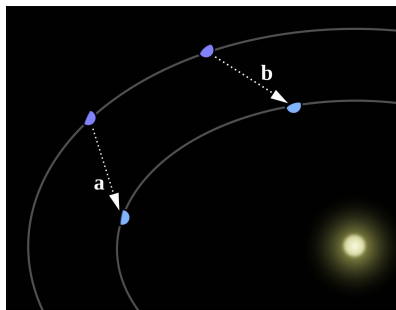


# K výročí objevu Neptunu

VLADIMÍR ŠTEFL

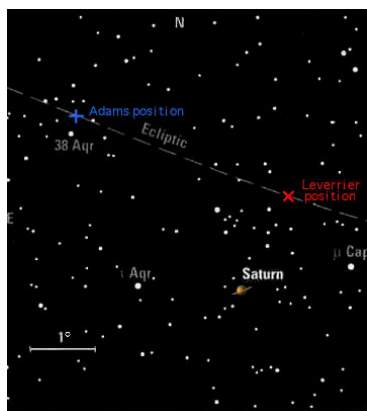
Přírodovědecká fakulta MU, Brno

V roce 2016 uplyne 170 roků od objevu osmé planety sluneční soustavy – Neptunu. *Urbain Jean Le Verrier* (1811–1877) z Francie a téměř současně v Anglii *John Couche Adams* (1819–1892) nezávisle na sobě vypočítali dráhové elementy a odhadli hmotnost dosud neznámé planety. Na základě Le Verrierovy předpovědi polohy byla nalezena v září 1846 německým astronomem *Johannem Gottfriedem Gallem* (1812–1910). Okolnosti objevu Neptunu doporučil královský astronom *Martin John Rees* (\*1942) na kolokviu IAU „New Trends in Astronomy Teaching“ [1] k zařazení do školní výuky. V ní stručný výklad objevu Neptunu lze opírat o skutečnost zjištěných nepravidelností pohybu Uranu. Planeta v období let 1781–1830 zrychlovala a následně od roku 1831 zpomalovala svůj pohyb. K vysvětlení Le Verrier i další vyslovili myšlenku o existenci vnější planety gravitačně působící na Uran – schematické zachycení situace je na obr. 1.



Obr. 1

Le Verrier řešil tzv. inverzní problém, vypočítal poruchy v rádius vektoru a délce Uranu. Z nesouhlasu pozorovaných a propočítaných poloh Uranu stanovil dráhové elementy a přibližnou hmotnost rušícího tělesa planety – Neptunu. Podrobnější seznámení s problematikou v českém jazyce nalezne čtenář v [2]. Na základě Le Verrierova určení dráhových elementů a polohy neznámé planety byl Neptun objeven (obr. 2).



Obr. 2

Astronomie je bohatou zásobárnou miskonceptů vznikajících u žáků [3]. Uvedeme nejčastější, které se vztahují k Neptunu:

- Nepravidelnosti jeho pohybu vedly k propočtu a posléze objevení trpasličí planety Pluta.
- Pluto vždy obíhá kolem Slunce ve větší vzdálenosti než Neptun.
- Vzdálenost od Slunce charakterizovaná velikostí velké poloosy dráhy Neptunu je 30,1 au, zatímco u Uranu je to pouze 19,2 au. Proto povrchová teplota Neptunu musí být nižší než Uranu.
- Neptun je vládcem moří, modrá barva odpovídá většinu množstvím vody na povrchu planety.

Stručně řečeno, zmiňované miskoncepce mají kořeny v nepochopení fyzikální skutečnosti, kterou je závislost velikosti gravitační poruchové síly na hmotnosti rušícího tělesa, v neznalosti relativně velké výstřednosti  $e = 0,25$  eliptické dráhy Pluta, v tom, že Neptun má na rozdíl od Uranu vnitřní zdroje energie a v rozdílnosti mytologie a astronomické reality.

Vedle připomenutí výročí objevu Neptunu článek rovněž seznamuje s tímto nejvzdálenějším planetárním plynným obrem. Postupně v něm odpovíme na otázky:

- Jak určujeme charakteristiky Neptunu, hmotnost, poloměr, povrchovou teplotu?
- Proč má namodralou barvu a přibližně stejnou teplotu jako k Slunci mnohem bližší Uran?

