

Pavel Příhoda

Planety typu Jupitera z pohledu nových kosmonautických výzkumů

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 48 (2003), No. 1, 15--30

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141157>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2003

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Planety typu Jupitera z pohledu nových kosmonautických výzkumů

Pavel Příhoda, Praha

Typické znaky velkých planet

Čtyři velké planety sluneční soustavy, Jupiter, Saturn, Uran a Neptun, které jsou také označovány jako planety typu Jupitera, představují vcelku homogenní skupinu. Od planet terestrických se liší zcela zásadně. Ukažme na jejich typické znaky a porovnejme je třeba se Zemí jako představitelkou planet zemského typu (viz [1]), aby vynikly markantní rozdíly mezi oběma skupinami.

1. Velikost a hmotnost: Jak už název tohoto typu planet naznačuje, jde o tělesa značné velikosti a hmotnosti, jak nejpřehledněji ukazuje tabulka 1.

TABULKA 1.

Planeta	Rovňkový průměr (km)	Polární průměr (km)	Hmotnost (Země = 1)
Jupiter	142 984	133 708	317,9
Saturn	120 536	108 728	95,2
Uran	51 118	49 946	14,5
Neptun	49 528	48 682	17,1
Země	12 756	12 713	1,0

Přesto součet hmotností velkých planet představuje pouze 1/748,78 hmotnosti Slunce. Naproti tomu je součet hmotností velkých planet 223,53krát větší než součet hmotností planet zemského typu včetně Měsíce. (Hmotnost Země $M_Z = 5,973\,699 \cdot 10^{24}$ kg, hmotnost Slunce $M_S = 1,988\,92 \cdot 10^{30}$ kg.)

2. Zploštění a rotační perioda: Z tabulky 1 je ihned patrné, že velké planety mají značné zploštění. To souvisí s jejich rychlou rotací. Zploštění je definováno výrazem $(r_r - r_p)/r_r$, kde r_r je rovňkový poloměr a r_p polární poloměr planety.

Ing. PAVEL PŘÍHODA (1934), Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, Královská obora 233, 170 21 Praha 7.

TABULKA 2.

Planeta	Zploštění	Perioda rotace vnitřních oblastí (h)	Perioda rotace atmosféry (h)
Jupiter	1/15,4	9,925	9,841
Saturn	1/10,2	10,675	10,233
Uran	1/43,6	17,24	16 až 16,9
Neptun	1/58,5	16,11	12,4 až 21,0
Země	1/298	23,934	–

Z tabulky 2 také ihned vidíme, že velké planety nerotují jako pevné těleso, ale v různých hloubkách pod povrchem rotují s odlišnou periodou. Periody rotace vnitřních oblastí jsou totožné s periodami rotace magnetického pole planet. Vrstva planety, která by se dala označit jako viditelný povrch, je vlastně vrstva souvislé neprůhledné oblačnosti. Na rozdíl od terestrických planet bereme jako poloměr velké planety právě vzdálenost této vrstvy od středu planety, nikoliv poloměr pevného tělesa. V případě Jupitera leží nad neprůhlednou vrstvou oblačnosti asi 450 km vcelku průzračné atmosféry, u Uranu vidíme do hloubky asi 50 km pod vrchní průhlednou oblačnou vrstvou, Neptunovu atmosféru můžeme sledovat do hloubky 80 km od horní řídké oblačné vrstvy. Doba rotace útvarů na povrchu planet závisí také na planetografické šířce. Nápadné a dobře prostudované je to u Jupitera. Perioda rotace atmosféry, uvedená v tabulce 2, se týká rovníkové oblasti. Střední planetografické šířky Jupitera (planetografickou šířku Jupitera můžeme označit jako jovigrafickou) mají periodu rotace o něco delší, a to 9,928 h. Velký rozptyl vykazují zejména doby rotace atmosférických útvarů na Neptunu.

3. Hustota velkých planet je podstatně nižší než hustota planet zemského typu, jak lze snadno vyčíst z výše uvedených hodnot. Rekordně nízkou střední hustotu $710 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ má Saturn. Střední hustota Jupitera je $1330 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, Uranu $1240 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a Neptuna $1670 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Porovnáme-li tyto hodnoty se střední hustotou Slunce, $1408 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, vidíme, že se příliš neliší, a naopak jsou dosti odlišné od střední hustoty Země, $5514,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Zřetelně se tedy nabízí předpoklad, že i chemické složení velkých planet se nebude příliš lišit od slunečního — převažovat by měl zřejmě vodík s velkým zastoupením helia. To bylo skutečně potvrzeno přímým měřením v atmosféře Jupitera, jak uvedeme dále. Teoretické modely Jupitera, které sledují růst tlaku a teploty s hloubkou, ukazují, že pod atmosférou leží mohutná vrstva plynokapalného molekulárního vodíku a helia, která v hloubce 0,2 poloměru planety přechází v kovový vodík s heliem v kapalném stavu. U středu všech velkých planet lze předpokládat hustší jádro z hornin a zřejmě i kovů. Zhruba řečeno však jde o kapalné planety.

4. Velké planety mají významné vlastní zdroje energie a uvolňují jí víc, než získávají od Slunce. Země přijímá daleko více energie od Slunce, než uvolňuje z vlastních zdrojů. Naproti tomu například osvětlená polokoule Jupitera dostává od Slunce zhruba 4,5krát více zářivé energie než Země, ale Jupiter uvolňuje přibližně dvojnásobně víc vlastní

energie. Všechny velké planety uvolňují dvakrát až třikrát více vnitřní energie, než přijímají od Slunce. Tato skutečnost zřejmě souvisí s jejich větší hmotností a vnitřní stavbou, ale skutečné zdroje vlastní energie nejsou jednoznačně známy.

5. Magnetické pole všech planet typu Jupitera je dalším jejich charakteristickým znakem. Pole jsou silnější a rozsáhlejší než zemské, opět souvisejí se stavem látky v nitru a vyvolávají v okolí planet různé zajímavé efekty, o nichž se zmíníme později.

6. Bohaté soustavy satelitů jsou dalším typickým rysem velkých planet. V tomto případě souvisí s větší gravitační silou těchto planet a s jejich pohybem v oblasti, kde se vyskytuje nebo vyskytoval dostatek malých těles — planetek nebo planetesimál. Tato tělesa mohou být velkými planetami zachycena, takže přejdou z heliocentrické dráhy na dráhu planetocentrickou. Některé větší satelity vznikly podle všeho u své mateřské planety podobným procesem, kterým se vytvářely planety, tedy akrecí — spojováním z menších těles v prachoplenném prostředí. To se týká zejména velkých satelitů Jupitera. Tento proces zřejmě časově velmi těsně navazoval na proces vzniku planet. Počet objevených satelitů zejména v poslední době narůstá, takže ke květnu 2002 jich bylo známo celkem 101, z toho 39 u Jupitera, 30 v soustavě Saturna, 20 u Uranu a 8 v soustavě Neptuna (Země má jeden, Mars dva a Pluto jeden satelit).

