovem a jejich spolupracovníky.

### 1.2 Klasifikace objektů

#### 1.2.1 Slunce

Slunce je centrálním tělesem sluneční soustavy a obsahuje 99,9% veškeré její hmoty. Hmotnost Slunce je  $1,989 \cdot 10^{30}$  kg, průměrný poloměr  $6,96 \cdot 10^8$  m a střední hustota činí  $1408 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Nachází se v rovině Galaxie ve vzdálenosti přibližně 8,5 kpc od jejího středu, kolem kterého obíhá rychlostí asi  $220 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  za  $2,3 \cdot 10^8$  let. Střední doba siderické rotace činí 25,38 dne a závisí na heliografické šířce. Spektrální typ Slunce je G2V a patří mezi hvězdy hlavní posloupnosti. Ze zářivého výkonu Slunce, který činí  $384,6 \cdot 10^{24}$  W, lze odvodit jeho efektivní teplotu pomocí Stefanova–Boltzmannova zákona

$$E = \sigma T^4, \quad (1.1)$$

kde  $E$  je zářivý tok,  $\sigma$  Stefanova–Boltzmannova konstanta a  $T$  teplota. Povrchová teplota Slunce je tedy 5770 K.

Tabulka 1.1: Hlavní chemické složky Slunce podle množství atomů. Převzato z Beatty, Chaikin (1990).

prvek	zastoupení [%]
vodík	92,1000
helium	7,8000
kyslík	0,0610
uhlík	0,0300
dušík	0,0084
neon	0,0076
železo	0,0037
křemík	0,0031
hořčík	0,0024
síra	0,0015
ostatní	0,0015

Stavba Slunce:

- jádro – panují zde extrémní podmínky, teplota dosahuje až  $1,57 \cdot 10^7$  K, tlak  $2,48 \cdot 10^{16}$  Pa a hustota  $1,62 \cdot 10^5$  kg·m<sup>-3</sup>. Probíhají zde termonukleární reakce.
- zářivá vrstva – energie uvolněná z jádra se touto vrstvou šíří k povrchu ve formě fotonů.
- konvektivní vrstva – v této vrstvě dochází k přenosu energie konvekcí, tedy prouděním tekutin. Vrcholy konvektivních proudů sahají do fotosféry, kde je pozorujeme jako granulaci.
- fotosféra – vnější vrstva Slunce, ze které přichází viditelné záření. Tloušťka této vrstvy je přibližně 200 km. Na ní můžeme pozorovat různé povrchové útvary, z nichž nejznámější jsou sluneční skvrny. Jedná se o oblasti s nižší teplotou, asi kolem 4000 K, které se jeví jako tmavé skvrny na slunečním disku. Výraznější skvrny mají dvě části, střední tmavou umbru obklopenou penumbrou. Skvrny se často vyskytují ve skupinách.
- chromosféra – načervenalá vrstva sluneční atmosféry o výšce přibližně  $10^4$  km viditelná přímo jen při úplných zatměních Slunce nebo v některých spektrálních čarách pomocí koronografu. V chromosféře lze pozorovat erupce, náhlá a rychlá uvolnění hmoty z fotosféry, a do koróny vybíhající protuberance, při nichž dochází k přemístění hmoty z jednoho místa na druhé.

- koróna – vnější, velmi rozsáhlá a řídká atmosféra obklopující Slunce do vzdálenosti mnoha miliónů kilometrů. Koróna nemá žádné zřetelné ohraničení a plynule přechází do meziplanetárního prostoru. Ve viditelné oblasti spektra je přímo pozorovatelná jen při úplných zatměních, nepřímo pomocí koronografu. Vzhled koróny se mění v závislosti na sluneční činnosti. V době minima sluneční činnosti je v rovníkových oblastech velmi protáhlá a u pólů vystupují jen ojedinělé koronální paprsky. V období maxima je poměrně symetricky rozložena kolem celého slunečního disku.

Sluneční činnost kolísá takřka pravidelně s periodou 8 - 13 let. Měřítkem sluneční činnosti je především množství skvrn, které udává relativní číslo  $R$

$$R = konst \cdot (10g + f), \quad (1.2)$$

kde  $f$  je počet skvrn,  $g$  počet skupin skvrn a  $konst.$  je především závislá na průměru objektivu použitého dalekohledu. Na počátku cyklu vznikají skvrny ve vysokých heliografických šířkách nad  $30^\circ$  a během dalšího vývoje skvrny sestupují do nižších heliografických šířek. Tento vývoj, tzv. Spörerův zákon, je graficky znázorněn motýlkovým diagramem. Dva po sobě následující cykly se od sebe liší změnou polarit ve skupinách skvrn.

## 1.2.2 Planety

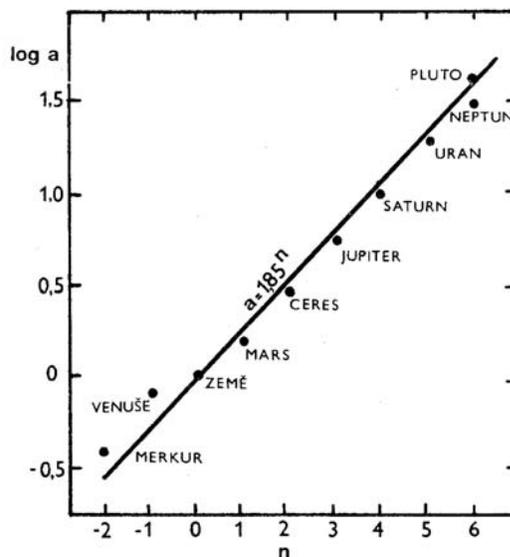
Planetou rozumíme těleso s hmotností v intervalu od  $10^{-2} M_Z$  do  $10^2 M_Z$ , kde  $M_Z$  je hmotnost Země. Ve sluneční soustavě je 9 planet: Merkur, Venuše, Země, Mars, Jupiter, Saturn, Uran, Neptun a Pluto. Jsou to po Slunci nejtěžší tělesa, jejich celková hmotnost je 0,15% hmotnosti Slunce. Zatímco Slunce obsahuje 99,9% veškeré hmoty sluneční soustavy, orbitální pohyb planet představuje 98% jejího celkového momentu hybnosti. Dráhy planet jsou elipsy s malou výstředností ležící téměř v jedné rovině. Smysl pohybu planet kolem Slunce je stejný a souhlasí se smyslem rotace Slunce samotného. Velké poloosy drah planet vyhovují přibližně Titiově-Bodeově řadě

$$a_n = a_0 k^n, \quad (1.3)$$

kde  $a_0 = 1$  AU,  $k = 1,85$  a  $n$  je pořadové číslo planety volené tak, že pro Zemi je  $n = 0$ , pro Venuši  $n = -1$ , pro Mars  $n = 1$  atd.

Planety lze podle jejich vlastností rozdělit do tří základních skupin:

- terestrické planety – planety zemského typu. Do této skupiny řadíme Merkur, Venuši, Zemi a Mars. Tyto planety obíhají nejbližší Slunci a mají malou hmotnost i objem, ale velkou hustotu. To je důsledek počátečních fází vzniku sluneční soustavy, při kterých byly prasluncem vypuzeny lehké plyny z vnitřní oblasti protoplanetárního disku. Mají pevný povrch tvořený horninami, převážně křemičitany. Při vzniku těchto planet došlo k diferenciaci, při které klesaly těžké kovy ke středu protoplanet a lehké stoupaly k jejich povrchu. Tak se utvořila dnešní stavba terestrických planet: velké



Obrázek 1.1: Grafické znázornění Titiovy-Bodeovy řady. Plně vytažená čára vyhovuje vztahu  $\log a = n \cdot \log 1,85$ , kde  $n$  je celé číslo vyjadřující pořadí planety. Vzdálenost  $a$  je vyjádřena v astronomických jednotkách. Planety Neptun a Pluto se považují za dvojplanety, a proto pro obě platí  $n = 6$ . Body vyznačují skutečnou střední hodnotu  $\log a$ . Převzato z Vanýšek (1980).

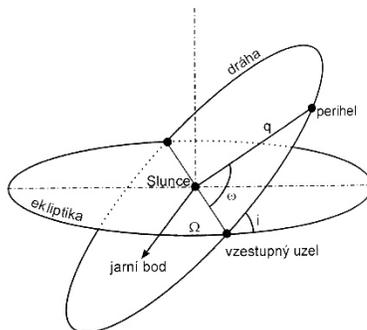
a těžké jádro ve středu planety obklopené pláštěm a pevnou kůrou z křemičitanů. Primární atmosféry z H a He si planety neudržely kvůli slabé gravitaci a také působením slunečního záření. Vznikly u nich atmosféry druhotné, a to odplyňováním vlastních jader a jader dopadlých komet. Pro tyto planety je typická pomalá rotace, nepřítomnost prstenců a jen velmi malé množství měsíců.

- velké planety – Jupiter, Saturn, Uran a Neptun. Jedná se o planety z vnější části planetární soustavy. Jsou rozměrově velké a velmi hmotné, ale mají nízkou hustotu. Jsou tvořeny převážně lehkými plyny. Ve vnějších částech disku totiž nejenom zůstal původní plyn s prachem, ale navíc sem byly přivátý plyny z jeho vnitřní části. U této skupiny planet neproběhla diferenciace. V důsledku své velké gravitace a vzdálenosti od Slunce si zachovaly hustou primární atmosféru. Rotují velmi rychle a mají velké množství prstenců i měsíců.
- ledová tělesa – Pluto. Jedná se o nejmenší planetu, je menší než 7 měsíců sluneční soustavy a bylo objeveno teprve v roce 1930. Po 228 let je Pluto nejvzdálenější planetou a 20 let je Slunci blíže než Neptun. Jeho dráha má velkou výstřednost a větší sklon než ostatní planety. Se svým měsícem Charonem tvoří díky srovnatelným hmotnostem obou těles dvojplanetu. Skládá se z jádra tvořeného křemičitany, silné vrstvy vodního ledu a pevného povrchu. Mezi planety je Pluto uváděno spíše z historických důvodů, svými vlastnostmi se řadí do skupiny transneptunických těles.

Elementy dráhy tvoří šest základních veličin, které popisují dráhu určitého tělesa kolem tělesa centrálního. Jsou to: a)  $a$  - velká poloosa dráhy tělesa, b)  $e$  - číselná výstřednost, tedy poměr vzdálenosti ohniska od středu a velké poloosy, c)  $i$  - sklon dráhy k základní rovině, u planet sklon vůči rovině ekliptiky, u měsíců k rovině rovníku dané planety, d)  $\Omega$  - délka vzestupného uzlu, u planet úhlová vzdálenost vzestupného uzlu od jarního bodu, e)  $\omega$  - argument šířky perihelu, tedy vzdálenosti perihelu od uzlové přímky (spojnice vzestupného a sestupného uzlu dráhy tělesa) měřená v rovině dráhy tělesa, f)  $T_0$  - doba průchodu tělesa perihelium, jejíž pomocí lze řešit Keplerovu rovnici

$$M = E - e \cdot \sin E, \quad (1.4)$$

kde  $M$  je střední anomálie,  $E$  excentrická anomálie a  $e$  číselná výstřednost dráhy. Velká poloosa a výstřednost určují tvar a velikost dráhy, sklon dráhy k základní rovině a délka vzestupného uzlu udávají polohu roviny dráhy v prostoru, argument šířky perihelu orientaci dráhy v této rovině a doba průchodu tělesa perihelium polohu tělesa v této dráze. Známe-li všech šest elementů dráhy, můžeme vypočítat polohu vyšetřovaného tělesa vzhledem k tělesu centrálnímu v libovolném okamžiku.



Obrázek 1.2: Elementy dráhy. Převzato z Kleczek (2002).

### 1.2.3 Měsíce

Měsíce jsou tělesa, která obíhají kolem planet. Od planet se tedy liší počtem pohybů, protože vykonávají o jeden pohyb více než planety. K 26. září 2005 bylo ve sluneční soustavě známo 153 satelitů. Počty přirozených měsíců planet k tomuto datu jsou následující: Země 1, Mars 2, Jupiter 62, Saturn 47, Uran 27, Neptun 13 a Pluto 1. Celková hmotnost všech měsíců představuje pouze 12% hmotnosti Země. Dráhami měsíců jsou elipsy a jejich rotace je většinou vázaná, tedy taková, že trvání jedné otočky se rovná oběžné době kolem planety. Původně se zřejmě satelity otáčely v různých periodách. Vzájemné slapové působení měsíce a planety ale vedlo ke zpomalení rotace obou těles, které bylo u satelitu natolik výrazné, že přešel do vázané rotace. Měsíce planet představují velice různorodou skupinu objektů.

Nejtypičtější měsíce vznikly přímo během procesu vzniku velkých planet, zejména Jupitera a Saturna. Slunce se vytvořilo uprostřed prachoplynného protoplanetárního disku a planety se zformovaly z jeho středních a obvodových částí procesem akrece. Jupiter se Saturnem, Uranem a pravděpodobně i Neptunem se zřejmě vytvářely podobným procesem jako Slunce, ale v menších prachoplynných discích. Ze středové oblasti každého disku vznikly planety, z okrajových částí pak jejich měsíce. Tímto procesem vznikly větší satelity sluneční soustavy, jako například Io, Europa, Ganymed, Kallisto, Titan, Miranda, Ariel, Umbriel, Titania nebo Oberon. Obíhají ve střední oblasti soustavy měsíců dané planety blízko roviny jejího rovníku a jejich dráhy jsou velice blízké kružnicím.

Druhý typ satelitů obíhá blízko svých centrálních planet. Jde většinou o nevelké objekty, jejich dráhy mají malou excentricitu a jejich rotace je vázaná. Řada těchto měsíců vykazuje těsnou souvislost se soustavou prstenců planety a jde tedy buď o původní měsíce planet, nebo by mohlo jít o planetky či planetesimály, které byly zachyceny z heliocentrických drah v době, kdy byla ještě vznikající planeta obklopena plynným oblakem.

Třetí typ satelitů vznikl zachycením už vzniklých těles, planetek. Byly nalezeny u všech velkých planet. Jde o satelity ve velké vzdálenosti od planety. Typický je pro ně sklon dráhy od  $140^\circ$  do  $170^\circ$ . Při pohledu od severního nebeského pólu planety obíhají retrográdně, tedy ve směru otáčení hodinových ručiček. Dráhy těchto satelitů mají větší excentricitu. Většinou jde o objekty velikosti jen několika kilometrů, a tedy nepravidelného tvaru.

#### 1.2.4 Planetky

Planetka je křemičitanové nebo kovové těleso s průměrem menším než 1000 km, které obíhá kolem Slunce. Mezi objekty sluneční soustavy představují planetky nejpočetnější skupinu těles. Počet katalogizovaných planetek je větší než  $3 \cdot 10^5$ , z čehož asi 50000 těles má velice přesně určenou dráhu a bylo označeno katalogovým číslem. 95% všech planetek obíhá kolem Slunce v mírně excentrických a skloněných drahách v oblasti od 2,1 do 3,3 AU, kterou nazýváme hlavní pás asteroidů. V tomto pásu byla při vzniku sluneční soustavy přerušena akrece tělesa velikosti planety a zůstala zde populace asteroidů. Rozborem drah planetek bylo zjištěno, že jsou vzácné případy, kdy doba oběhu je jednoduchý zlomek doby oběhu Jupitera. Tyto mezery v rozdělení oběžných drah jsou způsobeny rušivými účinky Jupitera na dráhy planetek a nazývají se Kirkwoodovy mezery. Určitou výjimku zde představuje skupina planetek Trojanů, které se nacházejí v libračních bodech  $L_4$  a  $L_5$  systému Jupiter-Slunce. Největší planetkou je Ceres s průměrem 974 km, poté následují Pallas a Vesta s průměry nad 500 km a Juno s průměrem nad 250 km. Tato tělesa mají kulový tvar. Nejmenší planetky mají rozměry několika set metrů a tvar nepravidelný.

#### 1.2.5 Komety

Kometa je malé těleso sluneční soustavy obíhající po značně excentrické dráze kolem Slunce. Skládá se z jádra s rozměry řádově v kilometrech, které je tvořeno zmrzlými plyny, v nichž jsou zamrzlé prachové částice. Dále z komy s rozměry řádově ve statisících až milionech kilometrů a ohonu dlouhého řádově desítky milionů kilometrů a obsahujícího především  $\text{CO}^+$ ,

$\text{CO}_2^+$ ,  $\text{CH}^+$  a  $\text{N}_2^+$ . Tlak záření ze Slunce vyvolává uvolňování a následné proudění plynu a prachu z komy a vytváří tak ohon. V závislosti na složení rozlišujeme dva typy ohonů, plynné a prachové. Od planetek se komety liší především difúzním vzhledem a drahou.

Komety dělíme na krátkoperiodické, jejichž oběžná doba je menší než 200 let. Jejich dráhy jsou uvnitř planetární soustavy a byly zachyceny velkými planetami. Pocházejí patrně z Kuiperova pásu, který tvoří pokračování planetární soustavy za dráhou Neptuna až do vzdálenosti přibližně 1000 AU od Slunce.

Druhou skupinou jsou komety dlouhoperiodické s oběžnou dobou delší než 200 let, jejichž dráhy jsou velmi protáhlé elipsy nebo paraboly. Jejich oběžná doba může být několik milionů let a mnohé z nich byly spatřeny pouze jednou. Dlouhoperiodické komety představují více než 80% všech komet a pocházejí pravděpodobně z Oortova oblaku, vnějšího kulového obalu sluneční soustavy prostírajícího se do vzdálenosti zhruba 120000 AU od Slunce.