- Jaký je původ magnetického pole Neptunu?
- Kde ve sluneční soustavě Neptun vznikl a jak migroval do současné polohy?
- Čím je způsoben tepelný tok z nitra Tritonu?
- Co vypovídá chemické složení o původu Tritonu, jaké je stáří jeho povrchu?
- Proč tento měsíc pomalu sestupuje na oběžné dráze k Neptunu?

Odpovědi na uvedené otázky, které v článku postupně rozebereme, je vhodné začít ve školní výuce zdůraznit. Neptun, jakož i ostatní plynné planety vznikl ve formující se sluneční soustavě rychleji než terestrické planety, za řádově desítky milionů roků, při intenzivním využití vodíku a helia z původní mlhoviny. Plynné planety vznikly za tzv. ledovou čárou, tedy v oblasti, kde teplota již poklesla natolik, že voda mohla existovat v tuhém ledovém skupenství. V současné vzdálenosti od Slunce nemohl Neptun vzniknout, nízká hustota plynu a prachu v původní mlhovině by neumožnila jeho vznik. Má větší hmotnost než Uran, formoval se blíže k Jupiteru a Saturnu. Později, při rezonanci 2 : 1 Jupiteru a Saturnu obě planety při zvýšení gravitačního působení na Neptun ho radiální migrací přemístily až za Uran [4, 5].

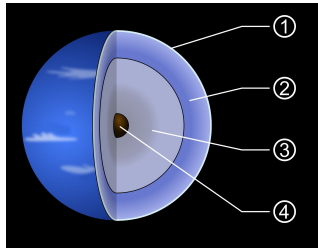
Základní charakteristiky Neptunu (hmotnost, poloměr, hustota, povrchová teplota, zářivý výkon) zjišťujeme astrofyzikálními metodami. Jedno z jejich posledních upřesnění proběhlo po průletu sondy Voyager 2 kolem planety v srpnu 1989 při vzdálenosti 5 000 km od ní. Například stanovená hmotnost činila  $17,26M_Z$ . Rovníkový poloměr určený z fotoelektrického pozorování zákrytů hvězd Neptunem vedl k hodnotě 25 220 km, přibližně  $4R_Z$ , je tudíž menší než Uran. Interferometrický spektrometr IRIS na Voyageru 2 detekoval infračervené záření v oblastech vlnových délek (0,3–2,0)  $\mu\text{m}$  a (2,5–50)  $\mu\text{m}$ . Zpracování údajů vymezilo spodní hranici teploty Neptunu na  $59,3 \pm 0,8$  K [6].

Hmotnost Neptunu, nacházejícího se ve vzdálenosti 30 au, tedy 4,5 miliardy km od Slunce, lze stanovit klasickou historickou metodou pomocí 3. Keplerova zákona v přesném tvaru, použitou po objevu měsíce Tritonu v říjnu 1846 anglickým astronomem *Williamem Lassellem* (1799–1880). Oběžná doba měsíce je 5,88 dne, tedy  $P = 5,08 \cdot 10^5$  s. Při maximální elongaci se nacházel v úhlové vzdálenosti  $\alpha = 16,8''$  od středu Neptunu v okamžiku opozice Země. V ní byla vzdálenost obou planet  $r = 29$  au, vzdálenost Tritonu od Neptunu je  $a = \text{tg } \alpha \cdot r = 3,55 \cdot 10^8$  m. Hmotnost

## Neptunu číní

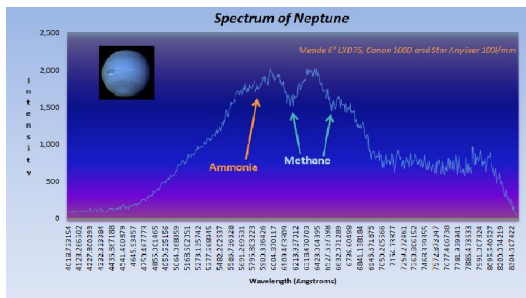
$$M = \frac{4\pi^2 a^3}{G P^2} = 1,02 \cdot 10^{26} \text{ kg} \doteq 17,26 M_Z.$$

Neptun tvoří několik vrstev zachycených na obr. 3. Přestože má planeta nízkou průměrnou hustotu  $1,64 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , je její jádro pravděpodobně kamenné (vrstva 4). Tvoří 25 % hmotnosti planety, je ze silikátů, niklu a železa. Obklopeno je rozsáhlou vrstvou ledu  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$  o tloušťce 8 000 km, tvořící asi 65 % hmotnosti (vrstva 3). Povrchové atmosférické vrstvy obsahují plynný vodík a helium o hmotnosti asi 10 % [7] (vrstva 2). Vnější vrcholová vrstva mraků je složena z molekulárního vodíku (80 %), helia (19 %) a metanu (1 %) (vrstva 1). Centrální teplota dosahuje přibližně  $5\,500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vnější teplota atmosféry je nejnižší z planet ve sluneční soustavě a činí  $-214 \text{ }^\circ\text{C}$ .