7. Prstence velkých planet souvisejí s větším počtem jejich satelitů. Skládají se z malých pevných těles, která jako droboučké satelity obíhají kolem planety, a také z prachu. Jsou známy i plynné prstence. Pohyb pevných tělísek v prstenech vyvolává různé efekty, zajímavé z hlediska nebeské mechaniky. Vznik prstenů z pevných tělísek lze vysvětlit slapovými silami, které roztrhaly větší měsíčky při překročení Rocheovy meze. Podrobné pojednání o soustavách satelitů, o jednotlivých satelitech a prstencích by nás však zavedlo do jiného tématu, takže si jich všimneme jen okrajově.

8. Značná vzdálenost velkých planet od Slunce není nijak samozřejmá; to ukázaly objevy podobně velkých mimoslunečních planet (extrasolárních, také ES-planet), těles obíhajících kolem jiných hvězd. Seznam, který vypracoval na Pařížské observatoři Jean Schneider, k 12. únoru 2003 uvádí 91 hvězd, v jejichž okolí byla zjištěna planeta, ve dvanácti případech i více, takže k uvedenému datu bylo známo 105 ES-planet. Jejich hmotnost je v řadě případů srovnatelná s Jupiterem, seznam ale zahrnuje tělesa až 13krát větší hmotnosti než Jupiter. Při hledání byla zachycena i tělesa daleko větší hmotnosti, v jednom případě až 60násobku Jupitera, která zřejmě patří k jiné třídě těles a v tomto článku se jimi zabývat nebudeme. Téměř všechny extrasolární planety byly objeveny nepřímou, spektrograficky. Při oběhu planety a hvězdy kolem společného těžiště dochází k periodickému přibližování a vzdalování hvězdy, které se ve spektru hvězdy prozradí střídavým dopplerovským posuvem spektrálních čar k fialovému a červenému konci viditelného spektra. Na tomto principu pracuje aparatura ELODIE na observatoři Haute Provence ve Francii, kterou byla objevena první extrasolární planeta u hvězdy 51 Peg v roce 1995 (pozorování začalo v r. 1994). Objevené extrasolární planety jsou většinou blízko svých hvězd: například velká poloosa dráhy jedné ze dvou známých planet u hvězdy HD 83443 je 0,038 AU, tedy jen $5,685 \cdot 10^6$ km. Tomu pocho-pitelně odpovídá krátká oběžná doba, u uvedené planety jen 2,9861 dne. Další typickou

vlastností je velká excentricita dráhy těchto těles, v tomto případě $e = 0,08$, výjimkou však nejsou excentricity větší než 0,5. Tato tělesa jsou svými hvězdami ohřívána na vysokou teplotu a začal se pro ně užívat název „horcí Jupiteri“. Představitelem tohoto typu je právě planeta hvězdy 51 Peg.

Je jasné, že velký počet horkých Jupiterů je výsledkem výběrového efektu dané pozorovací metody — snáze zjistíme tělesa větších hmotností a s krátkou oběžnou periodou. Pokud tyto ES-planety vznikly podobně jako Jupiter ve vzdálenější oblasti protoplanetárního disku, bylo by nutné ještě vysvětlit, proč se ke své hvězdě později přiblížily tak těsně. Odpověď na tuto otázku řeší několik hypotéz. Nepříjemné je, co takový přesun planety k její hvězdě způsobí s drahami menších planet, jejichž existenci v takové vznikající soustavě také předpokládáme. Část menších planet přitom nutně skončí pádem na svou hvězdu nebo na velkou planetu a část může být vypuzena do mezihvězdného prostoru. Ve sluneční soustavě mají dráhy planet malou výstřednost a velké planety obíhají po drahách natolik velkých, že rušivě jen málo zasahují do uspořádání drah planet zemského typu. Právě pozorování mimoslunečních planet ukazuje, že takové uspořádání drah nemůžeme brát jako samozřejmost; teprve další sledování ukáže, zda naše sluneční soustava je či není v tomto ohledu výjimečná.

Tabulka 3 shrnuje některé dráhové elementy velkých planet sluneční soustavy.

TABULKA 3.

Planeta	Velká poloosa dráhy (AU)	Excentricita	Sklon dráhy (°)	Siderická doba oběhu (roky)
Jupiter	5,20206	0,04895	1,3037	11,86223
Saturn	9,58122	0,05744	2,4857	29,45772
Uran	19,13017	0,04991	0,7718	84,01312
Neptun	29,94729	0,00963	1,7713	164,79395

Elementy se mírně mění; v tabulce uvádíme oskulační dráhové elementy zhruba pro polovinu roku 2002 (přesněji pro MJD 52 440). Z toho, co jsme uvedli, je zřejmé, že velké planety sluneční soustavy mají řadu společných znaků a že existující rozdíly mezi nimi jsou menší než mezi planetami zemského typu.

Kosmické sondy k velkým planetám

Velký pokrok v poznávání velkých planet přinesla až kosmonautika a výsledky několika sond. Jako první zamířily do tohoto prostoru sondy nazvané příznačně Pioneer. V březnu 1972 byl vypuštěn Pioneer 10, který uskutečnil průzkum Jupitera v prosinci 1973. Pioneer 11 startoval v dubnu 1973, 3. prosince 1974 proletěl nad oblačnou vrstvou Jupitera ve výšce 42 828 km a získal zajímavé záběry polárních oblastí, které se ze Země jeví na obvodu kotouče planety a jsou špatně pozorovatelné. Gravitační pole Jupitera změnilo dráhu sondy tak, že se sonda přiblížila ke Slunci na vzdálenost 3,75 AU, znovu se začala od Slunce vzdalovat, zamířila k Saturnu, po nevelké korekci

dráhy prolétla 30 000 km nad vnějším okrajem jeho prstenů a 1. září 1979 se přiblížila na 21 400 km k souvislé vrstvě Saturnovy oblačnosti.

Detailnější průzkum velkých planet provedly dvě téměř identické meziplanetární sondy Voyager 1 a 2. Zejména Voyager 2 využil příznivého postavení velkých planet a postupně navštívil všechny. Tabulka 4 ukáže „jízdní řád“ obou sond nejprehledněji.

TABULKA 4.

	Voyager 2	Voyager 1
Start	20. 8. 1977	5. 9. 1977
Průlet kolem Jupitera	10. 7. 1979	5. 3. 1979
Průlet kolem Saturna	26. 8. 1981	13. 11. 1980
Průlet kolem Uranu	24. 1. 1986	—
Průlet kolem Neptuna	25. 8. 1989	—

Z tabulky vidíme, že sondy byly očíslovány podle pořadí průletu kolem Jupitera. Voyager 1 letěl po rychlejší dráze, která však nedovolila průlet kolem Uranu a Neptuna.