### 1.2.6 Meteorická hmota

Meteorická hmota je tvořena drobnými pevnými tělesy meziplanetární hmoty, meteoroidy, obíhajícími kolem Slunce. Jedná se o nejmenší tělesa sluneční soustavy. Rozhraní mezi meteoroidy a malými planetkami není přesně vymezeno, ale tělesa o rozměru stovek metrů se už obvykle řadí mezi malé planetky. Meteoroidy obíhají kolem Slunce ve stejném směru jako planety a tvoří zploštělý diskovitý útvar, tzv. meteoroidový komplex. Při průchodu zemskou atmosférou vytvářejí optický jev zvaný meteor. Zbytky meteorických těles dopadlých na povrch Země nazýváme meteority. Dělíme je na tři základní skupiny:

- chondrity – typické přítomností tzv. chondrulí, malých silikátových kuliček v průměru kolem 1 mm, v jemnozrnné struktuře meteoritu. Jedná se o nejpočetněji zastoupenou skupinu. Dále se dělí na uhlíkaté chondrity tvořené původním materiálem bohatým na těkavé látky, který neprošel táním ani diferenciací, a enstatity s větším obsahem železa.
- achondrity – kamenné meteority bez chondrulí. Přítomnost čedičových hornin naznačuje sopečný původ těchto těles.
- železné meteority – tvořeny krystalickou slitinou železa a niklu. Pocházejí pravděpodobně z kovových jader diferencovaných těles.

# Kapitola 2

## Jupiter

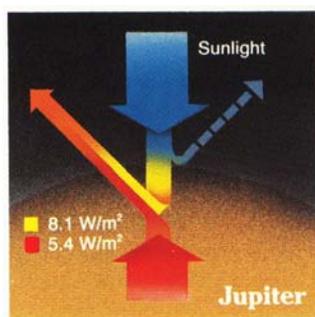
Jupiter je pátou nejvzdálenější planetou od Slunce, největší planetou sluneční soustavy a hlavním zástupcem skupiny velkých planet. Jeho rovníkový poloměr má hodnotu 71492 km a je přibližně desetkrát menší než poloměr Slunce a desetkrát větší než poloměr Země. Jeho hmotnost činí  $1898,6 \cdot 10^{24}$  kg, což představuje 318 hmot Země. Průměrná hustota je  $1326 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Pohybuje se kolem Slunce po dráze s excentricitou 0,048 a velkou poloosou  $778,4 \cdot 10^6$  km za 11,86 let. Jupiter rotuje kolem osy skloněné k ose dráhy o  $3,12^\circ$ . Rotuje nejrychleji ze všech planet, perioda rotace má pro rovníkové části atmosféry hodnotu 9,925 hodin.

### 2.1 Stavba a složení

Jupiter vznikl z oblaku mezihvězdného plynu a prachu, tvořeného ze 74% vodíkem a 24% heliem. Atomy vodíku se za teploty od 100 do 200 K, která panovala ve vnějších částech pramlhoviny, začaly po dvojicích slučovat a vytvářet tak molekuly plynu. Helium se vyskytovalo v atomární formě. 1,5% až 2% tvořil uhlík, dusík a kyslík. V důsledku nízkých teplot se tyto tři atomy vázaly s lehce dostupným vodíkem a vytvářely vodu, metan a amoniak. Z menšího množství uhlíku mohl vzniknout také oxid uhelný nebo uhelnatý. Zbytek pramlhoviny představují prachová zrna.

Z prachových zrn se ve středu Jupitera zformovalo husté jádro o poloměru asi 10000 km, hmotnosti 10 až 15 násobku hmotnosti Země a teplotě pravděpodobně kolem 30000 K. Obal jádra do vzdálenosti asi 50000 km tvoří kovový vodík. Jedná se o ionizované protony a elektrony, látka se proto chová jako roztavený kov. Kovový vodík je tedy elektricky vodivý a neprůhledný pro viditelné záření. Teplota obalu jádra dosahuje až 20000 K, tlak  $42 \cdot 10^{11}$  Pa a hustota  $4,3 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Nad tekutým kovovým vodíkem se prostírá do vzdálenosti necelých 70000 km od středu vrstva tekutého molekulárního vodíku.

V roce 1966 zjistil F. Low, že Jupiter má vlastní vnitřní zdroj tepla. V důsledku toho vyzařuje ve formě infračerveného záření zhruba dvakrát více energie než přijímá od Slunce. Je to způsobeno gravitačním smršťováním planety, při kterém dochází k přeměně potenciální energie na energii kinetickou. Tímto procesem teplota uvnitř plynného tělesa roste.



Obrázek 2.1: Tepelný tok v planetě Jupiter. Modrý paprsek označuje dopadající sluneční energii, která je z části rozptýlena zpět do prostoru atmosférou planety (čárkovaně) a z části pohlcena a přeměněna v infračervené záření (žlutě). Toto záření, spolu s infračerveným zářením proudícím z vnitřních částí planety (červeně), je teplo, které opouští povrch planety. Převzato z Beatty, Chaikin (1990).

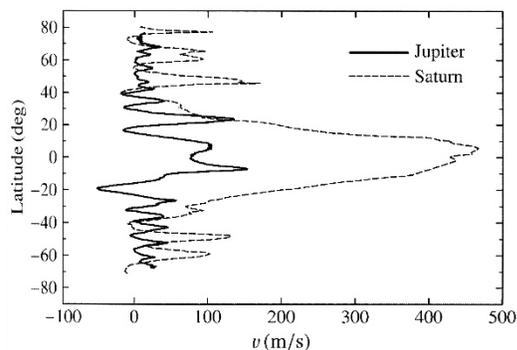
Ve Slunci bylo v počátečních fázích jeho vývoje toto zahřátí způsobené gravitačním smršťováním natolik výrazné, že došlo ke spuštění termonukleárních reakcí. Ale v kapalném tělese jako je Jupiter je kontrakce doprovázena naopak ochlazováním, protože vnitřní tlak závisí jen nepatrně na teplotě. Jupiter se proto pravděpodobně gravitačně smršťuje, ale pouze tak rychle, jak je schopen takto vytvořené teplo vyzářit do prostoru. Toto pomalé samoregulující se spojení smršťování a ochlazování, nazvané Kelvin-Helmholtzův mechanismus, představuje pravděpodobně poslední fázi prudkého a horkého vzniku velkých planet.

Protože jsou velké planety tak bohaté na vodík a helium, musely vzniknout v době, kdy byla celá sluneční soustava obalena těmito plyny. Odhaduje se, že k rozptýlení plynné obálky mladých hvězd dochází asi 10 milionů roků po jejich vzniku. Na okrajích disku utvořeného kolem praslunce se začaly shlukovat pevné částičky, ustálily se v rovině disku a vytvořily planetesimály velikosti asteroidů. Při teplotě asi 170 K, předpokládané pro tuto část pramlhoviny, se částičky mohly snadno shlukovat, protože byly dost chladné na zabudování hojného vodního ledu z jejich okolí. Pokud planetesimála narostla na 10 až 20 hmot Země, plyn z jejího sousedství podlehl gravitačnímu působení a začal kolem planetesimály vytvářet plynnou obálku. Takto zachycené obálky mohly být velmi horké a poskytovat zdroj pro výše zmíněné Kelvin-Helmholtzovo chlazení.

## 2.2 Atmosféra

Jupiter nemá pevný povrch, protože lehké prvky, ze kterých je tvořen, nekondenzují za teploty panující ve vnější části sluneční soustavy. Namísto toho přecházejí pozvolna spodní části jeho atmosféry v horký vnitřek planety, kde rozdíl mezi plynem a kapalinou mizí.

V horních vrstvách atmosféry planety vznikají mračna různých barev vytvářející oblačná pásma, fixovaná vždy v určité šířce planety. Tyto oblačné struktury jsou vytvářeny větry poháněnými jednak teplem ze Slunce, jednak vnitřním teplem zbylým z období formování



Obrázek 2.2: Zonální rychlost větrů v atmosféře Jupitera a Saturna. Na svislé ose je vynešena planetografická šířka, na vodorovné rychlost větrů. Převzato z Bertotti a kol. (2003).

planety. Atmosféra je tvořena především metanem, amoniakem, molekulárním vodíkem a heliem, v nepatrné míře také etanem, acetylénem, vodou, fosfanem, kyanovodíkem, oxidem uhelným a germaniem. Barevnost oblaků pochází pravděpodobně z těchto látek.

Rovnoběžně s rovníkem se v Jupiterově atmosféře tvoří světlá pásma a tmavé pruhy. Světlá pásma jsou stoupavé proudy, které se rozpínají a ochlazují, naopak sestupující proudy plynů v tmavých pruzích houstnou a zahřívají se. Rovníkové oblasti planety se otočí jednou za 9,925 hodin, zatímco otočka polárních pruhů trvá o 5 minut déle. Proto se vzhled Jupiterovy atmosféry stále mění, během dnů i několika hodin.

Již více než 300 let však v Jupiterově atmosféře existuje oválná struktura nazvaná Rudá skvrna. Poprvé byla pozorována R. Hookem v roce 1665 a G. D. Cassinim v roce 1666. Jedná se o obrovskou anticyklonu s rozměry 26000 a 13000 km. Centrum anticyklony se nachází na jižní polokouli, 23° pod rovníkem. Odhaduje se, že tloušťka anticyklony je 20 km a rychlost větru v ní dosahuje až  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Otáčí se proti směru hodinových ručiček, a to přibližně jednou za týden. Příčiny její rudé barvy nejsou přesně známy, a přesto, že existuje množství teorií, nebyl doposud uspokojivě vysvětlen ani důvod jejího vzniku. V roce 1938 se jižně od Rudé skvrny objevily tři bílé ovály, nazvané BC, FA a DE. Ostatní skvrny v Jupiterově atmosféře trvají nanejvýš měsíce nebo roky.

## 2.3 Magnetosféra

Jupiter je zajímavý kvůli svému obrovskému dipólu, rychlé rotaci a skutečnosti, že všechny jeho měsíce obíhají uvnitř magnetosféry. Magnetopauza, tedy hraniční plocha mezi magnetosférou a slunečním větrem, osciluje mezi 50 a 100 poloměry Jupitera. Kvůli korotaci magnetosférického plazmatu je jeho interakce s měsíci určena relativní rychlostí

$$v_{rel} = (\omega_J - n)r, \quad (2.1)$$

kde  $r$  je vzdálenost od středu Jupitera,  $\omega_J$  jeho úhlová rychlost a

$$n = \sqrt{\frac{GM_J}{r^3}}. \quad (2.2)$$

Částice s vysokou energií jsou zachyceny v radiačních pásech a při průniku do atmosféry kolem magnetických pólů vyvolávají polární záře. Velká část materiálu v magnetosféře Jupitera je doplňována rychlostí asi  $10^3 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  sopečnou aktivitou měsíce Io, většinou ve formě neutrálního kyslíku a síry. Tento hustý plyn, zprvu držený blízko povrchu, je následně zahřán a ionizován rychlou rotací a magnetosférickým plazmatem a rozprostře se kolem dráhy Io jako plazmový torus. Torus je horký a viditelný v oblasti ultrafialového záření. Odstředivou silou je pak materiál rozšířen dále, až za dráhu Evropy.

## 2.4 Prstence

Vznik prstenců velkých planet se pokoušejí vysvětlit dvě hlavní teorie. První z nich byla vytvořena v 19. století E. Rocheem a prstence podle ní vznikly slapovým rozrušováním měsíce dané planety. Kritická vzdálenost, uvnitř které je idealizovaný satelit s nulovou pevností v tahu roztříštěn slapovými silami planety, se nazývá Rocheova mez a je dána vztahem

$$R_{Roche} \cong 2,456 \cdot R \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_P}{\rho_S}}, \quad (2.3)$$

kde  $R$  je poloměr planety,  $\rho_P$  hustota planety a  $\rho_S$  hustota měsíce. Tato teorie tedy může vysvětlit pouze prstence uvnitř Rocheovy meze, ale nemůže být použita například na Saturnovy vnější prstence nacházející se až za touto mezí. Prstence by také mohly být rozrušené zbytky komet nebo jiných meziplanetárních těles rozptýlených uvnitř Rocheovy meze. Blízké měsíce by mohly být roztříštěny nikoliv slapy, ale srážkou s velkým tělesem.

Druhá teorie vysvětlující vznik prstenců planet byla poprvé navržena P. S. Laplaccem a I. Kantem na konci 18. století. Podle dnešní verze této teorie jsou prstence pozůstatkem protoplanetárních disků vytvořených kolem velkých planet při vzniku sluneční soustavy. Z vnějších částí disků se zformovaly měsíce, zatímco ve vnitřních částech uvnitř Rocheovy meze zůstal materiál roztroušen v prstencích. Jupiter a Uran ztratily plynné disky před ochlazením pramlhoviny a jejich prstence vznikly z méně těkavých materiálů jako jsou například křemičitany. Saturn naproti tomu ochladl dříve, což umožnilo vodní páře zkonzenzovat a vytvořit tak dnešní výrazné prstence. Podle nových poznatků však tato teorie není příliš pravděpodobná, protože prach ve všech planetárních prstencích je poměrně mladý.

Prstence se skládají z velkého množství částic obíhajících kolem dané planety po samostatných drahách. Rozmístění těchto drah v závislosti na vzdálenosti od planety je ovlivněno gravitační rezonancí. Ke gravitační rezonanci mezi dvěma tělesy dochází, jsou-li jejich oběžné doby v poměru malých celých čísel. Jsou-li tělesa přibližně stejné hmotnosti, stabilizují se rezonancí na souměřitelných drahách. Například oběžná doba Jupiterových

Tabulka 2.1: Jupiterovy prstence. Převzato z Bertotti a kol. (2003).

prsteneč	radiální vzdálenost [km]	$\tau$	H [km]
halo, vnitřní kraj	92000	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^4$
halo, vnější kraj	122500		
hlavní prsteneč, vnitřní kraj	122000	$5 \cdot 10^{-6}$	$\leq 30$
hlavní prsteneč, vnější kraj	128000		
vnitřní pavučinový prsteneč, vnitřní kraj	129000	$10^{-7}$	2300
vnitřní pavučinový prsteneč, vnější kraj	182000		
vnější pavučinový prsteneč, vnitřní kraj	129000	$3 \cdot 10^{-8}$	8500
vnější pavučinový prsteneč, vnější kraj	224900		

měsíců Io, Europy a Ganymeda jsou v poměru 1 : 2 : 4. Pokud je však rozdíl hmotností velký, jako je tomu právě u částek prstenců, brání gravitační rezonance malým tělesům pohybovat se po souměřitelných drahách. Gravitační rezonancí lze tedy vysvětlit existenci dělení v prstencích.

Základní veličinou popisující prstence je normální optická hloubka. Normální optická hloubka určuje množství světla pohlceného prstencem a je dána vztahem

$$\tau \cong nSH, \quad (2.4)$$

kde  $n$  je hustota částic,  $S$  účinný průřez a  $H$  tloušťku vrstvy.

Jupiterovy prstence byly objeveny teprve Voyagrem 1 v roce 1979. Jsou velmi řídké a skládají se ze tří částí. Nejvnitřnější je prstencovitě halo nápadně značnou tloušťkou. Halo klesá se vzdáleností od rovníkové roviny Jupitera a při přibližování se k němu. Sklony drah částek halo jsou zvětšovány interakcí s Jupiterovým magnetickým polem na 3/2 Lorentzově rezonanci, silnější 2/1 Lorentzova rezonance pak vyznačuje vnitřní hranici.

Hlavní prsteneč se rozprostírá od halo až po dráhu měsíce Adrastea. O něco větší měsíc Metis obíhá kolem Jupitera uvnitř hlavního prstence, který se v jeho dráze nápadně zjasňuje.

Nejzevnější jsou dva pavučinové prstence, oba téměř stejné. Jeden leží uvnitř dráhy měsíce Amalthea, druhý uvnitř dráhy měsíce Thebe. Jejich tloušťka je srovnatelná s maximálním vertikálním pohybem těchto satelitů kolem rovníkové roviny Jupitera. V příčném řezu mají téměř obdélníkový tvar s největší intenzitou ve spodní a ve vrchní části.

Tato pozorování jsou ve shodě s ideou, že vnější okraje prstenců jsou určeny výše zmíněnými satelity, pravděpodobně erozí způsobenou srážkami s mikrometeority. Pozorování z různých fázových úhlů spolu s celkovou nevýrazností prstenců napovídá, že jsou tvořeny částicemi velikost zhruba  $\mu\text{m}$ . Tyto částičky jsou příliš malé na výraznější absorpci. Složení částek není přímo známo, ale lze je odvodit ze složené mateřských měsíců. Předpokládají se křemičitany a uhlíkaté sloučeniny, také protože čistý led by se rychle odpařil. Prachové částičky jsou výrazně ovlivňovány negravitačními poruchami, a proto se jejich

životnost odhaduje na 100 až 10000 roků. Doplnění materiálu prstence tedy musí být velmi účinné.

## 2.5 Měsíce

Jupiterovy měsíce představují velmi různorodý systém těles. Dělíme je na tři skupiny: a) čtyři malé vnitřní měsíce, b) čtyři největší Galileovy měsíce a c) množství malých vzdálených měsíců nepravidelného tvaru.

Nejblíže Jupiteru obíhají měsíce Metis, Adrastea, Amalthea a Thebe. Všechny mají nepravidelný tvar, sklon dráhy blízky nule a také téměř nulovou excentricitu. Tyto měsíce jsou v těsném kontaktu s Jupiterovými prstenci. Ve vzdálenosti 128000 km od středu Jupitera, tedy 56508 km nad jeho oblačnou vrstvou, se pohybuje měsíc Metis. Jupiter oběhne za pouhých 7 h a 5 min. Metis je nevelký, jeho průměr činí asi 40 km, a krouží uvnitř Rocheovy meze sahající 175000 km od středu Jupitera. Zřejmě jen díky svým malým rozměrům, větší soudržnosti a větší hustotě nepodléhá destrukci. Jako druhý nejbližší, ve vzdálenosti 129000 km, obíhá Jupiter měsíc Adrastea. Jeho rozměry jsou  $23 \times 20 \times 15$  km. Má poměrně velkou hustotu, asi  $4500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Adarstea byla objevena D. Jewittem a E. Danielsonem v roce 1979. Nejnápadnější z Jupiterových vnitřních měsíců je Amalthea, objevená E. E. Barnardem již roku 1892. Má rozměry  $270 \times 166 \times 150$  km, velkou poloosu dráhy 181300 km, oběžnou dobu 0,498 dne a hustotu  $1800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Povrch je tmavý a načervenalý, pravděpodobně od zaprášení sírou z vulkánů měsíce Io. Čtvrtým měsícem je Thebe, objevený také v roce 1979, s rozměry  $100 \times 90$  km a hustotou  $1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Obíhá po dráze s velkou poloosou 221900 km a oběžnou i rotační periodou 0,675 dne.

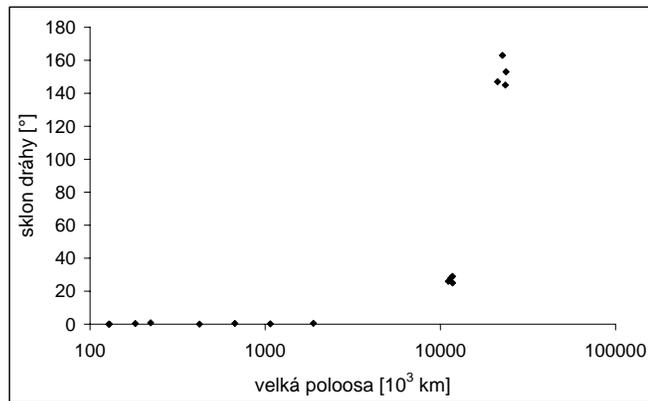
Galileo Galilei poprvé pozoroval tři měsíce Jupitera, později nazvané Io, Europa a Kallisto, 7. ledna 1610. Z počátku však usoudil, že se jedná o hvězdy nacházející se v blízkosti planety. 11. ledna spatřil čtvrtý objekt, později nazvaný Ganymed. Po svém objeviteli nazvané měsíce jsou největšími měsíci Jupitera, mají zhruba kulový tvar s nezatelným zploštěním a jejich průměrné hustoty klesají s rostoucí vzdáleností od planety. Z toho je zřejmé, že vznikaly během formování Jupitera a že šlo o proces podobný vzniku planet z pramlhoviny, ovšem v menším měřítku.

Io je o málo větší než náš Měsíc, má průměr 3632 km. Kolem Jupitera obíhá ve vzdálenosti 421600 km s periodou 1,769 dne. Střední hustota je  $3530 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , což je hustota blízká čediči. Je to důsledek skutečnosti, že Io je vulkanicky nejaktivnější známé těleso. Erupce jsou explozivní, materiál je vyvrhován rychlostí až  $1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  do výše až 500 km, část dokonce opouští gravitační pole satelitu. Vulkanismus je vyvoláván slapovým působením Jupitera a jeho měsíců, které opakovaně vytvářejí přílivové vlny v kůře tělesa, jakmile se Io dostane mezi mateřskou planetu a Europu nebo Ganymeda. Když deformace pomine, vrací se Io do původního tvaru, čímž dochází k zahřívání tělesa. Io je pravděpodobně tvořeno kovovým jádrem ze sulfidů železa a železa s niklem a pláštěm z křemičitanů. Na povrchu se vytvořily velké kaldery, krátery s rovným dnem vzniklým explozí nebo poklesem, lávové proudy a lávová jezera. Povrch se vulkanickou činností rychle mění a starší útvary jsou překrývány novějšími. Byla zde zjištěna přítomnost síry, která je černě zbarvena u kráterů,

červeně a žlutě ve větších vzdálenostech od vulkánů. Střední povrchová teplota je  $143^{\circ}\text{C}$ , ve vyvrženém materiálu  $97^{\circ}\text{C}$  a na hladině lávových jezer  $380^{\circ}\text{C}$ . Terén je velmi nerovný, vrcholy dosahují výšky až 16 km. Io obíhá v intenzivním radiačním pásu Jupitera, z něhož na satelit dopadají energetické elektrony, protony a těžké ionty. Protože tato oblast rotuje spolu s Jupiterem, unáší naopak od satelitu vulkanické plyny a část vyvrženého materiálu. Materiál vytváří na dráze satelitu torus iontů, z něhož uniká ultrafialové záření. Z torusu vycházejí těžké ionty a jejich tlak rozšiřuje Jupiterovu magnetosféru na více než dvojnásobek velikosti, kterou by magnetosféra měla bez tohoto efektu. Měsíc svým pohybem v magnetickém poli planety účinkuje jako elektrický generátor a je spojen s Jupiterovou ionosférou plazmovou trubicí s výkonem 1,2 TW. Také tento mechanismus se může podílet na přítomnosti vulkanických procesů. Z měnících se časových intervalů mezi po sobě následujícími vstupy satelitu do Jupiterova stínu určil v roce 1676 O. Römer poprvé rychlost světla.

Europa má průměr 3138 km a obíhá kolem Jupitera ve vzdálenosti 670900 km s periodou 3,552 dne. Střední hustota je poměrně vysoká,  $3000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , ale menší než hustota Io. Albedo, tedy poměr světelného toku difúzně odraženého od povrchu ke světelnému toku dopadajícímu kolmo na tento povrch, má Europa jedno z největších ve sluneční soustavě: 0,67. G. Kuiper v 70. letech 20. století ukázal, že kůra měsíce je tvořena vodou a ledem. Ledový povrch je mladý, se stářím útvarů nejvýš  $10^7$  roků, a rovinný. Téměř postrádá impaktní krátery, zato na něm pozorujeme četné praskliny a brázdy. Z jejich změn se usuzuje na vnitřní aktivitu tělesa. Praskliny mají délku až 3000 km a šířku do 200 km. Zaplnila je voda, která opět zmrzla. Led nemá příliš nízkou teplotu, takže pomalu teče a vyrovnává vzniklé nerovnosti. Největší zaznamenané vrcholy dosahují výšky pouze 1600 m. Impaktních kráterů je známo jen několik, největší o průměru 50 km, a zřejmě rychle zanikají. Přestože přímo na povrchu byla změřena teplota  $-148^{\circ}\text{C}$ , v hlubších vrstvách se předpokládá kapalná voda. V ledovém materiálu Europy probíhají procesy, které mají charakter vulkanismu a označují se jako ledový vulkanismus. Dochází k nim vlivem slapového působení Jupitera na Europu a také objemovými změnami ledu při změnách teplot a tlaku. Podobné procesy probíhají i na některých jiných, vzdálenějších satelitech. Pod vrstvou ledu o tloušťce od několika kilometrů do 10 km je oblast kapalné vody, možná místy prostoupená ledem, o hloubce pravděpodobně 100 km. Pod ní je vrstva hornin a ve středu jádro z kovů nebo jejich sloučenin, které se projevuje slabým magnetickým polem. Kvůli přítomnosti kapalné vody se uvažuje o možnosti existence živých organismů ve vodní vrstvě Europy nebo na jejím dně.

Ganymed je největším měsícem sluneční soustavy, který svým průměrem 5262 km předčí i planetu Merkur. Protože však má nízkou hustotu, jen  $1940\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , představuje Ganymed jen 45 % hmotnosti Merkura. Měsíc obíhá planetu ve vzdálenosti 1070000 km od jejího středu s oběžnou periodou 7,154 dne. Povrch je tvořen směsí vodního ledu a hornin. Terén vykazuje dva odlišné typy struktur, mladší světlejší plochy protínané soustavami rovnoběžných brázd označovanými jako Sulcus. Mladší soustavy brázd překrývají starší a probíhají různými směry. Byly zde zjištěny zlomy kůry, poklesy a podobné procesy tektonické aktivity. Vrcholy brázd mají výšku několik set metrů proti dolinám a od sousedních vrcholů jsou vzdáleny 10 až 15 km. Soustavy tvoří komplexní síť a táhnou se do vzdálenosti



Obrázek 2.3: Závislost sklonu dráhy na velké poloose (v logaritmicím měřítku) pro 16 největších měsíců Jupitera.

i tisíců kilometrů. Starší útvary se jeví temnější, jsou zaoblené a jde o pozůstatky původních pánví. Bývalá pánev Galileo Regio je zhruba kruhová o průměru 3200 km a vznikla při velkém impaktu. Starší oblasti jsou pokryty už značně erodovanými impaktními krátery. V mladších oblastech se krátery vyskytují podstatně méně, zato jsou nápadnější a kolem některých jsou světlé paprsky vyvrženého materiálu, zřejmě ledu. Denní teploty se na Gynamedu pohybují od  $-183^{\circ}$  C do  $-113^{\circ}$  C. Ačkoli Ganymed nemá atmosféru, byl u jeho povrchu detekován ozon. Předpokládá se, že se uvolňuje z molekul vody na povrchu jako následek dopadů elektricky nabitých částic Jupiterovy magnetosféry. Ganymed je tvořen tenkou chladnou a pevnou ledovou kůrou, pod níž je plášť z měkkého, nepříliš zmrzlého ledu a jádro z hornin s vnitřním kovovým jádrem. Vnitřní jádro je zahřáté a generuje magnetosféru, patrně stejným dynamovým efektem jako u magnetosféry Země. Magnetosféra Ganymeda má zřetelně definované hranice uvnitř magnetosféry Jupitera a jde o jedinou známou magnetosféru vytvořenou v magnetosféře jiného tělesa.

Kallisto má průměr 4806 km, který je srovnatelný s průměrem planety Merkur. Obíhá ve vzdálenosti 1883000 km, těsně za vnějším okrajem Jupiterova radiačního pásu, s oběžnou periodou 16,689 dne. Hustota měsíce byla určena na  $1851 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Na denní straně dosahuje teplota  $-120^{\circ}$  C, na noční  $-190^{\circ}$  C. Sonda Galilei zjistila nad satelitem řídkou atmosféru z oxidu uhelnatého. Ledový povrch Kallisto je pokryt obrovským množstvím impaktních kráterů. Krátery jsou většinou odděleny rovným terénem, protože starší krátery byly zarovnané tečením ledu. Nejtypičtější průměr kráterů je 30 km. Na měsíci vznikly obrovským impaktem dvě pánve, a to Valhalla o průměru 3000 km a Asgard s průměrem 1700 km, obě s četnými koncentrickými valy a terénem, jehož nerovnosti byly výrazně vyhlazeny tečením ledu. Jiným typem útvarů jsou kráterové řady, například Gipul Catena má délku 620 km a největší kráter řady má průměr 40 km. Předpokládá se, že kráterové

řady byly vytvořeny dopadem řetězců úlomků kometárních jader z komet, jejichž jádra byla roztrhána slapovými silami Jupitera. Pod kůrou silnou asi 200 km se předpokládá asi 10 km hluboký oceán pravděpodobně slané vody. Pod jeho dnem je poměrně homogenní nitro ze směsi ledu a hornin. Zastoupení hornin roste směrem ke středu tělesa, nepředpokládá se však existence jádra.

Vzdálené Jupiterovy měsíce jsou většinou tělíška o průměru jen málo kilometrů. Nepříliš výraznou výjimku představují jen měsíce Himalia, Lysithea, Elara, Ananke, Carme, Pasiphae a Sinope. Tyto satelity jsou pravděpodobně planetky zachycené Jupiterem. Kromě nepatrného měsíčku Themisto, čtyřikrát vzdálenějšího od planety než Kallisto, jsou jejich vzdálenosti od Jupitera přes 11 milionů kilometrů a u nejbližších známých se už blíží 30 milionům kilometrů. Obvykle s rostoucí vzdáleností od planety rostou také vzdálenosti mezi drahami měsíců, zde však v intervalu drah s velkou poloosou od 23 do 24 milionů kilometrů obíhá 18 těles. Všechny satelity vzdálenější než 18 milionů kilometrů od planety mají zpětný pohyb. Právě vzdálené měsíce Jupitera jsou skupinou měsíců, u které můžeme očekávat jejich početní růst.

Tabulka 2.2: Vlastnosti 16 největších Jupiterových měsíců. Převzato z Kleczek (2002).

měsíc	hmotnost [ $10^{20}$ kg]	průměr/ rozměr [km]	hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	úniková rychlost [ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	geom. albedo	velká poloosa [ $10^3$ km]	oběžná doba [dny]	sklon dráhy [°]	výstřednost
Io	$8,93\cdot 10^2$	3632	3530	2,564	0,61	421,6	1,769	0,04	<0,041
Europa	$4,80\cdot 10^2$	3138	3000	2,021	0,64	670,9	3,552	0,47	0,010
Ganymed	$1,48\cdot 10^3$	5262	1940	2,740	0,42	1070	7,154	0,21	0,002
Kallisto	$1,08\cdot 10^3$	4806	1851	2,451	0,19	1883	16,689	0,51	0,007
Metis	$9,56\cdot 10^{-4}$	40	2800	0,025	0,05	127,96	0,295	0	<0,041
Adrastea	$1,91\cdot 10^{-4}$	$23\times 20\times 15$	4500	0,014	0,05	128,98	0,298	0	0
Amalthea	$7,17\cdot 10^{-2}$	$270\times 166\times 150$	1800	0,084	0,07	181,3	0,498	0,4	0,003
Thebe	$7,77\cdot 10^{-3}$	$100\times 90$	1500	0,043	0,04	221,90	0,675	0,8	0,0015
Leda	$5,68\cdot 10^{-5}$	$2\times 14$	2700	0,010	0,07	11094	238,72	26	0,148
Himalia	$9,56\cdot 10^{-2}$	180	2800	0,117	0,03	11480	250,57	28	0,163
Lysithea	$7,8\cdot 10^{-4}$	$6\times 32$	3100	0,024	0,06	11720	259,22	29	0,107
Elara	$7,8\cdot 10^{-3}$	80	3300	0,052	0,03	11737	259,653	25	0,207
Ananke	$3,82\cdot 10^{-4}$	$6\times 28$	2700	0,018	0,06	21200	631 *	147	0,169
Carne	$9,56\cdot 10^{-4}$	$8\times 40$	2800	0,025	0,06	22600	692 *	163	0,207
Pasiphae	$1,91\cdot 10^{-3}$	$8\times 46$	2900	0,032	0,1	23500	735 *	145	0,378
Sinope	$7,8\cdot 10^{-4}$	$5\times 36$	3100	0,024	0,05	23700	758 *	153	0,275

\* retrogradní pohyb

# Kapitola 3

## Saturn

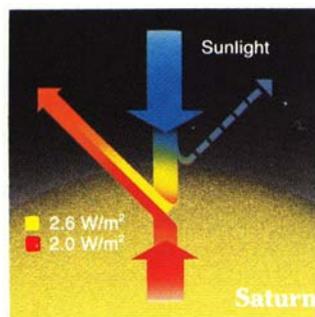
Saturn je šestou nejvzdálenější planetou od Slunce, druhou největší planetou sluneční soustavy a také planetou s nejvýraznějšími prstenci ve sluneční soustavě. Jeho rovníkový poloměr má hodnotu 60268 km, což je přibližně 9,45 poloměrů Země. Jeho hmotnost činí  $568,46 \cdot 10^{24}$  kg, tedy asi 95 hmot Země. Průměrná hustota Saturna je  $687 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , což je ze všech planet nejnižší hodnota. Pohybuje se kolem Slunce po dráze s excentricitou 0,05565 a velkou poloosou  $1427 \cdot 10^6$  km za 29,46 let. Sklon rotační osy k ose oběžné dráhy je  $26,73^\circ$  a rotace je poměrně rychlá, v rovníkových oblastech dosahuje hodnoty 10,656 hodin.

### 3.1 Stavba a složení

Saturn vznikl ze stejného oblaku mezihvězdného plynu a prachu jako Jupiter. Jeho složení je tedy, stejně jako v případě Jupitera, velice podobné složení Slunce. Je tvořen převážně původním vodíkem a heliem a nepatrným množstvím vody, metanu, amoniaku a prachových částic. Rozdíl mezi Saturnem a Jupiterem spočívá v tom, že Saturn obsahuje o něco méně vodíku a helia.

I když Saturn představuje jen asi 1/3 hmotnosti Jupitera, jeho poloměr je oproti Jupiterovu jen o málo menší. Také stavba obou planet je téměř shodná. Ve středu Saturna se nachází husté jádro o hmotnosti 10 až 15 hmot Země tvořené pravděpodobně horninami nebo směsí hornin a ledu. Obal jádra je tvořen kovovým vodíkem, jehož teplota dosahuje 12000 K, tlak  $12 \cdot 10^{11}$  Pa a hustota  $2,6 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Nad tekutým kovovým vodíkem se nachází vrstva tekutého molekulárního vodíku.