Koncem 20. století se při průzkumu Jupitera a jeho satelitů uplatnila sonda Galileo. Po startu v říjnu 1989 proletěla v únoru 1990 kolem Venuše, kolem Země pak v prosinci 1990 a podruhé v prosinci 1992. Tyto průlety sondu urychlily tak, že zamířila k Jupiteru.¹⁾ Od sondy se pak oddělilo pouzdro, které provedlo přímý průzkum Jupiterovy atmosféry. Sama orbitální část přešla na planetocentrickou (resp. jovicentrickou) dráhu a studovala zejména satelity planety.

K Saturnu nyní směřuje sonda Cassini, která má v roce 2004 přejít na planetocentrickou dráhu a studovat planetu s okolím. Součástí sondy je modul Huyghens, který se od sondy oddělí a zamíří k satelitu Titan, druhému největšímu satelitu ve sluneční soustavě a jedinému, který je obklopen neprůhlednou atmosférou.

V současné době se ve studiu velkých planet významně uplatňuje Hubbleův kosmický dalekohled (Hubble Space Telescope — HST). Jeho výsledky jsou cenné zejména při poznávání Uranu a Neptuna, které ještě nemají své umělé družice.

Jupiter

Září na pozemské obloze jako nejnápadnější těleso po Slunci, Měsíci a Venuši. Pro starověké Řeky byl ztělesněním nejvyššího boha Dia, Římany nazývaného Jupiter. Pokrok v jeho poznání přinesl teprve dalekohled; Galilei objevil čtyři Jupiterovy satelity v roce 1610, ale na samotné planetě teprve R. Hooke (1635–1703) spatřil roku 1664 Velkou rudou skvrnu a G. D. Cassini stanovil o rok později její periodu rotace na minutu přesně. V letech 1923 a 1924 H. Jeffreys jako první ukázal, že Jupiter

¹⁾ *Pozn. redakce:* Roku 1992 obletěla Jupiter ještě sonda Ulysses určená k průzkumu Slunce. Složitým gravitačním manévrem v blízkosti Jupitera se dostala mimo rovinu ekliptiky a mohla tak pozorovat polární oblasti Slunce.

není nevyvinutá hvězda, ale že jde o planetu. Systémy proudění v atmosféře planety detailně popsal roku 1896 A. S. Williams (1861–1938), později a přesněji ještě další pozorovatelé, např. B. A. Smith a G. E. Hunt (sborník *Jupiter*, Univ. Arizona Press, Tucson 1976). Podle současných měření svírá rotační osa Jupitera úhel $3,12^\circ$ vzhledem ke kolmici na rovinu dráhy a $2,22^\circ$ vzhledem ke kolmici na rovinu ekliptiky.

To, co na planetě pozorujeme jako viditelný povrch, jsou horní vrstvy atmosféry. Na nich je nápadná pásová struktura ve směru rovnoběžek s nejvýraznějšími temnými pásy severně a jižně od rovníku a řadou užších pásů oddělených jasnými oblastmi — zónami. Plyn ohřátý vnitřním teplem planety stoupá, adiabaticky se ochlazuje a tvoří se světlá oblačnost z krystalů čpavku vznášejících se v plynném vodíku. Prokázány jsou i malé příměsi metanu, dalších uhlovodíků a stopové množství vody. Z jasných zón postupuje oblačnost k severu a jihu a je rychlou Jupiterovou rotací stáčena Coriolisovými silami ve směru rovnoběžek. Jasně zóny vidíme tedy v oblastech výstupných atmosférických proudů a jde o oblačnost, temné pásy pozorujeme v místech sestupných proudů, kde se oblačnost rozpouští a kde vidíme hlouběji do atmosféry. Oblasti středních jovigrafických šířek na severní i jižní polokouli (rotační systém II) rotují poněkud pomaleji než rovníková oblast (rotační systém I). Je pravděpodobné, že podobnou rychlostí rotují i atmosférické vrstvy pod oblačností, není však známo, do jaké hloubky. Nejde ale o globální atmosférické proudění jako na Venuši. Nitro planety (systém III) se otáčí spolu s magnetickým polem pomaleji než systém I, ale rychleji než systém II. Obecná cirkulace Jupiterovy atmosféry je tzv. Bernardova typu, vyvolaná jednotným spodním hraničním zahříváním a silným působením Coriolisovy síly, kdežto intenzita dopadajícího slunečního záření nemá významný vliv. Horizontální teplotní rozdíly, které jsou na Zemi rozhodující pro atmosférické proudění, jsou na Jupiteru asi o řád menší a teplota atmosféry obecně nezávisí na jovigrafické šířce.

V pásové struktuře pozorujeme množství útvarů, viditelných i menšími dalekohledy od průměru objektivu 100 mm a větších. Právě podle nich lze určit periody rotace a zjišťujeme, že v rotačních systémech existuje řada rotačních proudů. Vzájemné rychlosti tu dosahují hodnot $-70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ až $+178 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ vzhledem k rotačním systémům. To jsou však rychlosti malé ve srovnání s rotační obvodovou rychlostí, která v okolí rovníku přesahuje $12\,000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Nejnápadnějším útvarem je už zmíněná Velká rudá skvrna (Great Red Spot — GRS). Není sice jisté, zda dnešní GRS je totožná s útvarem, který pozoroval R. Hooke, protože nemáme evidenci o jejím pozorování v letech 1713 až 1831, ale je to pravděpodobné. Kolem GRS proudí oblačnost, část je strhávána dovnitř útvaru, kde krouží až v deseti okruzích v kladném smyslu. Protože útvar leží na jižní polokouli, jde o anticyklonální proudění. Především nás překvapuje nečekaná stabilita a dlouhá doba existence Velké rudé skvrny. Jde o nejchladnější místo na Jupiteru; hustá oblačnost zde účinně zadržuje vyzařování z nitra planety. Příbuznými, také anticyklonálními útvary jsou bílé ovály s životností až několika desítek let. Vyskytují se mezi dvěma sousedními rotačními proudy s různými rychlostmi, mezi nimiž se otáčejí. V roce 1998 bylo zaznamenáno splynutí dvou takových oválů, ležících na -34° šířky, za současného zvětšení z 8500 km na 13 000 km. Temné oválné skvrny jsou oblačné deprese v horní vrstvě oblačnosti, kde vidíme hlouběji do atmosféry. Mají nejvyšší teplotu z pozorovaných útvarů, protože zde atmosféra nejméně brání vyzařování z hlubších

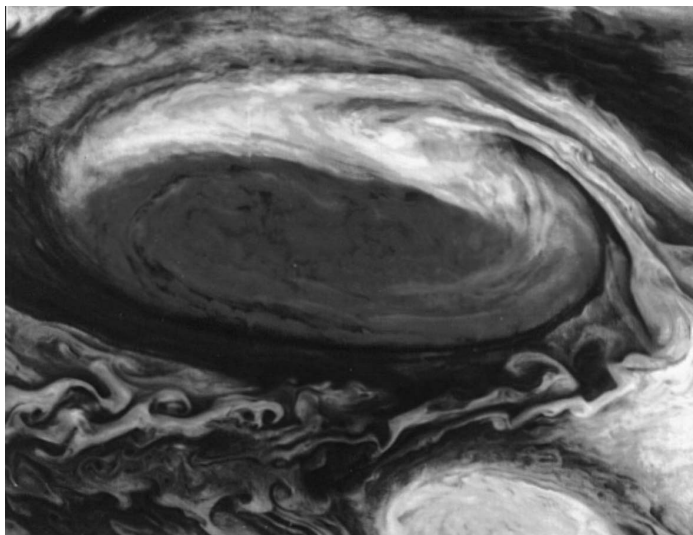
vrstev atmosféry. Dále pozorujeme výčnělky z pásů, přechody mezi pásy, všechny s efemérním trváním, nebo občas též komplexní temné útvary zvané poruchy — např. jižní tropická porucha (South Tropical Disturbance — STrD) a další. U řady detailů i v pásové struktuře pozorujeme barevné odstíny, nejčastěji hnědavé, jindy červenavé nebo modravé. Vysvětlují se výskytem příměsí různých sloučenin a radikálů (obr. 1).



Obr. 1. Pásová struktura Jupitera. (Foto: NASA/NSSDC.)

Pro pásy a zóny se používají zkratky z anglických názvů a přehledně je ukazuje obr. 1. Z pásů je nejnápadnější severní rovníkový pás (NEB). Bývá nejširší a nejtmaší (tedy s nejmenším albedem) a má jovigrafickou šířku kolem $+10^\circ$. Poněkud méně výrazný je jižní rovníkový pás (SEB), občas dvojitý, tedy rozčleněný na severní a jižní složku (SEBS, SEBN). Mezi NEB a SEB leží světlá rovníková zóna (Equatorial Zone — EZ), někdy s úzkým rovníkovým pásem (EB), v některých letech však temnější a zaplněná množstvím detailů. GRS leží v jižní části jižní tropické zóny (STrZ); zde se vyskytuje i jižní tropická porucha. Zvláště velké množství detailů a velice nevýraznou pásovou strukturu pozorujeme v okolí pólů, v severní a jižní polární oblasti (North/South Polar Region — NPR, SPR). Při sledování ze Země však detaily těchto oblastí nejsou dobře pozorovatelné pro silné okrajové ztemnění kotouče planety. Rozložení severních a jižních pásů je souměrné vzhledem k rovníku, ale ne zcela přesně; polohy, severojižní rozsah a intenzita pásů (albedo) a také oblastí se postupně mění.

Rotační systém I zahrnuje rovníkovou zónu a severní i jižní rovníkový pás, rotační systém II se vztahuje na oblasti středních jovigrafických šířek. Vznik pásové struktury lze také modelovat na počítači. Ukazuje se, že původní homogenní rozdělení bez pásů a rotačních proudů se rychle, během několika set period rotace, vyvine do pásové struktury se soustavou rotačních proudů (obr. 2).



Obr. 2. Velká rudá skvrna na jižní polokouli Jupitera. (Foto: NASA/NSSDC.)

Významnou příležitostí k poznání atmosféry Jupitera byla srážka s kometou Shoemaker-Levy 9. Jádru komety se 8. 7. 1992 při těsném průletu 25 000 km nad oblačnou vrstvou rozpadlo na 22 částí o velikosti 0,5 až 3 km. Ty se ve dnech 16. až 22. 7. 1994 setkaly s Jupiterem rychlostí $60 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Ukázalo se, že pronikly jen asi 600 km hluboko do atmosféry, asi polovina materiálu se odrazila a vytryskla zpět do výšky 1000 km. V místech dopadu vzrostla teplota na 3000 K až 4000 K a uvolnila se energie řádově 10^{20} J . Kolem místa nárazu byly krátce poté zřetelně viditelné temné skvrny rozprášené látky. Vždy zde byl spektroskopicky zjištěn CH_4 ; dále CO , H_2O , H_2 , čpavek NH_3 , S_2 , SO , SO_2 , Mg , Fe a s nejistotou H_2S .

Další informace přineslo pouzdro sondy Galileo, které do atmosféry Jupitera vstoupilo 7. 12. 1995 ve 23 h 04 min SEČ ($E = 0$) pod úhlem $8,3^\circ$ k vodorovné rovině, v bodě $+6,5^\circ$ šířky a $04,4^\circ$ délky, 450 km nad neprůhlednou oblačnou vrstvou a rychlostí $v = 47,42 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Největšímu zápornému zrychlení $-230 g$ bylo pouzdro vystaveno v okamžiku $E + 56 \text{ s}$, 100 km nad neprůhlednou oblačnou vrstvou, při $v = 27,5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ a okolní teplotě $T = -119^\circ \text{C}$. Další brzdění poté obstaralo rozvinutí padáku. V $E + 4 \text{ min}$ dosáhlo pouzdro hladiny neprůhledných oblaků: stalo se to ve výšce s atmosférickým tlakem $0,3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ a teplotou -150°C , 26 km nad vrstvou s atmosférickým tlakem 10^5 Pa , kdy se pouzdro pohybovalo rychlostí už jen $454 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Úroveň nulové výšky ($h = 0$), která je definována atmosférickým tlakem 10^5 Pa , dosáhlo pouzdro v okamžiku $E + 8 \text{ min}$; zde panovala teplota -107°C .

V čase $E + 24$ min, ve výšce $h = -57$ km, tedy 83 km pod hladinou neprůhledné oblačnosti, byla kolem pouzdra patrně oblačnost z vodních kapiček, tlak $5 \cdot 10^5$ Pa, teplota 0°C . V čase $E + 30$ min, ve výšce $h = -71$ km, tedy 97 km pod hladinou mraků, je tlak $6,7 \cdot 10^5$ Pa a příjemná teplota $+25^\circ\text{C}$. Komunikace byla přerušena v okamžiku $E + 75$ min při rychlosti $v = 92$ km \cdot h⁻¹, $h = -159$ km, tedy 185 km pod neprůhlednou hladinou oblačnosti, při tlaku $28 \cdot 10^5$ Pa a teplotě už 185°C . Nefelometr pouzdra zjistil jen řídká mračna, což je vysvětlitelné tím, že pouzdro prolétalo temnou oválnou skvrnou. Z látek se zjistil hydrosulfid amonný.

Samotná sonda Galileo, která zůstala na oběžné dráze planety, sledovala teplotu, tlak a rychlost větru v atmosféře. Zjistila, že spodní atmosféra je konvektivní, jak vyplývá z růstu teploty s hloubkou. Byly zjištěny i četné turbulence, které jsou vysvětlitelné vnitřním teplem planety. Sonda pozorovala také bouře, především na noční straně. Celková bouřková aktivita je 3 až 10krát menší než na Zemi, uvádí se 20 výbojů za sekundu, ale blesky mají zhruba o 2 řády větší intenzitu než na Zemi. Bylo zaznamenáno méně vody, než se očekávalo, méně uhlíku v metanu i síry. Deficit kyslíku sledovala nejen sonda, ale byl zjištěn už při pádu komety na Jupiter — je to pouze 10% zastoupení ve srovnání se Sluncem.