Také Saturn má vlastní vnitřní zdroj tepla a vyzařuje ve formě infračerveného záření více energie než přijímá ze Slunce. Důvodem však není pouze Kelvin-Helmholtzův mechanismus, i když se uplatňuje také. Voyager 1 zjistil, že v atmosféře Saturnu je asi čtyřikrát méně helia než se předpokládalo, zatímco podíly helia v atmosféře Jupiteru a Uranu jsou téměř shodné s hodnotami pro Slunce. Předpokládá se, že při dostatečně nízkých teplotách se atomy helia stanou nerozpustnými v tekutém kovovém vodíku, a že tato kritická teplota je v Saturnu dosažena. Těžší helium tedy pozvolna klesá vodíkovou atmosférou ke středu planety a tato vodíko-heliová separace uvolňuje teplo. Vlivem vnitřního tepla nedochází



Obrázek 3.1: Tepelný tok v planetě Saturn. Modrý paprsek označuje dopadající sluneční energii, která je z části rozptýlena zpět do prostoru atmosférou planety (čárkovaně) a z části pohlcena a přeměněna v infračervené záření (žlutě). Toto záření, spolu s infračerveným zářením proudícím z vnitřních částí planety (červeně), je teplo, které opouští povrch planety. Převzato z Beatty, Chaikin (1990).

na Saturnu ke střídání ročních dob, i když má jeho rotační osa podobný sklon jako zemská.

## 3.2 Atmosféra

Vrstva tekutého molekulárního vodíku plynule přechází v Saturnovu atmosféru, která je, podobně jako v případě Jupitera, tvořena molekulárním vodíkem, metanem, amoniakem, heliem a v nepatrné míře také etanem, acetylenem, vodou, fosfanem, kyanovodíkem, oxidem uhelným a germaniem. Jedná se tedy o primární atmosféru, kterou si Saturn udržel díky své velké gravitaci a vzdálenosti od Slunce. Podle jedné z hypotéz založené na měřeních Voyageru lze v atmosféře Saturnu a také Jupiteru rozeznat tři různé oblačné vrstvy. Nejnižší vrstva je tvořena vodním ledem nebo vodními kapkami. Další vrstvou jsou krystalky hydrogensulfidu amonného a v horní vrstvě je předpokládána vrstva zmrzlých čpavkových krystalků. Vrstva čpavkových krystalků má tloušťku téměř 100 km a zakrývá hlubší vrstvy atmosféry. Tmavší pruhy a světlá pásma, vzniklé v důsledku rychlých větrů, jsou proto na Saturnu mnohem méně výraznější než na Jupiteru.

Zonální rychlost větrů v atmosféře Saturnu je vykreslena na Obrázku 2.2. Z něj je zřejmé, že na Saturnu vane menší množství větrných proudů než na Jupiteru, zato se však pohybují výrazně rychleji. Rychlost východního větru na Saturnově rovníku dosahuje až  $500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tyto pásmové větry jsou poměrně stabilní. Za devadesát let moderního pozorování nebyla zaznamenána žádná změna ve východně-západním proudění Saturna ani Jupitera. Ačkoli pásmové větry na Jupiteru obvykle souvisejí s jovigrafickou šířkou barevných oblačných pásů, oblačné pásy občas mění svou podobu, zatímco pásmové větry nikoliv. Podél hranice mezi východními a západními proudy se tvoří malé víry, trvající jeden nebo dva dny. Větší útvary jako jsou bílé ovály nebo Rudá skvrna přetrvávají valením se s proudy.

### 3.3 Magnetosféra

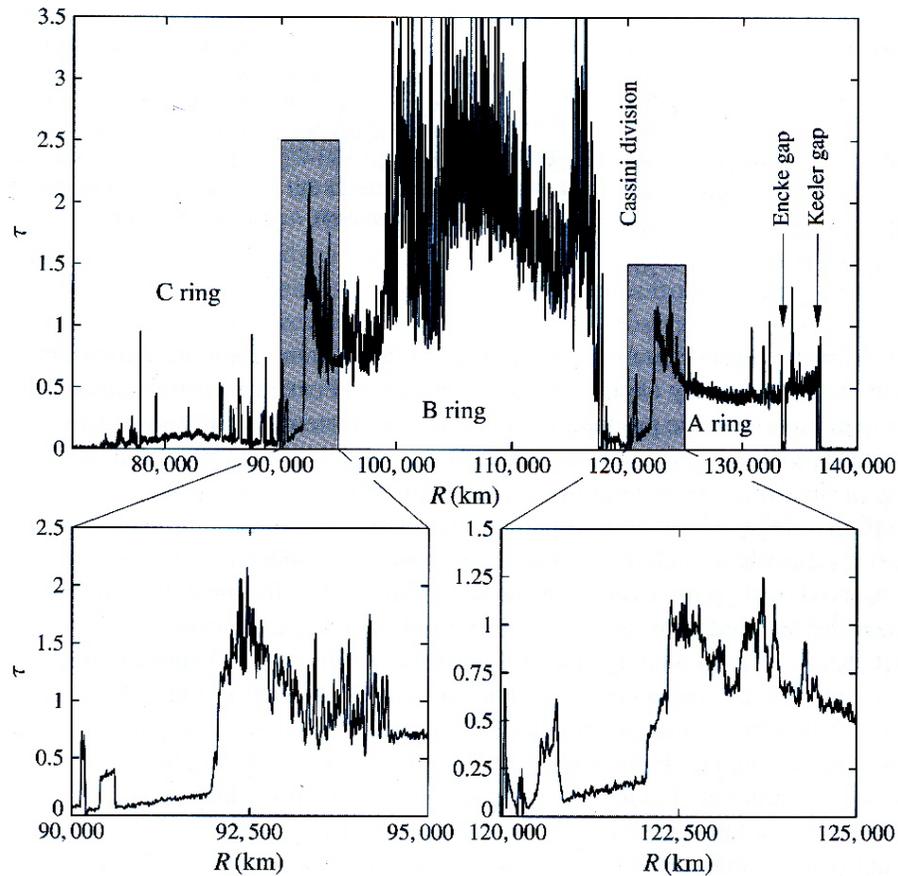
Saturnova magnetosféra byla zkoumána sondami Pioneer a Voyager a v současné době jsou informace získávány pomocí automatické observatoře Cassini, která se stala Saturnovou družicí. Magnetopauza se nachází ve vzdálenosti asi 20 poloměrů Saturnu. Uvnitř magnetosféry se nalézá několik měsíců a prstenců, které jsou zdroji plazmy a vytvářejí torus z kyslíkových iontů s hustotou 1 – 100 částic na  $\text{cm}^3$ . Měsíce a prstence plazmu také pohlcují a vytvářejí lokální minima v hustotě částic okolo každé dráhy. Proto Saturnovy pásy částic končí hlavními prstenci. Specifická plazmová vrstva vodíku, helia, kyslíku a uhlíku se rozprostírá ve vnější magnetosféře ve vzdálenosti dráhy měsíce Titanu, který je díky své husté atmosféře zdrojem ionizovaných částic. Titanova poloha ve vzdálenosti asi 20 poloměrů Saturnu je speciální, protože se Titan nachází uvnitř magnetosféry planety jen po určitou dobu, podle toho, jak se její hranice posouvá v závislosti na slunečním větru. Vyzařování rádiového zdroje na kilometrových vlnových délkách se mění s periodou 10,657 hodin, což je pravděpodobně v rezonanci s rotační periodou Saturnu.

### 3.4 Prstence

Po více než 350 let byl Saturn považován za jedinou planetu mající prstence. Poprvé je pozoroval roku 1610 G. Galilei, ale byl to C. Huygens, kdo v roce 1656 interpretoval pozorování jako sluneční světlo odražené od tenkého disku materiálu obklopujícího planetu. V roce 1675 prokázala pozorování nápadného dělení provedená G. D. Cassinim, že prstenec není jediné tuhé těleso. J. C. Maxwell poté roku 1857 teoreticky dokázal, že jsou prstence tvořeny velkým množstvím samostatných částic.

Systém hlavních Saturnových prstenců se rozprostírá do vzdálenosti zhruba 70000 km, celkově Saturnovy prstence sahají do vzdálenosti asi 400000 km. Nejjasnější částí je prstenec B, oddělený od přilehlého prstence A Cassiniho dělením. Cassiniho dělení není ve skutečnosti mezera, ale 4500 km široké mezikruží, ve kterém hodnota normální optické hloubky klesá na 10% hodnoty v prstenci. Velikost úlomků v Cassiniho dělení se pohybuje mezi 0,1 cm a 20 m, prstenec B tvoří částice s rozměry od 30 cm do 20 m. Zatímco vnější okraje prstenců A a B jsou udržovány rezoncencemi 2/1 a 7/6 s měsíci Mimasem a Janusem, jejich nápadně podobné (viz Obrázek 3.2) vnitřní okraje představují složitější problém. Nejpravděpodobnějším vysvětlením je rovnováha mezi srážkami částic prstence a vznikem úlomků ze srážek meteoroidů. Uvnitř prstence B se nalézá krepový prstenec C, jehož normální optická hloubka se pohybuje v rozmezí 0,05 – 0,2 a úlomky mají velikost od 1 cm do 10 m.

Hlavní Saturnovy prstence vykazují určitou mikrostrukturu. Jen některé jevy byly plně vyloženy jako spirální hustotní vlny vytvářené měsíci obíhajícími v blízkosti prstenců a pozorovanými nebo hypotetickými vloženými měsíčky. Například Enckeho dělení nacházející se v blízkosti vnějšího okraje prstence A je způsobeno vloženým měsíčkem Pan. Podobně, stále užší Keelerova mezera je pravděpodobně důsledkem neviditelného objektu. Množství radiálních struktur z Obrázku 3.2 je doprovázeno azimutálními nepravidelnos-



Obrázek 3.2: Radiální profil normální optické hloubky hlavních Saturnových prstenců. Změřeno ftopolarimetrem Voyageru během zákrytu hvězdy  $\delta$  Sco. V grafu jsou uvedeny názvy hlavních prstenců a výraznějších dělení. Grafy v dolní části jsou zvětšením nápadně podobných vnitřních okrajů prstenců A a B. Převzato z Bertotti a kol. (2003).

tmi. Příkladem je úzký a nepatrně excentrický prstenec F vně prstence A tvořený nejméně ze čtyř pásem. Vyskytují se zde také různé zhuštění a smyčky měnící se rychle s časem. Prstenec je pravděpodobně udržován pohromadě vlivem dvou blízkých měsíců, Pandory a Prometheus.

Saturnovy hlavní prstence jsou výrazně tenké ve srovnání s jejich radiálním rozměrem. Jejich tloušťka se pohybuje v rozmezí od několika metrů do stovek metrů. Podle infračervených pozorování jsou prstence složeny téměř výhradně z vodního ledu s jen malou příměsí nečistot, například křemičitanů, oxidů železa a pravděpodobně i organických látek. Simulace ukazují, že přechodné hromadění částic, rychle přerušované srážkami, se vyskytuje v prstencích A a B na škálách od desítek do stovek metrů. Fotometrické modely naznačují, že jsou Saturnovy prstence značně chudé na prach. Prach v hlavních prstencích vytváří radiální pruhy. Tyto útvary byly objeveny na snímcích z Voyageru 1 jako tmavé radiální zbarvení v prstenci B, avšak v rozptylu světla v předním směru se jeví světlejší než okolní prstenec,

Tabulka 3.1: Saturnovy prstence. Převzato z Bertotti a kol. (2003).

prstenec	radiální vzdálenost [km]	$\tau$	H [km]
D, vnitřní okraj	$\leq 66000$	$5 \cdot 10^{-5}$	?
C, vnitřní okraj (a D, vnější okraj)	74500	0,05 – 0,2	?
Titaniův kroužek	77871		
Maxwellův kroužek	87491		
B, vnitřní okraj (a C, vnější okraj)	91975	1 – 3	$\leq 1$
Cassiniho dělení, vnitřní okraj (a B, vnější okraj)	117516	0,05 – 0,15	$\leq 1$
A, vnitřní okraj (a Cassiniho dělení, vnější okraj)	122058	0,4 – 1	$\leq 1$
Enckeho dělení ( $\approx 200$ km široké)	133589		
A, vnější okraj	136800		
F, střed ( $\approx 50$ km široký)	140200	1	?
G, střed ( $\approx 8000$ km široký)	169500	$5 \cdot 10^{-5}$	?
E, vnitřní okraj	$\approx 180000$		
E, maximum	$\approx 230000$	$5 \cdot 10^{-7}$	$10^3 - 10^4$
E, vnější okraj	$\approx 450000$		

čímž se projevuje charakteristická fázová změna prachu. Radiální pruhy se vytvářejí velmi rychle, během několika minut, jako radiální vlákna brzy po vynoření se prstence ze Saturnova stínu a postupně jsou stlačována diferenciální rotací.

Kromě systému hlavních prstenců má Saturn také tři špatně pozorovatelné tenké prachové prstence, skládající se z částic velikosti  $\mu\text{m}$ . Nejvnitřnější je prstenec D, vnější jsou prstence G a E. Podobně jako v případě Jupitera mají vnější prstence nezanedbatelnou tloušťku asi 1000 a 10000 km. Nejlépe je prozkoumán prstenec E, který zahrnuje dráhy měsíců Mimas, Dione, Tethys a Enceladus. Kolem dráhy měsíce Encelada je v prstenci pozorovatelné výrazné zjasnění.

### 3.5 Měsíce

Rozsáhlý systém Saturnových prstenců spolu s poměrně velkým množstvím měsíců, k 26. září 2005 jich bylo evidováno 47, tvoří kolem planety složitý systém. Saturnovy měsíce můžeme stejně jako měsíce Jupitera rozdělit do tří skupin, tedy na měsíce blízké, velké a vzdálené.

Saturnovy blízké měsíce jsou většinou v určitém vztahu s prstenci. Nejbližší známé těleso je měsíc Pan, nacházející se 133583 km od středu planety, s oběžnou dobou 0,5750 dne a průměrem zhruba 20 km. Obíhá uvnitř prstence A v oblasti Enckeho dělení, ze kterého vychytává částice prstence a tím v něm udržuje mezeru. Okraj prstence A je zřejmě udržován dalším měsícem, Atlasem, s rozměry  $18,5 \times 17,2 \times 13,5$  km a albedem 0,9. Jen o málo vzdálenější je měsíc Prometheus, s velkou poloosou 13935 km, rozměry  $74 \times 50 \times 34$  km a nízkou hustotou. Omezuje vnitřní rozsah úzkého prstence F, ležícího vně prstenu A. Jedná se o pórovité ledové těleso s impaktními krátery, brázdami a údolími. Z vnější strany je prstenec F udržován měsícem Pandora o rozměrech  $55 \times 44 \times 31$  km, s velkou poloosou 141700 km, albedem 0,9 a povrchem zaplněným impaktními krátery. Zajímavou dvojici jsou měsíce Epimetheus a Janus, obíhající po velmi blízkých drahách vzdálených 151420 km a 151470 km od středu planety. Bližší z měsíců, v roce 2004 Epimetheus, má podle třetího Keplerova zákona kratší oběžnou dobu a za 4 roky dohoní Januse, kterého svou gravitační silou zpomalí, čímž se podle principu akce a reakce sám zrychlí. Janus pak přejde na nižší dráhu a Epimetheus na vyšší. Je téměř jisté, že původně na této dráze obíhalo jediné těleso, které se v rané fázi tvorby Saturnovy soustavy měsíců rozdělilo na dvě. Epimetheus má rozměry  $69 \times 55 \times 55$  a Janus  $97 \times 95 \times 77$  km. Povrchy obou satelitů jsou pokryty množstvím impaktních kráterů. Na rozdíl od Enckeho dělení je Cassiniho dělení důsledkem gravitačního působení vzdáleného satelitu Mimas a leží právě v oblasti, kde jsou poměry oběžných dob Mimasu a vnitřního okraje Cassiniho dělení 2 : 1. Částice prstenců zde vlivem Mimasu přešly na eliptické dráhy, což vedlo ke srážkám a přechodu částic do jiných částí prstenců. V oblasti velkých měsíců Saturna obíhají v dráze Tethys dva malé satelity. Teleso je v libračním centru  $L_4$ , tedy  $60^\circ$  před Tethys, a o stejný úhel za tímto měsícem, v libračním centru  $L_5$ , obíhá Calypso. Oba satelity byly nalezeny roku 1981 B. Smithem. Podobným případem je i měsíc Helene v centru  $L_4$  na dráze Dione.

Největším měsícem planety Saturn je Titan, objevený již roku 1655 Ch. Huygensem. Má

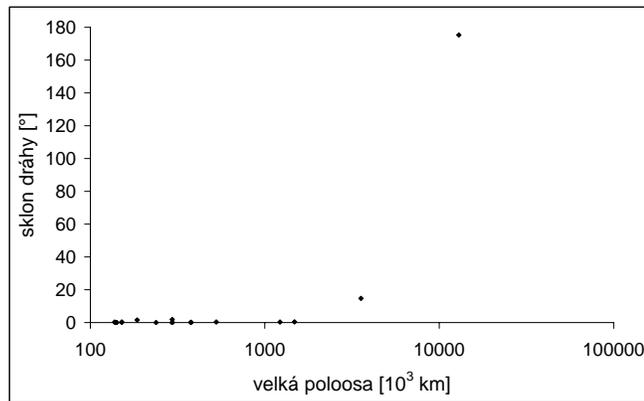
průměr 5150 km a je tedy po Ganymedu druhým největším měsícem ve sluneční soustavě. Kolem Saturnu obíhá ve vzdálenosti 1221850 km jednou za 15,9454 dne. Jeho dráha má nepatrnou excentricitu 0,0292 a malý sklon k rovníkové rovině planety 0,33°. Jeho rotace je vázaná a má poměrně nízkou hustotu,  $1880 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Zcela výjimečný je tento měsíc svou neprůhlednou a hustou atmosférou. Na povrchu se původně předpokládala přítomnost moří nebo jezer tekutého metanu nebo etanu, zatímco voda se zde vyskytuje výhradně v pevné fázi. Atmosférický tlak na povrchu dosahuje 160 kPa a je tedy o 60% větší než na Zemi. Atmosféra se skládá převážně z molekulárního dusíku s uhlovodíky. Soudí se, že prostředí by mohlo být podobné pozemskému před vznikem života, kdy atmosféra ještě postrádala kyslík. Povrchová teplota Titanu je však asi  $-178^\circ\text{C}$ . Za této teploty a tlaku metan pravděpodobně není kapalný, ale mohla by se zde vyskytovat jezera etanu s rozpuštěným metanem. Metan se fotochemickými procesy mění na etan, acetylen, etylen a na stavební bloky aminokyselin. V červnu roku 2004 dosáhla sonda Cassini oblasti Saturnu a koncem tohoto roku sestoupilo její pouzdro Huygens Titanovou atmosférou, aby prozkoumalo Titanův povrch.