Stavbu nitra objasňují teoretické modely. Existence hustšího kamenného jádra, zřejmě i s podílem kovů, vyplývá z rotačně dynamických parametrů planety. Pod atmosférou předpokládáme vrstvu plynokapalného molekulárního vodíku a helia, která sahá do hloubky 15 000 km (tedy asi $0,8 R_J$ od středu, kde R_J je poloměr Jupitera). Disociace molekul a přechod na atomární vodík probíhá plynule při tlaku $4 \cdot 10^{10}$ Pa až $3 \cdot 10^{11}$ Pa. Pod vrstvou molekulárního vodíku je metalický vodík s heliem. Průběh tlaku a teploty v hloubce ukazuje, že i tato vrstva je v kapalném skupenství: tlak je v této hloubce asi $3 \cdot 10^{11}$ Pa, teplota přibližně 13 000 K. Ještě hlouběji přesahuje tlak 10^{12} Pa a teplota 25 000 K; bohužel nevíme, jak se za těchto poměrů chová směs vodíku s heliem. Pod tímto „globálním oceánem“ se skrývá jádro z kovů a silikátů o poloměru přibližně 9000 km. Centrální tlak dosahuje hodnoty $4 \cdot 10^{12}$ Pa a teplota 30 000 K. Hmotnost molekulární vrstvy a atmosféry je asi 21 %, hmotnost metalického vodíku s heliem asi 74 % a hmotnost jádra 5 % hmotnosti planety. Podle výsledků sondy Galileo je podíl helia 24 % (hmotnostních), tedy 79 atomů helia na 1000 vodíkových. To odpovídá zastoupení v původním protoplanetárním oblaku. V nitru Slunce předpokládáme asi 34 % hmotnosti helia, protože část helia vznikla termojadernými reakcemi.

Tak jak je výjimečný dnešní Jupiter, byl zvláštní i jeho vývoj. K jádru, které vzniklo postupným spojováním menších těles podobně jako planety zemského typu, byl gravitační silou strháván plyn. Plynu bylo v době vzniku Jupitera z protoplanetárního oblaku vypuzeno silným slunečním větrem již více než 90 %, přesto ho ale zůstalo v oblasti vzniku planety dostatečné množství. Kdyby plynu bylo více, vzniklo by těleso daleko větší hmotnosti a jiného typu. Ze značného zastoupení vzácných plynů (Ar, Kr, Xe) usuzuje R. Ouyed, že soustředění planetesimál mělo při vzniku Jupitera převažující roli. Při kontrakci zachycené látky vzrostla povrchová teplota na několik tisíc kelvinů a zářivý výkon na 10^{24} W, tedy asi $3 \cdot 10^{-3}$ dnešního zářivého výkonu Slunce ($L_S = 3,85 \cdot 10^{26}$ W). Při vzniku Jupitera se z gravitačně zachycené

látky vytvořil prachoplynný disk, ve kterém vznikly družice — nejspíše pouze čtyři galileovské satelity. Naproti tomu se dnešní menší Jupiterovy satelity zachytily přímo z heliocentrických drah. Může k tomu dojít, jestliže tělísko prochází blízko planety v období rychlého růstu hmotnosti planety nebo jestliže se zbrzdí v plynném prostředí cirkumplanetárního prachoplynného disku, případně kombinací obojího. Sám Jupiter se pak z poloměru asi 10^6 km napřed velmi rychle a poté pomaleji smršťoval a současně prudce klesala jeho teplota i zářivý výkon až na dnešní hodnotu. V jeho středu nikdy nenastaly takové poměry, aby tam probíhaly termonukleární reakce jako na Slunci. Přesto ojedinelí autoři některé typy termonukleárních reakcí předpokládají, například jaderné slučování deuteria na ^3He .

Magnetické pole Jupitera je buzeno konvektivními proudy v elektricky vodivém nitru planety. I molekulární vodík má za vyšších teplot a tlaků vysokou vodivost a jeho vrstva přispívá k magnetickému poli planety. To je také zřejmě příčina, proč toto v zásadě dipólové pole má významné kvadrupólové a oktapólové momenty. Magnetosféra je velmi rozsáhlá, osa magnetosféry svírá úhel $9,6^\circ$ s rotační osou a střed dipólu neleží přesně v geometrickém středu planety. Pole má opačnou polarizaci než zemské, jako ostatně magnetosféry všech velkých planet. Pole na rovníku dosahuje $4,28 \cdot 10^{-4}$ T a dipólový moment $1,6 \cdot 10^{30}$ T \cdot m $^{-2}$ (magnetosféra Země $8 \cdot 10^{25}$ T \cdot m $^{-2}$). Vnitřní magnetosféra do vzdálenosti 5 poloměrů Jupitera rotuje spolu s planetou. Směrem ke Slunci se ve vzdálenosti $4 \cdot 10^6$ km od planety vytváří turbulentní přechodová oblast, magnetopauza. Jde o rozhraní, kde se vyrovnává tlak magnetického pole s tlakem slunečního větru; na čele směrem ke Slunci je ohraničena rázovou vlnou vzdálenou $5 \cdot 10^6$ km od Jupitera. Směrem od Slunce zjišťujeme magnetický ohon, který se táhne do vzdálenosti nejméně 10^8 km, možná až ke dráze Saturna.

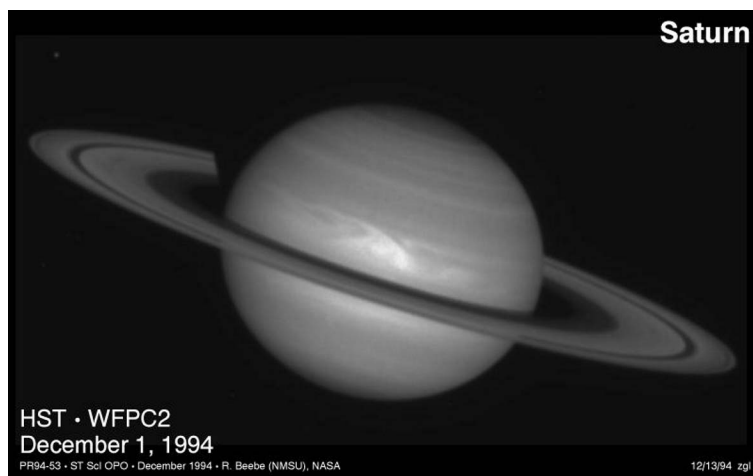
V plazmatu magnetosféry převažuje uhlík, síra, kyslík, ovšem také jádra vodíku a volné elektrony. Plazma má teplotu 10^5 K. S magnetosférou souvisejí polární záře v aurorálních oválech kolem magnetických pólů až do 2300 km nad oblačnou vrstvou a s rozsahem až 30 000 km. Polární záře jsou řádově tisíckrát jasnější než pozemské a jsou způsobeny částicemi vyvrženými z vulkánů měsíce Io. Také lokální zjasnění oválu, tzv. aurorální otisky, souvisí s galileovskými satelity; zejména se takto projevuje opět Io. Tento měsíc se pohybuje vnitřní částí magnetosféry a je spojen s Jupiterem plazmovou trubicí. Měření Voyagerů ukázala, že trubicí prochází výkon 2 TW, podle výsledku sondy Galileo 100 TW. Měření nebyla zatížena velkou chybou a můžeme proto předpokládat, že se výkon přenášený plazmovou trubicí opravdu mění. Výtečné záběry polárních září pořídila i sonda Cassini, když na své cestě k Saturnu prolétala kolem Jupitera. Kolem planety se v magnetosféře rozkládají radiační pásy. Relativistické elektrony pocházející z Jupitera a zachycené v radiačních pásích magnetickým polem planety se projevují decimetrovou rádiovou emisí a jde o synchrotronovou emisí.