Mimas je nejbližší z velkých měsíců Saturnu, ale ve srovnání s Galileovými měsíci jde o drobné těleso s rozměry  $209\times 196\times 191$  km. Přesto má tvar blížký kouli. Velká poloosa jeho dráhy měří 185520 km a oběžná doba je 0,9424 dne. Průměrná hustota je pouhých  $1140 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a také povrchová teplota je nízká, pohybuje se kolem  $-200^\circ\text{C}$ . Mimas je tvořen ledem, který je zchlazen natolik, že je pevný a nestéká. Všechny povrchové útvary jsou proto zachovány z dob, kdy měsíc vznikal. Největším impaktním kráterem na Mimasu je kráter Herschel o průměru 130 km s centrálním vrcholkem výšky 6 km.

Enceladus má velmi vysoké albedo rovné 0,99. Jeho povrch pravděpodobně pokrývá tenká ledová krystalická krusta. Jde o těleso s rozměry  $256\times 247\times 245$  km, velkou poloosou dráhy 238020 km, oběžnou dobou 1,3702 dne a hustotou  $1120 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Jeho povrch má méně nerovností než většina okolních měsíců. Krátery nejsou větší než 35 km a některé plochy jako různé praskliny a planiny jsou bez kráterů. Zvrásněný terén je místy ostře ohraničen od oblasti připomínající tečení ledu. Enceladus je zřejmě zahříván slapovými silami Saturnu a jeho dráha je rušena sousedními měsíci Tethys a Dione.

Měsíc Tethys má rozměry  $536\times 528\times 526$  km a je tedy asi dvakrát větší než předchozí dva satelity. Jeho hustota je nízká, asi  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , stejně jako jeho teplota  $-187^\circ\text{C}$ . Kolem Saturnu obíhá ve vzdálenosti 294660 km za dobu 1,8878 dne. Najdeme zde oblasti více a jinde méně pokryté krátery, pánev po impaktu o průměru 400 km jménem Odysseus a obrovské údolí Ithaca Chasma, široké až 100 km, hluboké 3 až 5 km a táhnoucí se přes dvě třetiny obvodu. V okolí pólů pozorujeme světlejší ledové usazeniny.

Dione je podobná měsíci Tethys. Má průměr 1120 km, velkou poloosu dráhy 377400 km a oběžnou dobu i dobu rotace 2,7369 dne. Její průměrná hustota,  $1440 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , je nejvyšší ze všech ledových měsíců, což naznačuje, že má horninové jádro s hmotností asi třetiny celého tělesa. Terén měsíce je hustě pokryt krátery, řada z nich je větších než 100 km. Poněkud více kráterů je překvapivě na zadní polokouli. E. M. Shoemaker a R. F. Wolfe soudí, že větší počet kráterů vznikl na přední polokouli v době těžkého bombardování, když už měl satelit vázanou rotaci. Pozdější velký impakt mohl tento celkem nevelký měsíc otočit do opačné orientace a k podobné situaci mohlo dojít několikrát. Také albedo, průměrně



Obrázek 3.3: Závislost sklonu dráhy na velké poloose (v logaritmickém měřítku) pro 18 největších měsíců Saturnu.

0,6, ubývá směrem k zadní polokouli, zřejmě proto, že je přední polokoule více zaprášena meteorickým prachem. Podobně jako na Tethys pozorujeme i na Dione brázdy, například Palatine Linea, Palatine Chasma a Latium Chasma.

Rhea má průměr 1528 km, průměrnou hustotu  $1240 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , velkou poloosu dráhy 527040 km a dobu oběhu 4,5175 dne. Povrch je přeplněn krátery a stejně jako na Dione zde nacházíme nestejnorodosti. V jedné oblasti jsou krátery větší než 40 km, v jiné jsou podstatně menší. Krátery se navzájem překrývají podobně jako v některých oblastech Měsíce. Vnitřní stavba Rhey je pravděpodobně stejná jako vnitřní stavba Dione.

Hyperion obíhá za drahou Titanu. Jeho rozměry jsou  $185 \times 140 \times 113$  km a z největší části je tvořen ledem. Vinou nepravidelného tvaru není možné definovat rotační osu, rotační perioda není konstantní a mění se oběh po oběhu. Nepravidelný tvar a zřetelné projevy impaktů tvoří ukázkou nejstaršího povrchu v Saturnově soustavě.

Japetus vyniká rozdílnými albedy polokoulí. Přední polokoule je tmavá, s albedem 0,05, zadní polokoule je mnohem jasnější s albedem až 0,5. Temná oblast nazvaná Cassini Regio je hladká, bez kráterů a s jasnými valy. Na okraji temné polokoule jsou dna některých kráterů zaplavena tmavým materiálem, což by mohlo naznačovat jeho endogenní původ. Mohlo by jít o těkavé látky, například metan. Japetus má průměr 1436 km, střední hustotu  $1020 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a obíhá kolem planety 3561300 km daleko s periodou 79,3302 dne.

Phoebe býval nejvzdálenějším známým měsícem Saturnu. Objevil ho W. H. Pickering v roce 1898. Satelit obíhá po dráze s velkou poloosou 12952000 km a s oběžnou dobou 550,48 dne. Velikostí jde o menší těleso s rozměry  $115 \times 110 \times 105$  km. Předpokládá se, že pochází z Kuiperova pásu. Dráha Phoebe byla tedy původně heliocentrická a zřejmě se postupně měnila vlivem poruch okolních těles, především se zmenšovala vzdálenost tělesa od Slunce až došlo k zachycení Saturnem. Nasvědčuje tomu i značná excentricita dráhy

0,163 a zejména retrogradní pohyb.

Saturnovy vzdálené měsíce jsou drobná a nepravidelná tělesa, stejně jako v případě Jupiterových vzdálených měsíců. Jejich pohyb probíhá po drahách s velkými excentricitami. Zatímco u Jupitera všechny známé vnější měsíce obíhají retrogradně, u Saturnu je polovina měsíců na přímých a polovina na zpětných drahách. Nejvzdálenější dnes známé měsíce mají poloosu dráhy větší než 20 milionů kilometrů.

Tabulka 3.2: Vlastnosti 18 největších Saturnových měsíců. Převzato z Kleczek (2002).

měsíc	hmotnost ( $10^{20}$ kg)	průměr/ rozměr [km]	hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	hvězdná velikost [mag]	geom. albedo	velká poloosa [ $10^3$ km]	oběžná doba [dny]	sklon dráhy [°]	výstřednost
Mimas	0,375	$209 \times 196 \times 191$	1140	12,9	0,5	185,52	0,9424	1,53	0,0202
Enceladus	0,73	$256 \times 247 \times 245$	1120	11,8	0,99	238,02	1,3702	0,02	0,0045
Tethys	6,22	$536 \times 528 \times 526$	1000	10,3	0,9	294,66	1,8878	1,86	0,0000
Dione	11,0	1120	1440	10,4	0,3-0,7	377,40	2,7369	0,02	0,0022
Rhea	23,1	1528	1240	9,7	0,7	527,04	4,5175	0,35	0,0010
Titan	1345,5	5150	1880	8,4	0,21	1221,85	15,9454	0,33	0,0292
Hyperion	0,2	$185 \times 140 \times 113$	1400	14,2	0,19-0,25	1481,1	21,2766	0,43	0,1042
Japetus	15,9	1436	1020	10,2-11,9	0,05-0,5	3561,3	79,3302	14,72	0,0283
Pan		zhruba 20		18,5	0,5	133,583	0,5750		
Atlas		$18,5 \times 17,2 \times 13,5$		18,0	0,9	137,64	0,6019	0,3	0,0000
Prometheus	0,0014	$74 \times 50 \times 34$		16,5	0,6	139,35	0,6130	0,0	0,0024
Pandora	0,0013	$55 \times 44 \times 31$		16,0	0,9	141,7	0,6288	0,0	0,0042
Epimetheus	0,0054	$69 \times 55 \times 55$		15,5	0,8	151,42	0,6946	0,34	0,0090
Janus	0,0192	$97 \times 95 \times 77$		14,5	0,8	151,47	0,6946	0,14	0,0070
Calypso		$15 \times 8 \times 8$		18,0	0,6	294,66	1,8878	$\sim 0$	$\sim 0$
Telesto		$15 \times 12,5 \times 7,5$		18,7	0,5	294,66	1,8878	$\sim 0$	$\sim 0$
Helene		$18 \times 16 \times 15$		18,5	0,7	377,4	2,7369	0,2	0,0050
Phoebe	0,004	$115 \times 110 \times 105$		16,45	0,06	12952	550,48*	175,3	0,1630

\* retrográdní pohyb

# Kapitola 4

## Uran

Uran je sedmá planeta v pořadí vzdáleností od Slunce a první planeta objevená pomocí dalekohledu. Byla objevena 13. března 1781 W. Herschelem. Je nejvzdálenější planetou, kterou lze ještě uvidět pouhým okem. Rovníkový poloměr Uranu má hodnotu 25559 km a je tedy zhruba čtyřikrát větší než průměr Země. Jeho hmotnost činí  $86,83 \cdot 10^{24}$  kg, což představuje 14,5 hmot Země. Průměrní hustota je  $1270 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Pohybuje se kolem Slunce po dráze s excentricitou 0,047 a velkou poloosou  $2869,6 \cdot 10^6$  km za 84 let. Rotuje retrográdně s periodou 17,24 hodin. Osa rotace je skloněna o  $97,86^\circ$  a leží téměř v Uranově oběžné rovině. To znamená, že v průběhu 42 let se vymění orientace rotační osy Uranu ke Slunci.

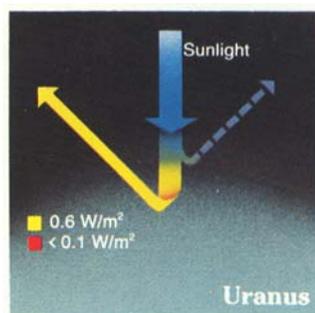
### 4.1 Stavba a složení

Uran vznikl především z původního ledu a hornin. Na rozdíl od Jupiteru i Saturnu obsahuje pouze malé množství hlavních složek původního oblaku mezihvězdného plynu a prachu, tedy vodíku a helia. Podle jedné teorie mohlo být vytvořeno jádro Uranu ale také Neptunu mezi dráhami Jupiteru a Saturnu. Utváření Jupiteru a Saturnu, které probíhalo zhruba ve stejné době, pak zabránilo dalšímu růstu Uranu a Neptunu a obě planetesimály byly odvrženy dále od Slunce.

Jádro Uranu je o něco větší než Země a je složeno z křemičitanů a železa. Jeho středová teplota dosahuje 7000 K. Planeta obsahuje jen asi 15% vodíku a podle výpočtů nedosahuje tlak v nitru dostatečných hodnot, aby se vytvořil kovový vodík jako u Jupiteru a Saturnu. Vodík je tedy v Uranu molekulární a vyskytuje se především ve vnějších vrstvách tělesa. Plášť kolem jádra je zhruba 10000 km silný a je pravděpodobně tvořen ledy vody, metanu a amoniaku.

Je zajímavé, že odhadované hmotnosti jader Jupiteru a Saturnu jsou velmi podobné celkové hmotnosti Uranu a také Neptunu. Uran a Neptun jsou tedy jakýmsi jádry tvořenými směsí hornin a ledu s nezřetelným vrstvením.

Uran je jedinou planetou ze skupiny velkých planet, která nemá vnitřní zdroj energie. Pouze vyzařuje energii získanou od Slunce. Specifická svítivost Uranu, tedy množství vyzářené energie na jednotku hmotnosti, je blízká specifické svítivosti uhlíkatých chondritů.



Obrázek 4.1: Tepelný tok v planetě Uran. Modrý paprsek označuje dopadající sluneční energii, která je z části rozptýlena zpět do prostoru atmosférou planety (čárkovaně) a z části pohlcena a přeměněna v infračervené záření (žlutě). Toto záření, spolu s infračerveným zářením proudícím z vnitřních částí planety (červeně), je teplo, které opouští povrch planety. Převzato z Beatty, Chaikin (1990).

## 4.2 Atmosféra

Uranova atmosféra má tloušťku 7500 km a skládá se z 83% vodíku, 15% helia a malého množství metanu a jiných uhlovodíků. Podobně jako v případě předešlých dvou planet se jedná o primární atmosféru, která pozvolna přechází v těleso planety. Je tvořena vrstvou vodíku, pod kterou se nachází metanová vrstva obsahující malé pevné částice a pravděpodobně také jednoduché organické sloučeniny. Ve spodních vrstvách atmosféry nezávisí teplota na denní době a také teploty na pólech a na rovníku jsou téměř shodné. Nelze proto zcela vyloučit, že i Uran má nějaký vlastní zdroj tepla.

Také v Uranově atmosféře vznikají oblačná pásma. Od oblačných pásem na Jupiteru a Saturnu se ale liší kvůli velkému sklonu rotační osy planety. V průběhu uranského roku svítí Slunce na jeden pól a poté se přesouvá na druhý, přičemž průměrně více energie se hromadí v polárních oblastech než na rovníku. Polární oblasti takto od Slunce získají více energie než jsou schopny vyzářit v infračervené oblasti, a proto, aby byla dosažena tepelná rovnováha, musí atmosféra přenášet teplo směrem k rovníku. Přenos se může uskutečňovat pod mraky, uvnitř čiré atmosféry nad nimi nebo malými víry.

Ve srovnání s Jupiterem a Saturnem je Uran poměrně jednotvárný. Charakteristické je pro něj slabé modrozelené zbarvení. Obě tyto vlastnosti Uranu jsou způsobeny tím, že kvůli nízké teplotě leží oblaky síry a amoniaku mnohem hlouběji než oblaky na Jupiteru a Saturnu, takže světlo odražené od těchto oblaků musí projít mnohem silnější vrstvou atmosféry. Plyn v atmosféře se chová jako průsvitný filtr rozptylující vlnové délky modré a pohlcující vlnové délky červené kvůli přítomnosti metanu.

V důsledku poměrně vysoké teploty a malého tíhového zrychlení sahá Uranova atmosféra až k jeho prstencům. Proto jsou částice prstenců nepatrně brzděny aerodynamickým odporem a doba jejich života je zkracována převáděním jejich dráhy na spirálu.

### 4.3 Magnetosféra

Uran byl zkoumán v letech 1985–1986 Voyagerem 2. Byl zjištěn enormní sklon Uranova dipólu k rotační ose, který činí  $58,6^\circ$ . Jedná se o největší sklon dipólu k rotační ose mezi planetami. Takto velký sklon je znám pouze u některých hvězd. Velký sklon Uranova dipólu k rotační ose a posunutí středu dipólu od středu Uranu podél rotační osy, představující  $0,3 R_U$ , vytvářejí složitou a netypickou magnetosféru. Velký sklon Uranu dělá interakci jeho největších satelitů s magnetosférou velmi složitou, přestože částicová hustota je poměrně nízká, zhruba  $0,1 - 1$  částice/cm<sup>3</sup>. Kolem magnetických pólů Uranu je pozorována polární záře a vyskytují se také rádiové emise ve frekvenčním rozsahu od několika do stovek kHz.

### 4.4 Prstence

Uranovy prstence byly objeveny 10. března 1977 při zákrytu hvězdy SAO 158687 Uranem. Během zákrytu bylo zjištěno celkem devět prstenců. Voyager 2 poté při svém průletu Uranovým systémem v roce 1986 existenci těchto prstenců potvrdil a objevil desátý prstenec, později nazvaný  $\lambda$ , a několik oblouků.

Tabulka 4.1: Uranovy prstence. Převzato z Bertotti a kol. (2003).

prstenec	radiální vzdálenost [km]	$\tau$
6	41837	0,3
5	42234	0,5
4	42570	0,3
$\alpha$	44718	0,3
$\beta$	45661	0,2
$\eta$	47175	0,3
$\gamma$	47627	2 - 4
$\delta$	48300	0,4
$\lambda$	50023	0,1 - 0,5
$\epsilon$	51149	1 - 4

Všech devět hlavních Uranových prstenců je velmi úzkých. Nejširší je prstenec  $\epsilon$ , jehož šířka se pohybuje v rozmezí 20 – 100 km. Všechny ostatní prstence mají šířku menší než 10 km. Před jejich objevením se předpokládalo, že všechny prstence jsou kruhové, protože vzájemné srážky by ustálily jakékoli excentrické pohyby. Ale Uranovy prstence jsou excentrické a navíc skloněné k rovníkové rovině planety, obě dvě vlastnosti s typickou hodnotou  $\approx 10^{-3}$ . Nejširší prstenec  $\epsilon$  má také největší excentricitu, zhruba  $8 \cdot 10^{-3}$ , protože ve všech případech vzrůstá excentricita se vzdáleností od planety. Prstence vykonávají precesní pohyb kvůli zploštění planety a precese vnitřních a vnějších okrajů prstence se zdá být určitým způsobem svázána. Tyto zvláštnosti jsou pravděpodobně způsobeny gravitačními

poruchami vyvolanými blízkými měsíci, například Cordelia a Ophelia působí na prstenec  $\epsilon$ , vlastní gravitací prstence a srážkami částic.

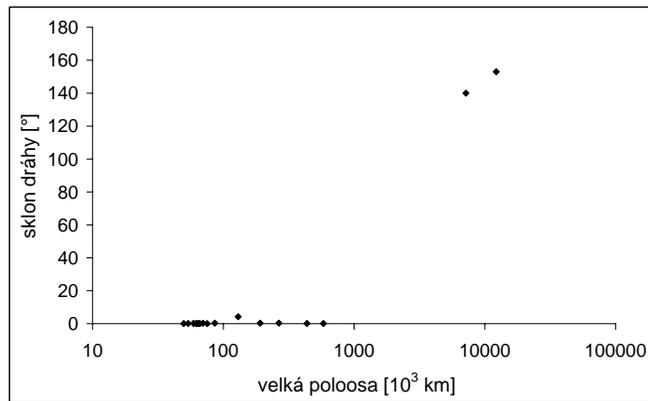
Podobně jako u hlavních Saturnových prstenců, velikosti částic ve většině hlavních Uranových prstenců se pohybují od  $\sim 1$  cm do  $\sim 10$  m. Složením se ale prstence výrazně liší. Na rozdíl od světlých částeček v Saturnových prstencích, částečky v prstencích Uranu jsou velmi tmavé s Bondovým albedem  $\sim 0,03$ , což je hodnota srovnatelná s hodnotami Bondova albeda komet. V obou případech to naznačuje přítomnost směsi složitých uhlovodíků v ledu. Na rozdíl od ostatních úzkých prstenců, fotometrie prstence  $\lambda$  v různých fázových úhlech naznačuje přítomnost částic menších než mikrometr. Systém Uranových prstenců obsahuje další prach rozprostřený v okolí prstenců, objevený při snímkování ve velkých fázových úhlech.

## 4.5 Měsíce

Uranovými blízkými měsíci jsou podle pořadí vzdáleností Cordelia, Ophelia, Bianca, Cressida, Desdemona, Juliet, Portia, Rosalind, Belinda a Puck. Cordelia je nejbližší známý Uranův měsíc, s velkou poloosou dráhy jen 49752 km. Krouží tedy pouhých 24193 km nad Uranovou oblačnou vrstvou, s oběžnou dobou jen 0,335 dne. Jde o nevelký objekt o průměru 26 km, který ohraničuje vnitřní okraj největšího prstence  $\epsilon$ . Vnější okraj tohoto prstence je udržován měsícem Ophelia o průměru asi 32 km. Měsíc Juliet má relativně větší průměr, asi 84 km, stejně tak Portia s průměrem 110 km. Největším měsícem z této skupiny Uranových satelitů je měsíc Puck s průměrem 154 km. Puck má také největší poloosu své dráhy, 86004 km, a oběžnou dobu 0,762 dne. Na jeho povrchu jsou pozorovatelné určité nerovnosti včetně jednoho výrazného kráteru.

Nejbližším měsícem ze skupiny velkých Uranových měsíců je Miranda, objevená až roku 1948 G. Kuiperem, která je z velkých měsíců svými rozměry  $240 \times 234 \times 233$  km také nejmenší. Její střední hustota činí  $1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , velká poloosa dráhy má hodnotu 129800 km a oběžná doba je 1,413 dne. Její dráha má malou excentricitu 0,003 a sklon  $4,22^\circ$ . Hodnota albeda je 0,27 a povrchové teploty  $-187^\circ \text{ C}$ . Je to hodnota stejná jako u Saturnova měsíce Tethys, Miranda je však od Slunce zhruba dvakrát vzdálenější. Povrch měsíce je zcela specifický. Pozorujeme zde staré i mladé terény, které jsou vůči sobě ostře ohraničeny. Zlomy a praskliny mají rozmanitou tvářnost. Mladší jsou oválné soustavy brázd a brázdy uspořádané do podoby V. Typické jsou velké výškové rozdíly až 20 km. Novější terén vznikl poruchami kůry a eruptivní aktivitou, jejichž příčina je dosud nejasná. Předpokládá se doplňkový tepelný zdroj, který by mohl pocházet ze slapového zahřívání planetou a mohl by způsobit proudy ledového materiálu za nízkých teplot a zvedání lehčího materiálu v ohraničených oblastech. Starší oblasti jsou bohatě pokryty impaktními krátery. Vzhledem k různorodosti povrchu se objevila hypotéza, že byl měsíc nárazem jiného tělesa rozbit a jeho úlomky se poté na oběžné dráze znovu spojily. Podle jiné varianty došlo k takovéto události dokonce několikrát.

Ariel obíhá za Mirandou po dráze s velkou poloosou 197200 km za 2,520 dne a má rozměry  $581 \times 578 \times 578$  km. Hustota je průměrná,  $1670 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Na povrchu pozorujeme



Obrázek 4.2: Závislost sklonu dráhy na velké poloose (v logaritmicím měřítku) pro 17 největších měsíců Uranu.

impaktní krátery a také mohutná riftová údolí, jejichž dna se jeví rovinatá a nejsou zřejmě zaplněna ledem. Stopy tečení materiálu v těchto údolích se dají nejspíše připsat čpavku, metanu nebo oxidu uhelnatému. Nacházíme zde i rozsáhlé hladké oblasti. Průměry kráterů jsou většinou nevelké, 5 až 10 km.

Umbriel je nejtemnější z velkých měsíců Uranu, vizuální geometrické albedo je 0,18. Hustota měsíce má hodnotu  $1400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , průměr je 1170 km. Kolem Uranu obíhá Umbriel s periodou 4,144 dne ve vzdálenosti 266000 km. Povrch je poměrně rovnoměrně pokryt množstvím starých kráterů. Dna několika kráterů jsou jasná a jeví luminiscenci. Poměrně nenápadné a pravděpodobně staré temnější oblasti jsou důsledkem vnitřních sil a tedy projevem ledového vulkanismu pozorovaného i na ostatních velkých Uranových měsících.

Titania je svým průměrem 1580 km největším Uranovým měsícem. Má hustotu  $1710 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , velkou poloosu dráhy 435800 km, oběžnou dobu 8,706 dne a albedo 0,27. Kromě četných menších kráterů zde podobně jako na Arielu nacházíme dlouhé brázdy, největší pozorovaná brázda má délku 1600 km a svědčí o vnitřních silách. Měsíc pokrývá také několik velkých impaktních pánví.

Oberon je nejvzdálenější velký měsíc Uranu. Krouží po dráze s velkou poloosou 582600 km s oběžnou periodou 13,463 dne a má i při své vzdálenosti vázanou rotaci jako ostatní velké měsíce planety. Dráhu má téměř přesně kruhovou, s výstředností 0,001 a sklonem  $0,10^\circ$  vzhledem k rovníku Uranu. Jeho hustota je  $1630 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , rovníkový průměr 1520 km a albedo 0,24. Měsíc má ledový povrch a je hustě pokryt starými impaktními krátery. Na okraji kotouče byl zaznamenán vrcholek o výšce 6 km. Na tělesu však nepozorujeme projevy vnitřní aktivity. Podobně jako na Jupiterově měsíci Kallisto nacházíme i zde jasné paprsky vyvrženin rozbíhající se od některých kráterů.

Vzdálených měsíců, stejně jako blízkých a velkých, má Uran ve srovnání se Saturnem

a především Jupiterem poměrně málo. Do skupiny vzdálených Uranových měsíců patří podle vzdálenosti S/2001 U3 s velkou poloosou dráhy přes 4 miliony km, dále Caliban, Stephano, Trinculo, Sycorax, S/2003 U3, Prospero, Setebos a S/2001 U2 s velkou poloosou téměř 21 milionů kilometrů. Kromě S/2003 U3 s přímým pohybem mají ostatní měsíce zpětný pohyb a všechny mají dráhu s velkou excentricitou. Největším tělesem z této skupiny Uranových měsíců je Sycorax s průměrem asi 120 km.

Tabulka 4.2: Vlastnosti 20 největších Uranových měsíců. Převzato z Kleczek (2002).

měsíc	hmotnost [ $10^{20}$ kg]	průměr/ rozměr [km]	hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	geom. albedo	velká poloosa [ $10^3$ km]	oběžná doba [dny]	sklon dráhy [°]	výstřednost
Ariel	13,53	$581 \times 578 \times 578$	1670	0,34	191,2	2,520	0,31	0,003
Úmbriel	11,72	1170	1400	0,18	266,0	4,144	0,36	0,005
Titania	35,27	1580	1710	0,27	435,8	8,706	0,14	0,002
Oberon	30,14	1520	1630	0,24	582,6	13,463	0,10	0,001
Miranda	0,66	$240 \times 234 \times 233$	1200	0,27	129,8	1,413	4,22	0,003
Cordelia		26		0,07	49,752	0,335	0,08	0,000
Ophelia		32		0,07	53,764	0,376	0,10	0,010
Bianca		44		0,07	59,165	0,435	0,19	0,001
Cressida		66		0,07	61,777	0,464	0,01	0,000
Desdemona		58		0,07	62,659	0,474	0,11	0,000
Juliet		84		0,07	64,358	0,493	0,07	0,001
Portia		110		0,07	66,097	0,513	0,06	0,000
Rosalinda		54		0,07	69,927	0,559	0,28	0,000
Belinda		66		0,07	75,255	0,624	0,03	0,000
Puck		154		0,07	86,004	0,762	0,32	0,000
Caliban		60			7169	579	140	0,082
Sycorax		120			12214	1289	153	0,51
Prospero		20			16100	1947		
Setebos		20			20	2235		
Stephano		20			20	675		

# Kapitola 5

## Neptun

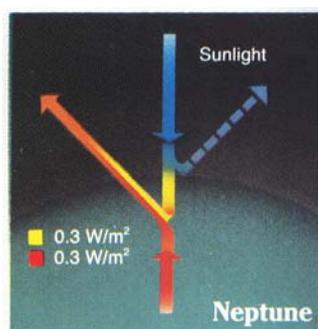
Neptun je osmou nejvzdálenější planetou od Slunce, nejmenší planetou ze skupiny velkých planet a jedinou planetou objevenou z rozboru rušivých sil. Jeho polohu z poruch Uranovy dráhy vypočítali nezávisle U. J. J. Le Verrier a J. C. Adams. Na vypočteném místě jej 23. září 1846 objevil J. G. Galle. Neptunův rovníkový poloměr má hodnotu 24766 km, což je přibližně 3,88 poloměrů Země. Jeho hmotnost činí  $102,43 \cdot 10^{24}$  kg, tedy asi 17,2 hmot Země. Průměrná hustota Neptunu je  $1640 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , což je ve skupině velkých planet nejvyšší hodnota. Pohybuje se kolem Slunce po dráze s excentricitou 0,0086 a velkou poloosou  $4496,6 \cdot 10^6$  km za 164,79 let. Sklon osy rotace k rovině dráhy je  $29,56^\circ$  a perioda rotace dosahuje hodnoty 16,11 hodin.

### 5.1 Stavba a složení

Neptun je svým složením velice podobný planetě Uran. Je tedy tvořen především původním ledem, horninami, vodíkem a heliem. Vodík a helium jsou však v Neptunu ve srovnání s Jupiterem a Saturnem zastoupeny jen nepatrně.

Také stavba obou planet se téměř neliší. Ve středu Neptunu se zformovalo husté jádro z křemičitanů a železa a kolem jádra se nachází plášť skládající se z ledů vody, metanu a amoniaku. Ačkoli tyto látky nazýváme ledy, směs vody, metanu a amoniaku za obrovského tlaku i teploty hluboko uvnitř Neptunu bude ve skutečnosti horká tekutina. Ani na Neptunu nedošlo k vytvoření kovového vodíku v důsledku nízkého tlaku v nitru a malého zastoupení vodíku v planetě. Vodík je molekulární a je nahromaděn především ve vnějších vrstvách planety.

Na rozdíl od Uranu má Neptun poměrně silný vlastní vnitřní zdroj tepla a vyzařuje proto ve formě infračerveného záření více energie než přijímá ze Slunce. Je to způsobeno stejným procesem jako v případě planety Jupiter, tedy pomalým smršťováním a následným ochlazováním planety nazvaným Kelvin-Helmholtzův mechanismus.



Obrázek 5.1: Tepelný tok v planetě Neptun. Modrý paprsek označuje dopadající sluneční energii, která je z části rozptýlena zpět do prostoru atmosférou planety (čárkovaně) a z části pohlcena a přeměněna v infračervené záření (žlutě). Toto záření, spolu s infračerveným zářením proudícím z vnitřních částí planety (červeně), je teplo, které opouští povrch planety. Převzato z Beatty, Chaikin (1990).

## 5.2 Atmosféra

Plášť Neptunu plynule přechází v primární atmosféru planety, složenou z 85% molekulárního vodíku, 13% helia, necelých 2% metanu a nepatrného množství jiných uhlovodíků. Atmosféra je tvořena průhlednou vrstvou uhlovodíků, asi 30 km pod touto vrstvou se nachází průhledná vrstva acetylenu a etanu. Atmosféra dále pokračuje nesouvislými poloprůhlednými oblaky metanu a základní neprůhlednou oblačností obsahující pravděpodobně sirovodík a čpavek. Vysoké atmosférické zákaly jsou zřejmě z uhlovodíků. Ty místy tvoří velké kapky, které mohou klesat jako déšť do hlubších a teplejších vrstev atmosféry. Reagují pak s vodíkem a tvoří se metan, který výstupné proudy vynášejí výše a dochází tak ke koloběhu.

Neptun vykazuje oblačnou strukturu uspořádanou do pásů, výraznějších než u Uranu. Sklon jeho rotační osy není tak velký a více energie se tedy hromadí v rovníkové oblasti planety. Na 1 m<sup>2</sup> povrchu dopadá zhruba 1000× méně sluneční energie než na Zemi, přesto je však Neptun velmi dynamickou planetou. Vanou na něm nejprudší větry ze všech planet dosahující rychlosti až 2400 km·h<sup>-1</sup>, a to od východu k západu, tedy proti rotaci planety. Neptun se při pozorování jeví modrý, je modřejší než Země. Modrou barvu způsobuje metan přítomný v jeho atmosféře, který pohlcuje dlouhovlnný konec slunečního spektra a odráží se jen jeho modrá část.

Nejvýraznějším útvarem v atmosféře Neptunu je Temná skvrna. Stejně jako v případě Jupiterovy Rudé skvrny se jedná o obrovskou anticyklonu. Rozlohou odpovídá průměru Marsu. Nachází se přibližně na 20° jižní šířky a pohybuje se směrem k západu rychlostí 1200 km·h<sup>-1</sup>. Ve srovnání s Rudou skvrnou je ale mnohem proměnlivější. 50 až 75 km nad Temnou skvrnou se neustále vznášejí bílá oblaka cirrovitého typu z krystalků metanu. Na 30° severní šířky byl zaznamenán dlouhý a úzký světlý oblak, vrhající stín na hlavní oblačnou vrstvu pod ním.

## 5.3 Magnetosféra

Po prozkoumání Uranu dorazil v roce 1989 Voyager 2 také k planetě Neptun. Byla zjištěna složitá magnetosféra, způsobená, stejně jako v případě Uranu, velkým sklonem dipólu k rotační ose, zhruba  $47^\circ$ , a posunutím středu dipólu od středu Neptunu podél rotační osy, představujícím asi  $0,55 R_N$ . Velký sklon magnetické a zároveň rotační osy způsobuje velmi zvláštní situaci. Při rotaci planety se konfigurace podobná Zemi střídá s geometrií, kdy magnetická osa míří ke Slunci a sluneční vítr proniká přímo do pólu planety. Triton, největší Neptunův satelit, přispívá k magnetosférickému plazmatu jen nepatrně. Byly detekovány rádiové emise ve frekvenčním rozsahu od několika do stovek kHz. Stejně jako u všech předešlých planet je i u Neptunu kolem magnetických pólů pozorována polární záře.

## 5.4 Prstence

Existenci prstenců kolem Neptunu předpověděly zákryty hvězd Neptunem v roce 1985. Jejich podrobnou strukturu však bylo možno poznat až ze snímků Voyagera 2, pořízených v srpnu roku 1989. Čtyři objevené prstence byly označeny rokem objevu, písmenem N, pořadovým číslem objevu a písmenem R. Později byly pojmenovány podle vědců, kteří významně přispěli k poznání Neptunu.

Tabulka 5.1: Neptunovy prstence. Převzato z Bertotti a kol. (2003).

prstenec	radiální vzdálenost [km]	$\tau$
Galle (1989N3R)	$\approx 42000$	$10^{-4}$
Le Verrier (1989N2R)	$\approx 53200$	$10^{-3}$
Lassell (1989N4R)	$\approx 53200$	$10^{-4}$
Arago (1989N4R)	$\approx 57200$	
bezejmenný	61953	
Adams (1989N1R)	62933	$10^{-2}$
oblouky v Adamsově prstenci:		
Courage, Liberté	62933	0,12
Egalité 1, 2	62933	0,12
Fraternité	62933	0,12

Neptunovy tenké prstence jsou charakteristické výraznými azimutálními změnami jasu nazvanými v Adamsově prstenci oblouky. Oblouky byly zaznamenány již při zákrytech v roce 1985. Segment  $40^\circ$  Adamsova prstence obsahuje pět oblouků, Courage, Liberté, Egalité 1, Egalité 2 a Fraternité, s azimutálním rozsahem mezi  $1^\circ$  a  $10^\circ$ . Každý z nich se skládá z menších oddělených zhuštěnin, a to až do hranice rozlišení, která je několika kilometrů. Pozdějšími pozorováními provedenými Hubblovým teleskopem bylo zjištěno,

že uspořádání oblouků je stabilní od doby jejich objevení. Druhým úzkým prstencem je uvnitř Adamsova prstence Le Verrier. Oba prstence vypadají velmi podobně, ale Le Verrier neobsahuje světlejší oblouky. Dále se zde nachází slabý prstenec Lassell, jehož vnější zjasnění dostalo samostatné označení Arago, a široký prstenec Galle blíže planetě.