Saturn

V pořadí velikosti druhá planeta sluneční soustavy, viditelná jako jasná hvězda 0. magnitudy. Astrologům byla pomalu se pohybující planeta symbolem stáří a sou-

visela s nejméně pohyblivým živlem — zemí. Astronomové ji znali odedávna a až do objevu planety Uran byla s naprostou jistotou považována za nejbzdálenější planetu sluneční soustavy. Galilei postřehl dalekohledem zvláštní obrys Saturna a usoudil, že kolem planety obíhají dvě menší tělesa. Teprve Huyghens v roce 1655 popsal správně, že jde o plochý prstenec, který se planety nikde nedotýká a je skloněn k ekliptice. Dynamikou Saturnových prstenců se z hlediska nebeské mechaniky zabýval jako první P. S. Laplace v roce 1802. Teprve J. C. Maxwell (1831–1879) se vrací k myšlence G. D. Cassiniho, že prstence jsou tvořeny mnoha drobnými částicemi, a ve své práci z roku 1855 vystihl správně jejich dynamiku.

Saturn má značně nakloněnou rotační osu. Vzhledem ke kolmici na rovinu jeho dráhy svírá úhel $26,73^\circ$ a vůči kolmici na rovinu ekliptiky $28,05^\circ$. Protože prstény leží v rovině rovníku planety, jejich vzhled se pro pozemského pozorovatele s časem nápadně mění. Prochází-li rovina Saturnova rovníku a prstenu Zemí (naposledy třikrát v letech 1996 až 1997), jeví se prstény ve větších přístrojích jako tenká čárka a v menších se ztrácejí. Nejvíce se prstény „rozevřou“ dvakrát během periody oběhu — jednou je vidíme od jihu a jednou od severu. Jižní strana prstenu se nejvíce rozevře v dubnu 2003 a 2. 4. 2004 planeta dosáhne maximální severní deklinace, $+22,81^\circ$. Severní strana k nám byla nejvíce nakloněna 2. 10. 1989. Podobně se k nám naklání i severní a jižní polokoule planety. Předpokládáme, že velký sklon rotační osy souvisí se srážkou s větším tělesem v době formování planet.



Obr. 3. Saturn s bílou skvrnou v rovníkové oblasti. (Foto: NASA/STScI.)

Na žlutavě zabarveném kotouči samotné planety vidíme pásovou strukturu s temnějšími polárními oblastmi. Je však velmi nevýrazná, protože neprůhlednou oblačnou vrstvu obklopuje do výšky nejméně 2000 km řídký průhledný atmosférický zákal, jehož dolní oblast tvoří hustší stokilometrová vrstva krystalků čpavku. Přesto lze v neprůhledné oblačné vrstvě zaznamenat řadu jemných detailů, vcelku podobných Jupiterovým, například anticyklonální útvary, obdobu Jupiterových bílých ovalů. Rychlost atmosférického proudění na obvodu těchto útvarů dosahuje $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Nápadnější

jsou zajímavé bělavé skvrny nepravidelného obrysu, objevující se v různých letech v rovníkovém pásmu (obr. 3). Zonální proudění v atmosféře je rychlé, až $480 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a to ve dvou zónách zhruba souměrně umístěných vzhledem k rovníku ($+8^\circ$ a -6° planetografické šířky), jinde má rychlost od 0 do $160 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ale i ve větších planetografických šířkách zjišťujeme souměrné uspořádání atmosférických proudů vůči rovníku. Pozemní spektroskopické pozorování zjistilo v atmosféře molekulární vodík, čpavek a metan. Kosmické sondy a družice odhalily především helium, různé uhlovodíky, fosfen PH_3 a také metyl CH_3 , vzniklý zřejmě fotolýzou CH_4 . Tento radikál zaznamenala družice ISO také na Uranu a Neptunu.

Při úvahách o vnitřní stavbě Saturna musíme především přihlídnout k jeho nízké hustotě. Celkové pořadí vrstev předpokládáme podobné vnitřní stavbě Jupitera. Pod neprůhlednou vrstvou oblačnosti je asi 2000 km vysoká vrstva střední a hluboké atmosféry. Pod ní leží zvláště mohutná vrstva kapalného molekulárního vodíku s heliem, zahrnující plných 87 % objemu planety. Od poloviny poloměru planety leží rozsáhlá oblast metalického vodíku s heliem, také kapalná. Pod ní se předpokládá vrstva silně stlačeného ledu. Ještě hlouběji musí být jádro ze silikátů a kovů o něco větší hmotnosti než Jupiterovo.

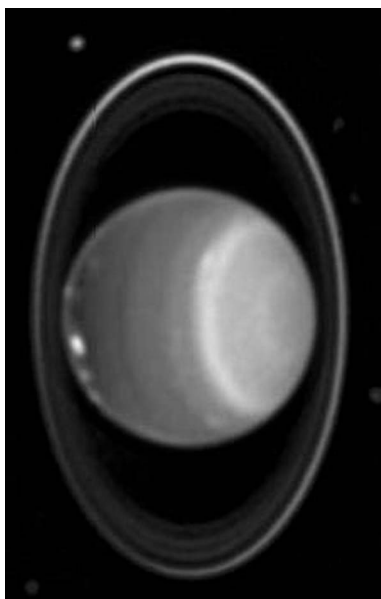
Magnetosféra je méně rozsáhlá než Jupiterova. Zvláštní je tím, že je souměrná podle roviny Saturnova rovníku, což zřejmě souvisí s existencí rozsáhlého systému prstenů. Prsteny u vnějšího okraje, A a B, pohlcují plazmu z magnetosféry. Čelo rázové vlny je vzdáleno $1,5 \cdot 10^6 \text{ km}$ směrem ke Slunci. Magnetická indukce magnetosféry dosahuje na rovníku $2,1 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ a magnetický moment je $4,7 \cdot 10^{29} \text{ T} \cdot \text{m}^{-2}$, tedy asi třikrát menší než Jupiterův. Projevem magnetosféry jsou i polární záře. Ty jsou pozorovatelné v ultrafialové oblasti spektra; sondy je nepozorovaly příliš zřetelně a detailně je zachytil až Hubbleův kosmický dalekohled. Na snímcích jsou zřetelné aurorální ovály u obou pólů planety a zářící draperie sahají až do 1600 km nad oblačnou vrstvu. Na rozdíl od Jupitera vznikají jako u Země proudem elektricky nabitých částic od Slunce, tedy většinou elektronů a protonů.

Uran

Dne 13. března 1781 spatřil William Herschel při své přehlídce oblohy objekt, který na rozdíl od hvězd ukazoval v dalekohledu zřetelný kotouček. Považoval ho za kometu, tělesu však chyběla mlhavá koma. Později Laplace a Méchain definitivně prokázali, že dráha tělesa je typicky planetární — s malou excentricitou a malým sklonem k ekliptice. Objev byl tedy překvapivý a názorně ukázal, jak těžko se překonával vžitý obraz o sluneční soustavě. Z pozdějšího rozboru vyplynulo, že planetu mnohokrát zachytila řada astronomů před objevem, tedy před objevem podstaty tělesa. Například John Flamsteed (1646–1719) zahrnul Uran do svého katalogu jako hvězdu 34 Tau (v souhvězdí Býka), pozoroval ji během 25 let celkem šestkrát, ale nepoznal, že jde prostě o jedno a totéž těleso, které mezitím změnilo polohu mezi hvězdami! Je to tím překvapivější, když víme, že se jasnost Uranu mění od $+5,5 \text{ mag}$ do $+6,3 \text{ mag}$ — to

znamená, že planeta je v některých obdobích pozorovatelná i prostým okem a mohla být vlastně známa už od starověku.

Pozorování už před kosmickou érou ukázala, že Uran má zcela výjimečnou polohu rotační osy. S rovinou dráhy planety svírá úhel $97,86^\circ$ a s rovinou ekliptiky $97,81^\circ$. To znamená, že planeta má vlastně záporný smysl rotace a při svém oběhu mění významně svůj vzhled. V některých letech vidíme její polární oblast, jindy opět okolí rovníku. Jižní polokoule byla nejvíce přikloněna ke Slunci v roce 1985, rovina Uranova rovníku bude procházet Zemí roku 2007. Pozorujeme-li okolí pólu, ztrácí se prakticky pásová struktura, pokud je k nám natočen rovník, pozorujeme dalekohledy o průměru aspoň 200 mm jasnou rovníkovou zónu, omezenou zřetelnými rovníkovými pásy. Planeta (obr. 4) má modrozelený barevný nádech.



Obr. 4. Kotouček planety Uran. Použití filtru zvýrazňuje pásovou strukturu a zřetelně zobrazuje prstny. (Foto: NASA/STScI.)

V ovzduší planety nalezla kosmická sonda Voyager 2 hlavně vodík, 12 % helia a v oblačné vrstvě krystaly metanu. Vrstva neprůhledné souvislé oblačnosti leží ve výšce s atmosférickým tlakem $2,5 \cdot 10^5$ Pa. Nad touto vrstvou, která představuje pozorovatelný „povrch“ planety, se pohybují jednotlivá mračna z krystalů metanu; zde je zhruba oblast s atmosférickým tlakem $1,6 \cdot 10^5$ Pa. Nad neprůhlednou souvislou oblačností leží více než 50 km vysoká mlhavá vrstva, pravděpodobně ze čpavku, polyacetylénu a dalších uhlovodíků, která sahá do úrovně s atmosférickým tlakem 10^4 Pa. Tam leží tropopauza, horní hranice Uranovy troposféry, a na této úrovni se vznáší vrstva průhledných řídkých oblaků. Teplota v tropopauze klesá na -221°C , teplota pod ní a nad ní opět stoupá. Větrné proudění probíhá ve směru rotace, dosahuje až $220 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a pohyb oblačných detailů vykazuje rozličné rotační periody.

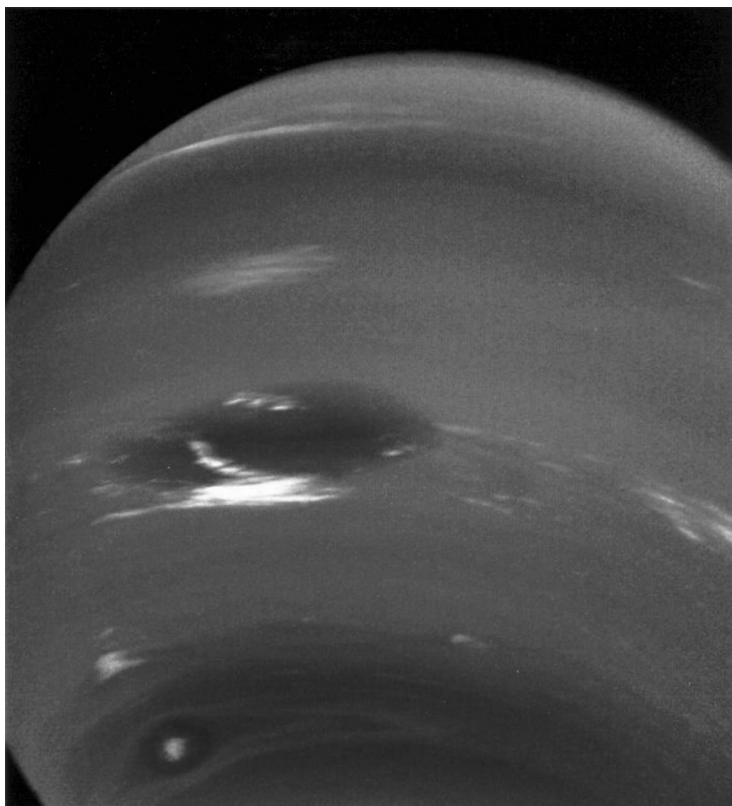
O nitru planety máme ještě neurčitější představy než v případě Jupitera a Saturna. Pod atmosférou předpokládáme plynokapalnou vrstvu vodíku, helia, čpavku a metanu.

Pod ní očekáváme ledový plášť se čpavkem a metanem, jiné modely zde předpokládají kapalnou vodu. Tato vrstva zaujímá největší objem z celé planety. Jádro bude rozsáhlejší než u předchozích velkých planet, tvořené silikáty a kovy, a je při dané teplotě a tlaku ($10\,000\text{ K}$; $5 \cdot 10^{11}\text{ Pa}$) kapalné.

Magnetické pole je významné, na rovníku dosahuje $2,5 \cdot 10^{-5}\text{ T}$ a magnetický moment $4 \cdot 10^{27}\text{ T} \cdot \text{m}^{-2}$, tedy asi padesátinásobek zemského, ale méně než setina Saturnova. Osa dipólu svírá úhel $58,6^\circ$ s rotační osou, což je neobvyklé, ale při výjimečné poloze rotační osy nepřilíš překvapivé. Také střed dipólu je značně vzdálen od geometrického středu Uranu, a to 8000 km . Zdroj magnetického pole tedy možná neleží v jádře, ale v plášti planety.