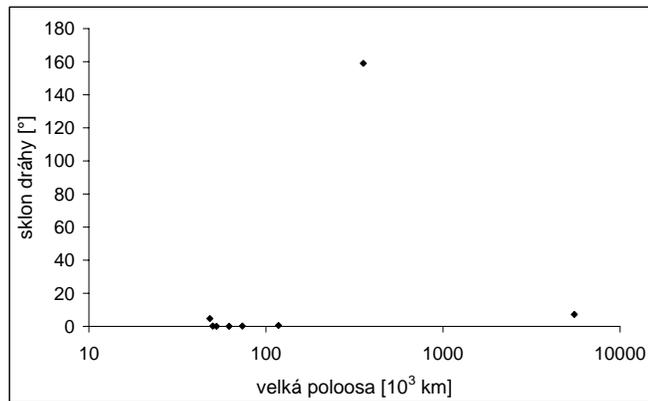
Následkem velmi omezených dat, která máme k dispozici, je složení Neptunových prstenců i velikost částic v nich nejistá. Podle dostupných fotometrických měření by však prstence mohly být tvořeny z největší části prachem, jehož složení je podobné složení materiálu v prstencích Uranu. Tedy tmavým materiálem, pravděpodobně ledem s velkým podílem uhlovodíků. To je podobné vlastnostem povrchů četných blízkých měsíčků. Nejzajímavější úlohu mezi nimi má měsíček Galatea, nacházející se v bezprostřední blízkosti Adamsova prstence, které je přisuzováno udržování výrazných oblouků.

## 5.5 Měsíce

Nejbližším měsícem obíhajícím kolem Neptunu je Naiada o průměru 58 km, která obíhá po dráze s velkou poloosou 48227 km, tedy pouze 23461 km nad Neptunovou oblačnou vrstvou. Spolu s měsíci Thalassa a Despina ohraničuje Naiada vnitřní okraj prstence 1989N4R, který je však také lemován úzkým prstencem 1989N2R. Na vnitřním okraji úzkého prstence 1989N1R, nejvíce vzdáleného od Neptunu, je měsíc Galatea, který zřejmě tento okraj prstence udržuje. Dále následují Larissa a Proteus, které už obíhají mimo prstence. Z Neptunových blízkých měsíců je největší Proteus s rozměry  $218 \times 208 \times 201$  km, který má sice zaoblený tvar, ale není kulovitý. Proteus má z těchto měsíců také největší vzdálenost od planety, a to 117650 km.

Triton je největším Neptunovým měsícem a s průměrem 2705,2 km také jeho jediným opravdu velkým satelitem. Byl objeven W. Lassellem v roce 1846, tři týdny po objevu planety. Triton obíhá kolem Neptunu po dráze s velkou poloosou 354760 km, tedy srovnatelnou s dráhou Měsíce. Jeho dráha má sice téměř nulovou excentricitu, výjimečný je však její sklon téměř  $159^\circ$ . Triton tedy jako jediný satelit této velikosti obíhá kolem planety ve zpětném smyslu. Oběžná doba je 5,8769 dne a rotace je vázaná. Triton proto také rotuje v opačném smyslu než Neptun. Hustota  $2061 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ukazuje na větší obsah hornin než u ledových měsíců Saturnu a Uranu. Nejpodrobnější zobrazení satelitu poskytla sonda Voyager 2, která kolem Tritonu prolétla 25. srpna 1989. Triton je nejchladnějším známým tělesem, jeho povrchová teplota má hodnotu pouhých 38 K. Vodní led dosahuje při této teplotě pevnosti oceli. Přesto se nejedná o zcela zmrzlé a nehybné těleso. Například dusík se zde vyskytuje ve všech třech skupenstvích a přechod z jednoho skupenství do druhého je provázen pozoruhodnými efekty.

Na Tritonu pozorujeme dva hlavní typy povrchu. Rozsáhlé oblasti severní polokoule pokrývá temnější terén, jehož obdobu neznáme na žádném z těles sluneční soustavy. Velkou část zde zaplňuje oblast s nevelkými sníženinami téměř shodné velikosti, ohraničenými jakýmsi valy. Nejde však o impaktní krátery, sníženiny jsou si navzájem podobné, jsou až příliš pravidelně rozmístěny a jejich podoba je odlišná od starých a později erodovaných impaktních kráterů. Každý z detailů mohl vzniknout lokálním tavením a poklesem ledového



Obrázek 5.2: Závislost sklonu dráhy na velké poloose (v logaritmickém měřítku) pro 8 největších měsíců Neptunu.

povrchu. Nacházíme zde také velké sníženiny podobné extrémně plochým kalderám, ovšem bez pro kaldery typických valů. Připouští se však, že by mohlo jít o pozůstatky starých impaktních pánví. Podoba, kterou pozorujeme dnes, vznikla pravděpodobně výtokem ledových hmot o velmi nízké viskozitě. Mohlo jít o vodní led, ale možná i o směs zmrzlé vody a čpavku. Jedna ze sníženin je při průměru 200 km ohraničena oblastí vyšší jen o 200 m. Jiná sníženina má méně pravidelný obvod a asi trojnásobnou plochu. Jinde pozorujeme plochou krajinu s nevelkým počtem malých, pravděpodobně impaktních a mladých kráterů. Dalším typem útvarů je několik dlouhých brázd, z nichž některé přecházejí ze severní polokoule na jižní.

Jižní polokoule je prakticky celá pokryta rozsáhlou světlou polární čepičkou, která se však v mnohém liší od podobně nazvaných oblastí na Marsu. Zatímco na Marsu jde o krajiny pokryté vodním ledem a zmrzlým oxidem uhličitým, Tritonovu zmrzlou oblast tvoří pravděpodobně vrstvy pevného dusíku, usazené v průběhu uplynulé jižní zimy. Nyní se zmrzlé usazeniny zvolna vypařují. Pod vrstvou zmrzlého dusíku jsou zřetelně patrné nerovnosti, včetně několika nevelkých impaktních kráterů. Nejpozoruhodnějším jevem jsou činné gejzíry. Netryská z nich voda, ale plynný a tekutý dusík a metan. Vystupující proud strhává ledové krystaly a zřejmě i prachové částice. Gejíry dosahují výše až 8 km a vyvržený materiál je unášen větrem až do vzdálenosti 140 km, kde na povrchu vytváří temný pruh kontrastující se světlým povrchem polární čepičky. Materiál je teplejší a zřejmě po dopadu na povrch způsobí sublimaci zmrzlých usazenin. Kromě vodních gejzíků na Zemi neznáme jinde podobný projev aktivity. Severní okraj polární čepičky je velmi nerovný, lemovaný temnější oblastí, a je zřetelné, že čepička zvolna ustupuje.

Triton má velmi řídkou atmosféru o povrchovém tlaku 1,5 Pa, tedy 0,000015 tlaku zemské atmosféry na úrovni mořské hladiny. Atmosféra vytváří zákal do výšky 13 km s říd-

kými oblaky. Stopy po gejzírech ukazují na její proudění. Hlavní složkou atmosféry je dusík, nepatrnou příměs tvoří metan. Zřetelný atmosférický zákal vytvářejí malé pevné částice o velikosti  $0,1 \mu\text{m}$ , které vznikají působením ultrafialového záření a částic z Neptunovy magnetosféry na atmosférický metan. Jde o tholin, který je pro tritonovu atmosféru zcela typický a způsobuje její červenohnědý smog.

Další zajímavou skutečností je střídání ročních dob. Severní nebeský pól Tritonu leží poblíž severního nebeského pólu Země. Pro standardní epochu 2000,0 má tuto polohu: rektascenze =  $2^{\text{h}} 25^{\text{min}} 38^{\text{s}}$ , deklinace =  $+83^{\circ} 56'$ , je tedy v souhvězdí Cefeia nedaleko Polárky. Na Tritonu tedy nastává situace podobná střídání ročních období na Zemi, kdy se střídavě ke Slunci natáčí severní a po půl roce jižní polokoule. Periodou je zde ale na rozdíl od Země 164,79 let.

Poněkud větší průměrná hustota, povrchová teplota a zachovalé povrchové útvary Tritonu naznačují, že jeho kůra je poměrně silná, asi 175 km, a tvořená tvrdým i pevným materiálem, kterým je při nízké teplotě vodní led. Ve větší hloubce za vyšší teploty a tlaku se předpokládá voda v kapalně fázi ve vrstvě o mocnosti zhruba 150 km. Pod touto vrstvou již začíná rozsáhlá oblast z hornin, bez zřetelně odlišeného jádra.

Z pozorované hustoty a především retrográdní dráhy, u tak velkých satelitů jinde neznámé, se usuzuje, že nejde o původní Neptunův měsíc, ale že byl Triton zachycen z heliocentrické dráhy, z oblasti Kuiperova pásu, možná současně s Nereidou.

Ze skupiny vzdálených Neptunových měsíců je nejvýraznější měsíc Nereida, satelit nepravidelného tvaru s průměrem 340 km. Krouží po dráze s velkou poloosou 5513400 km, má sklon  $7,23^{\circ}$ , především však nezvykle protáhlou dráhu s excentricitou 0,751. Další Neptunovy vzdálené měsíce jsou mnohem dále. Za Nereidou obíhá S/2002 N1 s velkou poloosou dráhy 15686000 km. K 11. květnu 2004 bylo těchto těles známo pět a neměla ještě přidělena svá jména. Největší ze skupiny, S/2002 N4, má průměr asi 60 km a obíhá po dráze s velkou poloosou 46570000 km, velkou výstředností 0,5273 a zpětně, má totiž sklon dráhy  $132,470^{\circ}$ . Nejvzdálenější z pěti je S/2003 N1, má velkou poloosu dráhy 46738000 km, které odpovídá oběžná doba přes 25 roků.

Tabulka 5.2: Vlastnosti 8 největších Neptunových měsíců. Převzato z Kleczek (2002).

měsíc	poloměr/ rozměr [km]	povrch ledový +	hvězdná velikost [mag]	geom. albedo	velká poloosa [10 <sup>3</sup> km]	oběžná doba [dny]	sklon dráhy [°]	výstřednost
Naiada	29	uhlíkový	24,7	0,06	48,227	0,2944	4,74	0,0003
Thalassa	40	uhlíkový	23,8	0,06	50,075	0,3115	0,21	0,0002
Despina	74	uhlíkový	22,6	0,061	52,53	0,3347	0,07	0,0001
Galatea	79	uhlíkový	22,3	0,062	61,95	0,4287	0,05	0,0001
Larissa	104×89	uhlíkový	22,0	0,053	73,55	0,5547	0,20	0,0014
Proteus	218×208×201	uhlíkový	20,3	0,064	117,65	1,1223	0,55	0,0004
Triton	1352,6	N <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, CO <sub>2</sub>	13,5	0,70	354,76	5,8769	159	0,000
Nereida	170	špinavý led	18,7	0,155	5513,4	360,1362	7,23	0,751

# Kapitola 6

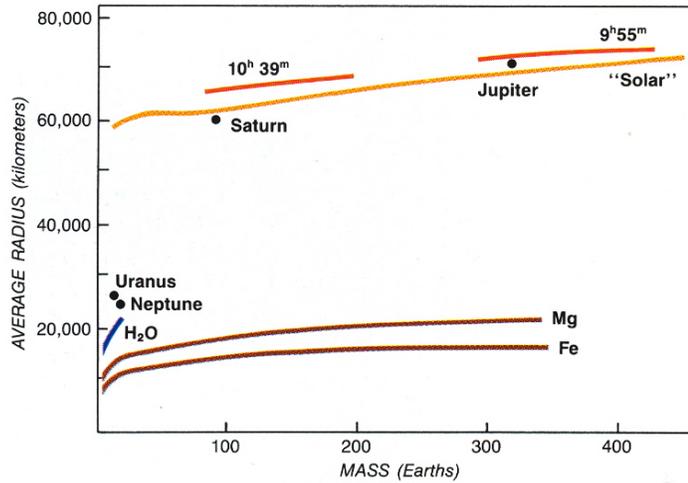
## Závěr

Všechny velké planety sluneční soustavy vznikly ze stejného oblaku mezihvězdného plynu a prachu, přesto se od sebe navzájem jednotlivá tělesa výrazně liší. Podle jejich vlastností lze velké planety rozdělit do dvou skupin, na plynné obry, jak označujeme Jupiter a Saturn, a ledové obry, kam řadíme Uran a Neptun. Plynní obři pravděpodobně vznikli ve stejné oblasti sluneční soustavy, kde nyní obíhají. Nejprve se z pevných částech, obíhajících kolem protoslunce, utvořily planetesimály. Částičky se snadno shlukovaly a hmotnost planetesimál rostla, až byly schopné svou gravitací kolem sebe zformovat plynnou obálku. Ledoví obři se naproti tomu pravděpodobně utvořili jinde, než kde v současné době obíhají kolem Slunce. Jádra Uranu a Neptunu mohla podle jedné teorie vzniknout mezi dráhami Jupiteru a Saturnu. Současné utváření Jupiteru a Saturnu pak zabránilo dalšímu růstu ledových obrů a obě planetesimály byly odvrženy dále od Slunce. Teprve v těchto odlehlejších částech sluneční soustavy si Uran s Neptunem vytvořily plynné obálky.

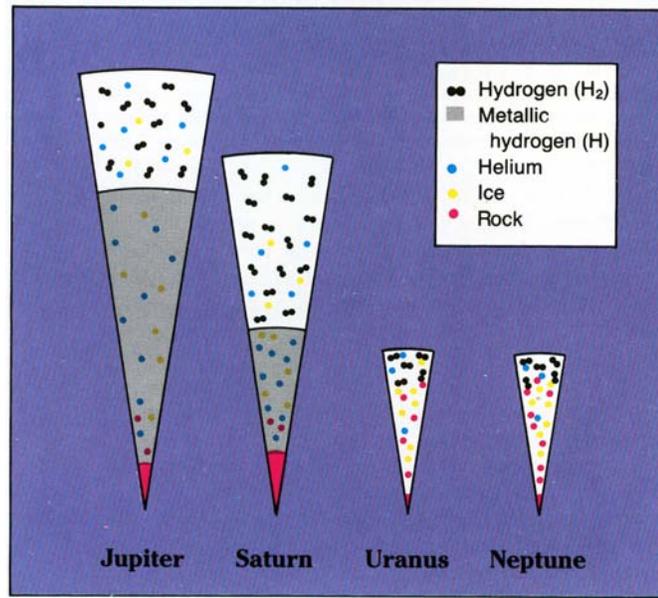
Rozdělení velkých planet na plynné a ledové obry je patrné především z jejich složení. Složení Jupiteru a Saturnu je velice podobné složení Slunce. Obě planety jsou tvořeny převážně původním vodíkem a heliem a nepatrným množstvím vody, metanu, amoniaku a prachových částic. Rozdíl mezi Saturnem a Jupiterem spočívá pouze v tom, že Saturn obsahuje o něco méně vodíku a helia. Uran a Neptun vznikly především z původního ledu a hornin a na rozdíl od plynných obrů obsahují jen malé množství vodíku a helia.

Nápadný je také rozdíl ve stavbě těchto těles. Jupiter a Saturn se skládají z velkého hustého jádra tvořeného pravděpodobně horninami nebo směsí hornin a ledu, dále z obalu z kovového vodíku a z vrstvy tekutého molekulárního vodíku. Uran a Neptun mají husté jádro křemičitanů a železa a plášť z ledů vody, metanu a amoniaku. Tlak v nitru obou ledových obrů ani množství vodíku v tělesech není dostatečné, aby u nich vznikla vrstva kovového vodíku jako u Jupiteru a Saturnu.

Jupiter, Saturn a Neptun mají vlastní vnitřní zdroje tepla a vyzařují proto ve formě infračerveného záření více energie než přijímají od Slunce. U Jupiteru a Neptunu je to způsobeno Kelvin-Helmholtzovým mechanismem, u Saturnu se na vzniku tepla podílí kromě Kelvin-Helmholtzova mechanismu také pozvolné klesání helia vodíkovou atmosférou ke středu planety. Uran jako jediná planeta ze skupiny vnitřní zdroj energie nemá nebo je příliš slabý na to, aby bylo možné jej detekovat.



Obrázek 6.1: Závislost průměrného poloměru planet v kilometrech na jejich hmotnosti v jednotkách hmot Země. Nejdelší křivka je závislost poloměru na hmotnosti vypočítaná pro tekuté těleso slunečního složení, jehož vnitřek je v rovnováze. Krátké oblouky označené rotačními periodami Jupiteru a Saturnu ukazují, jak by byly rotující planety s tímto složením zploštěny odstředivou silou. Ve spodní části grafu jsou křivky pro planety z čistého hořčíku a železa, představující terestrické planety, a křivka pro vodu vytvořená na základě experimentálně určených charakteristik pod tlakem. Tečky označují skutečné hodnoty pro všechny velké planety. Převzato z Beatty, Chaikin (1990).

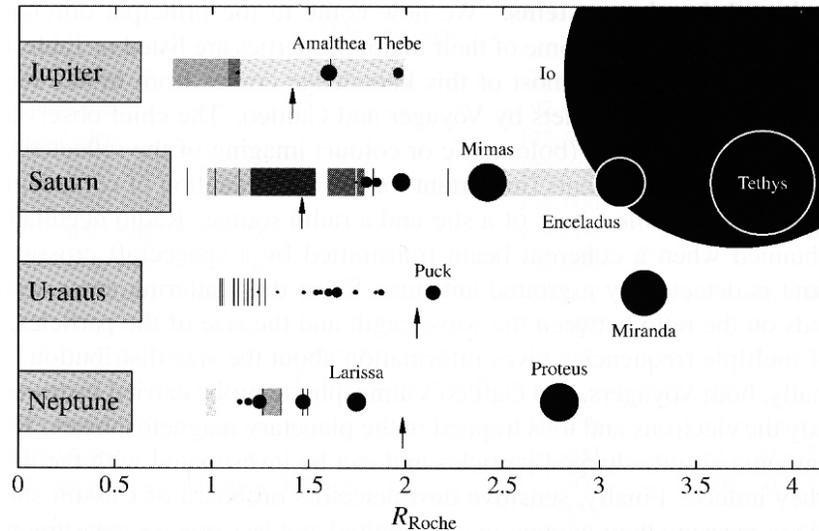


Obrázek 6.2: Průřez velkými planetami sluneční soustavy. Černě je znázorněn molekulární vodík, šedými plochami kovový vodík, modře helium, žlutě led a červeně horniny. Horninová jádra ve středu Jupitera a Saturna jsou přibližně stejně hmotná jako Uran a Neptun. Převzato z Beatty, Chaikin (1990).

Atmosféry všech velkých planet jsou primární a přecházejí pozvolna v těleso planety. Jupiterova a Saturnova atmosféra je tvořena především molekulárním vodíkem, heliem, metanem, amoniakem a v nepatrné míře také etanem, acetylénem, vodou, fosfanem, kyanovodíkem, oxidem uhelným a germaniem. Uranova a Neptunova zvláště molekulárním vodíkem, heliem, metanem a jinými uhlovodíky. Na všech planetách se vytvářejí oblačná pásma fixovaná vždy v určité šířce planety. Odlišný vzhled od všech ostatních planet mají tyto struktury pouze na Uranu kvůli velkému sklonu rotační osy planety. Na Uranu se také jako na jediné velké planetě hromadí nejvíce energie v polárních oblastech místo na rovníku. Atmosféry velkých planet jsou poměrně dynamické. Nejprudší větry vanou na Neptunu a také na Saturnu a proudění je většinou východně-západní. Většina útvarů v atmosférách planet vzniká a rychle zase zaniká, stabilnější jsou jen obrovské anticyklony Temná skvrna na Neptunu a Rudá skvrna na Jupiteru a bílé ovály BC, FA a DE na Jupiteru.

Velké planety sluneční soustavy mají poměrně rozsáhlé magnetosféry. Nejrozsáhlejší z nich je magnetosféra Jupiteru. Uvnitř magnetosfér planet se nachází několik měsíců a prstenců, které jsou zdroji plazmy. Specifická je z tohoto pohledu poloha měsíce Titanu, který obíhá kolem Saturnu přibližně ve vzdálenosti Saturnovy magnetopauzy. Magnetosféra ledových obrů je způsobena velkým sklonem dipólu k rotační ose a posunutím středu dipólu od středu planety podél rotační osy. Největší sklon dipólu k rotační ose má planeta Uran. U všech velkých planet byly detekovány rádiové emise a kolem magnetických pólů byly pozorovány polární záře.

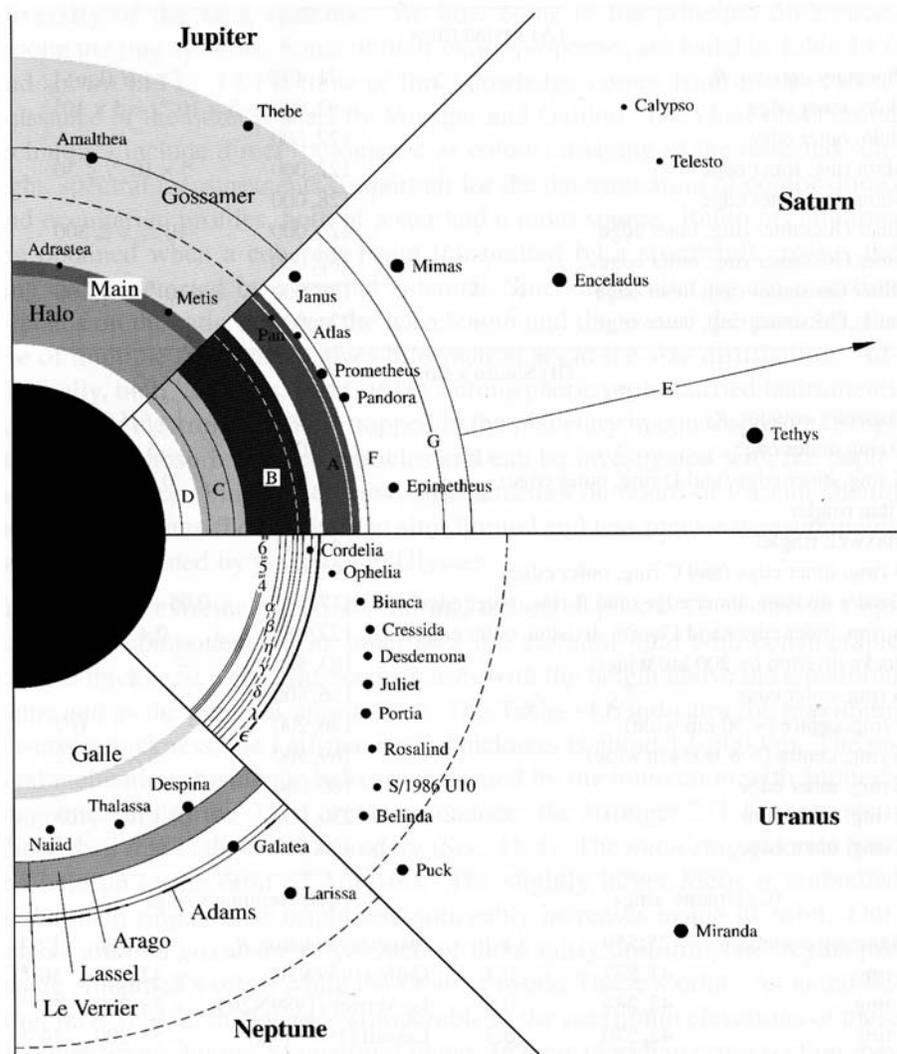
Nejvýraznější systém prstenců se nachází kolem planety Saturn. Po dlouhou dobu se předpokládalo, že se jedná o jedinou planetu s prstenci ve sluneční soustavě. Až ke konci dvacátého století byly pomocí zákrytů hvězd a především sondami Voyager 1 a 2 objeveny prstence nejprve planety Uran, poté Jupiter a nakonec Neptun. Nejjasnějšími Saturnovými prstenci jsou prstence B a A, oddělené od sebe Cassiniho dělením, a krepový prstenec C. Vykazují poměrně složitou mikrostrukturu. Jsou složeny téměř výhradně z vodního ledu s malou příměsí křemičitanů, oxidů železa a pravděpodobně i organických látek. Na prach jsou hlavní Saturnovy prstence chudé, vyskytuje se v nich v podobě radiální pruhů v prstenci B. Velikost úlomků se pohybuje od 0,1 cm v Cassiniho dělení a 30 cm u prstence B do 20 m. Kromě systému hlavních prstenců má Saturn také tři tenké prachové prstence D, G a E skládající se z částic velikosti  $\mu\text{m}$ . V oblasti prstenců obíhá kolem všech velkých planet určitý počet měsíců, které gravitační rezonancí udržují okraje některých prstenců a způsobují v nich zjasnění. Jupiterovy prstence jsou velmi řídké, skládají se z prstencovitěho hala, hlavního prstence a dvou pavučinových prstenců. Jsou tvořeny částicemi velikosti zhruba  $\mu\text{m}$ , složenými pravděpodobně z křemičitanů a uhlíkatých sloučenin. Prachové částičky jsou výrazně ovlivňovány negravitačními poruchami, proto je jejich životnost krátká a materiál v prstencích musí být poměrně mladý. Uran má devět hlavních prstenců. Všechny jsou velmi úzké, nejširší je prstenec  $\epsilon$ , excentrické a skloněné k rovníkové rovině planety. Prstence vykonávají precesní pohyb a precese vnitřních a vnějších okrajů prstence se zdá být určitým způsobem svázána. Velikost částic ve většině hlavních Uranových prstenců se pohybuje od 1 cm do 10 m. Částice jsou velmi tmavé, což naznačuje přítomnost směsi složitých uhlovodíků v ledu. Poslední objevený prstenec  $\lambda$  je pravděpodobně tvořen částičkami menšími než mikrometr. Neptunovy prstence jsou charakteristické



Obrázek 6.3: Poloha systémů prstenců a vnitřních měsíců vzhledem k Rocheově mezi, odpovídající satelitu se střední hustotou  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Poloměr planety je naznačen šedým obdélníkem nalevo. Vzdálenosti jsou uvedeny v kritických hodnotách tak, že Rocheova mez pro tekutý model je  $\cong 1,703$ . Pozorované vnitřní okraje systémů prstenců jsou ve vzdálenosti dosti blízké jedné, zatímco vnější okraje jsou blízko meze tekutého modelu. Měsíce uvnitř tohoto prahu musí mít konečnou pevnost nebo vyšší hustotu, což je nepravděpodobné. Malá šipka označuje mez synchronní rotace. Dráhy měsíků uvnitř této meze se slapovým působením vyvíjejí směrem k planetě. Velikosti měsíců jsou v libovolných jednotkách, ale měřené lineárně, aby byly ukázány jejich relativní poměry. Převzato z Bertotti a kol. (2003).

výraznými azimutálními změnami jasu vyskytujícími se v Adamsově prstenci. Tyto oblouky byly nazvány Courage, Liberté, Egalité 1, Egalité 2 a Fraternité. Dalšími Neptunovými prstenci jsou úzký prstenec Le Verrier, slabý prsteneц Lassell, jehož vnější zjasnění dostalo samostatné označení Arago, a široký prsteneц Galle blíže planetě. Prstence by mohly být tvořeny z největší části prachem, pravděpodobně ledem s velkým podílem uhlovodíků.

Kromě rozsáhlého systému prstenců je pro velké planety typické také velké množství měsíců. Výrazně nejvíce, k 26. září 2005 celkem 62, jich má Jupiter, nejméně, k témuž datu 13, jich obíhá kolem Neptunu. V systému měsíců obíhajících kolem všech velkých planet lze rozeznat tři skupiny. První skupinou jsou blízké měsíce s malými rozměry a většinou nepravidelným tvarem, jejichž dráhy mají malou excentricitu a jejich rotace je vázaná. Jedná se buď o původní měsíce planet nebo o planetky zachycené z heliocentrických drah během vzniku planety. Tyto měsíce se vyskytují v oblasti prstenců planet a navzájem se s nimi ovlivňují. Velké měsíce obíhají ve střední oblasti soustavy měsíců dané planety blízko roviny jejího rovníku a jejich dráhy jsou velice blízké kružnicím. Vznikly přímo během procesu vzniku velkých planet. Do této skupiny patří Jupiterovy měsíce Io, Europa, Ganymed, Kallisto, Saturnův Titan typický svou hustou atmosférou z molekulárního dusíku



Obrázek 6.4: Systémy prstenců Jupiteru, Saturnu, Uranu a Neptunu jsou porovnány za použití příslušného poloměru planety jako jednotky. Čárkovaně jsou vyznačeny polohy synchronních drah (s dobou oběhu rovnou periodě rotace planety a jejího magnetického dipólového pole). V obrázku jsou také vyznačeny malé blízké měsíce planet. Dráhy měsíců uvnitř korotační vzdálenosti budou vlivem slapového působení pravděpodobně stáčeny směrem k planetě. Některé měsíce, například Metis, Adrastea a Thebe pro Jupiter nebo Enceladus pro Saturn, obíhající v blízkosti vnějšího okraje prstence nebo uvnitř něj, jsou nepřetržitým zdrojem částic prstenců. Jiné měsíce, jako například Prometheus a Pandora pro Saturnův prstenec F, Cordelia a Ophelia pro Uranův prstenec  $\epsilon$  nebo Galatea pro oblouky v prstencích Neptunu, udržují materiál prstenců v úzkých pásech. Převzato z Bertotti a kol. (2003).

a uhlovodíků nebo Uranovy měsíce Miranda, Ariel, Umbriel, Titania a Oberon. Jediný velký měsíc Neptunu, Triton, byl pravděpodobně zachycen z oblasti Kuiperova pásu. Vzdálené měsíce velkých planet jsou planetky zachycené z heliocentrických drah. Tato tělesa mají malé rozměry a nepravidelný tvar, rotují většinou retrográdně, typický je pro ně velký sklon dráhy a také větší excentricita. Právě vzdálené měsíce jsou skupinou měsíců, u které můžeme očekávat jejich početní růst.

Tabulka 6.1: Shrnutí základních údajů obřích planet sluneční soustavy. Převzato z Kleczek (2002).

vlastnosti	Jupiter	Saturn	Uran	Neptun
hmotnost [ $10^{24}$ kg]	1898,6	568,46	86,83	102,43
poloměr rovníkový [km]*	71492	60268	25559	24766
polární [km]	66854	54364	24973	24342
průměrný [km]	69911	58232	25362	24624
zploštění	0,065	0,0980	0,023	0,0171
průměrná hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	1326	687	1270	1640
tíhové zrychlení** [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]	23,12	8,96	8,69	11,0
úniková rychlost [ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	59,55	35,5	21,3	23,5
Bondovo albedo	0,34	0,75	0,30	0,290
geometrické albedo	0,52	0,47	0,51	0,41
sluneční konstanta [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	51,0	15,0	3,71	1,47

\* pro hladinu  $10^5$  Pa

\*\* na rovníku, v hladině  $10^5$  Pa

<b>pohyb</b>	<b>Jupiter</b>	<b>Saturn</b>	<b>Uran</b>	<b>Neptun</b>
velká poloosa [ $10^6$ km]	778,4	1427	2869,6	4496,6
hvězdný rok [dny]	4332,589	10759,22	30685	60190
tropický rok [dny]	4330,595	10746,94		59799,9
perihel [ $10^6$ km]	740,6	1347,6	2734	4458,0
afel [ $10^6$ km]	816,0	1506,4	3005,2	4535,2
perioda rotace [hodiny]	9,925	10,656	17,24	16,11
střední rychlost v dráze [ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	13,07	9,66	6,82	5,43
sklon dráhy k ekliptice [ $^\circ$ ]	1,305	2,489	0,773	1,77
výstřednost	0,048	0,05565	0,047	0,0086
sklon osy k dráze [ $^\circ$ ]	3,12	26,73	97,86	29,56

atmosféra	Jupiter	Saturn	Uran	Neptun
tlak na povrchu [Pa]	$\gg 10^7$	$\gg 10^7$	$\gg 10^7$	$\gg 10^7$
průměrná teplota [K]	129	97		58
teplota v hladině $10^5$ Pa [K]	165	134	76	72
hustota v hladině $10^5$ Pa [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	160	0,19	0,42	0,450
rychlost větrů	0-150	0-400	0 - 200	0 - 200
výškový stupeň [km]	27	59,5	27,7	19,1 - 20,3
průměrná molekulová váha [ $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]	2,22	2,07	2,64	2,53 - 2,69
složení: hlavní složky	89% H <sub>2</sub> , 11% He	89% H <sub>2</sub> , 11% He	89% H <sub>2</sub> , 11% He	80% H <sub>2</sub> , 19% He
stopové prvky (ppm)	2000 CH <sub>4</sub> , 200 NH <sub>3</sub> , 20 deuteridu vodíku, 5 C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> , 1 H <sub>2</sub> O	3000 CH <sub>4</sub> , 200 NH <sub>3</sub> , 2 C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>
aerosoly	amoniakový led, vodní led, hydrogensulfid amonný	amoniakový led, vodní led, hydrogensulfid amonný	amoniakový led, vodní led, hydrogensulfid amonný, metanový led	amoniakový led, vodní led, hydrogensulfid amonný, metanový led

<b>magnetosféra</b>	<b>Jupiter</b>	<b>Saturn</b>	<b>Uran</b>	<b>Neptun</b>
sklon dipólu k rotační ose [°]	9,6	< 1	58,6	46,9
vzdálenost středu dipólu od středu planety [km]	9000	2411		
posunutí středu dipólu od středu planety podél rotační osy [km]			7667,7	13621,3

# Literatura

- [1] Beatty J. K., Chaikin A. (1990): The New Solar System. Cambridge university press, Cambridge.
- [2] Bertotti B., Farinella P., Vokrouhlický D. (2003): Physics of the Solar System. Dordrecht, Cambridge.
- [3] Kleczek J. (2002): Velká encyklopedie vesmíru. Academia, Praha.
- [4] Příhoda P. (2003): Planety typu Jupitera z pohledu nových kosmických výzkumů. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* ročník 48 (2003), číslo 1, 15-30.
- [5] Příhoda P. (2004): Měsíce ve sluneční soustavě (1. část). *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* ročník 49 (2004), číslo 3, 206-217.
- [6] Příhoda P. (2004): Měsíce ve sluneční soustavě (2. část). *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* ročník 49 (2004), číslo 4, 268-280.
- [7] Příhoda P., Holovská H. (1995): Průvodce astronomií. Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, Praha.
- [8] Vanýsek V. (1980): Základy astronomie a astrofyziky. Academia, Praha.
- [9] [http://ssd.jpl.nasa.gov/sat\\_discovery.html](http://ssd.jpl.nasa.gov/sat_discovery.html)