Neptun

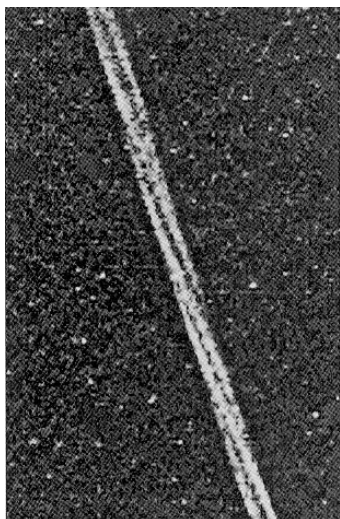
Zatímco objev Uranu je svědectvím jisté těžkopádnosti a konzervativismu tehdejší observační astronomie, byl naopak objev Neptuna velkým úspěchem nebeské mechaniky. Zásahu na něm má U. J. J. Leverrier (1811–1877), který byl schopen z poruch dráhy Uranu vypočítat polohu další planety za Uranem, která tyto poruchy způsobila.



Obr. 5. Neptun s velkou temnou skvrnou tak, jak jej zachytil Voyager 2.
(Foto: NASA/NSSDC.)

K podobnému teoretickému výsledku dospěl i J. C. Adams (1819–1892). Leverrier měl však větší renomé a J. G. Galle (1812–1910) mohl zvolit efektivnější strategii hledání, která vedla rychle k objevu nové planety, protože měl k dispozici nové hvězdné mapy. Galle objevil planetu hned první večer hledání, 23. září 1846 v Berlíně. Nalezl ji necelý 1° od místa vypočteného Leverrierem. Také Neptun byl pozorován již vícekrát před objevem, poprvé dokonce Galileim v letech 1612–13, a opět považován za hvězdu. Jasnost planety kolísá mezi $+7,6$ mag až $+8,0$ mag — dá se tedy snadno pozorovat i malým třiedrem.

Sonda Voyager 2 zjistila dosti velký sklon rotační osy planety: $29,55^\circ$ vzhledem k rovině dráhy a $29,49^\circ$ vůči rovině ekliptiky. Na 115 000 záběrech sonda ukázala oblačnou pásovou strukturu, výraznější, než je Uranova. Neptun má krásnou modrou ultramarínovou barvu. Útvary v atmosféře jsou jen efemérní, jak ukázalo porovnání s pozdějšími záběry pořízenými HST. V roce 1989 zachytil Voyager 2 jako nejnápadnější útvar Velkou temnou skvrnu, vzhledově poněkud podobnou Velké rudé skvrně Jupitera. Také Velká temná skvrna vykazovala anticyklonální proudění, perioda kroužení oblačných hmot byla 16 dnů a jako celek se pohybovala rychlostí $300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ k západu. Na záběrech z HST není po tomto útvaru ani stopy, a stejně tak ani po jiných, pozorovaných v roce 1989. Proudění na planetě je velice chaotické, útvary se objevují a zase mizejí, mění planetografickou šířku i délku, zrychlují se i zpomalují. Pohyby nelze přesně předpovídat, na rozdíl od Jupitera, jehož atmosférické útvary vykazují pohyb v planetografické délce, ale šířku prakticky nemění. Na Neptunu probíhá prudké větrné proudění o rychlosti až $610 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a periody rotace jsou velmi rozdílné, zřejmě i vlivem různé rychlosti proudění v různých planetografických šířkách a podle jejich výšky v atmosféře (obr. 5). Sonda Voyager 2 také objevila slabé prstence Neptuna; jeden z nich se zajímavou strukturou připomínající šroubovici (obr. 6).



Obr. 6. Detailní záběr na prstenec Neptuna. (Foto: NASA.)

V ovzduší se opět setkáme s vodíkem a heliem; helia je asi 25 % (hmotnostních). Pozorujeme příměs metanu, který při nízkých teplotách atmosféry střídavě mrzne

a opět sublimuje; přítomny jsou i další uhlovodíky. Oblačnost je ještě více rozvrstvená než Uranova. Tropopauzu lze předpokládat asi 80 km nad neprůhlednou oblačnou vrstvou, opět ve vrstvě s atmosférickým tlakem 10^4 Pa. Ze základní oblačné vrstvy je oblačnost vynášena do výšek 70 až 80 km mohutnými vzestupnými proudy. Nesouvislá vrstva poloprůhledné oblačnosti leží ve výšce 20 až 40 km, kde je atmosférický tlak $1,2 \cdot 10^5$ Pa až $1,3 \cdot 10^5$ Pa. Základní neprůhledná oblačnost je v oblasti atmosférického tlaku $3 \cdot 10^5$ Pa a obsahuje snad sirovodík a jako příměs krystalky čpavku. Uhlovodíky, které tvoří zákal ve vysoké atmosféře, mohou klesat jako déšť do hlubších a teplejších vrstev atmosféry, kde reagují s vodíkem a tvoří se plynný metan. Ten je výstupnými proudy vynášen výš, kondenzuje a dochází tak ke koloběhu. Celkově je atmosféra velmi mrazivá, -213°C až -221°C ve své průhledné části.

Nitro Neptuna bude zřejmě podobné Uranovu, ale jednotliví autoři docházejí k rozdílným závěrům. Nejpodstatnější skutečností je větší hmotnost a průměrná hustota Neptuna ve srovnání s Uranem. Také z vlastností magnetického pole lze zjistit některé informace. Magnetické pole má na rovníku $3,1 \cdot 10^{-5}$ T, osa magnetického dipólu svírá úhel 47° s osou rotační a především střed dipólu leží plných 14 000 km od geometrického středu planety, směrem k její jižní polokouli. Zdroj magnetického pole tedy zřejmě neleží v Neptunově jádru, ale spíše v tekutém plášti s turbulentními pohyby; možná, že je tomu tak i v magnetickém poli Uranu. Uvedený úhel osy dipólu vzhledem k ose rotační znamená, že se v některých obdobích magnetický pól natáčí přímo ke Slunci.

Počítačové simulace vzniku Uranu a Neptuna naznačují, že obě planety vznikly z méně než 50 % z planetesimál, které byly v jejich okolí v době formování sluneční soustavy. Většina těchto malých těles byla krátce po vytvoření planet vypuzena rušivým působením Jupitera se Saturnem ven z planetární soustavy a Uran s Neptunem migrovaly po svém vzniku dál od Slunce. U Uranu dochází k cyklickým změnám např. v excentricitě a ve sklonu dráhy, u Neptuna jsou změny dlouhodobé a nejsou zatím podrobně prostudovány.

L i t e r a t u r a

- [1] PŘÍHODA, P.: *Planety zemského typu z pohledu nových kosmonautických výzkumů*. PMFA 47 (2002), 89–102.
- [2] SMITH, B. A., HUNT, G. E.: In: Proc. Jupiter, Univ. Arizona Press, Tucson 1976.