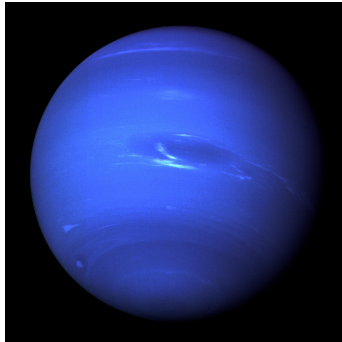
Obr. 3

Odražené záření Neptunu má modrou barvu. Je vyvolána absorpcí dlouhovlnné optické části slunečního spektra za vlnovou délkou  $\lambda = 600 \text{ nm}$  metanem v atmosféře planety (obr. 4).



Obr. 4

V dolní vrstvě atmosféry planety byla zjištěna v roce 1989 tzv. velká tmavá skvrna (obr. 5), objevená při průletu kosmické sondy Voyager 2, dosahovala velikosti  $13\,000 \times 6\,600$  km, její vzhled se měnil. Doprovázely ji bílé metanové mraky ve vyšších vrstvách. Roku 1994 Hubbleův kosmický dalekohled již skvrnu anticyklonálního původu nepozoroval.



Obr. 5

Atmosféra Neptunu je zahřívána planetou a je velmi aktivní, s výraznými větry, dosahujícími rychlosti až  $560 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Paradoxně přes nejnižší teplotu atmosféry ze všech planet se v ní vyskytují nejsilnější větry ve sluneční soustavě. Rozlišujeme tři základní vrstvy atmosféry. Horní je tvořena smogem z hydrogenuhlíčitánu  $\text{HCO}_3$ , střední z metanu  $\text{CH}_4$  a spodní vrstva je ze sirovodíku  $\text{H}_2\text{S}$ .

Neptun vyzařuje více než dvojnásobek energie přijímané od Slunce, přibližně jedna polovina zářivého výkonu pochází z vnitřních zdrojů. Hustota zářivého toku od Slunce ve vzdálenosti Neptunu činí

$$K_N = \frac{K_Z}{30^2} \doteq 1,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Efektivní teplotu rovnovážného záření Neptunu při znalosti albeda  $A = 0,3$  určíme ze vztahu

$$T_{\text{efN}} = T_{\text{efS}} \left( \frac{R_S}{2a_{\text{SN}}} \right)^{\frac{1}{2}} (1 - A)^{\frac{1}{4}} \doteq 46 \text{ K}.$$

Zářivý výkon Neptunu, jehož zdrojem energie je pouze odraz slunečního záření, je

$$L_{\text{odS}} = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{ef}}^4 \doteq 1,7 \cdot 10^{15} \text{ W}.$$

Celkový zářivý výkon Neptunu včetně vnitřních zdrojů dosahuje

$$L_{cN} \doteq 3,4 \cdot 10^{15} \text{ W.}$$

Odtud stanovená efektivní teplota

$$T_{\text{cefN}} = \left( \frac{L_{cN}}{\sigma 4\pi R_N^2} \right)^{\frac{1}{4}} \doteq 53 \text{ K.}$$

Pro srovnání teplota zjištěná kosmickou sondou Voyager 2, jak jsme již uvedli, je rovna 59 K.

Z porovnání teplot vyplývá, že planeta má vnitřní zdroje energie. Jedním z možných vysvětlení je gravitační smršťování, při kterém se uvolňuje teplo. Podle viriálové věty jedna polovina uvolňované gravitační potenciální energie se projeví nárůstem zářivého výkonu planety, druhá polovina zvětšením vnitřní energie, platí

$$L = \frac{1}{2} \frac{d(GM^2/R)}{dt} = -\frac{\frac{1}{2}GM^2}{R^2} \frac{dR}{dt}.$$

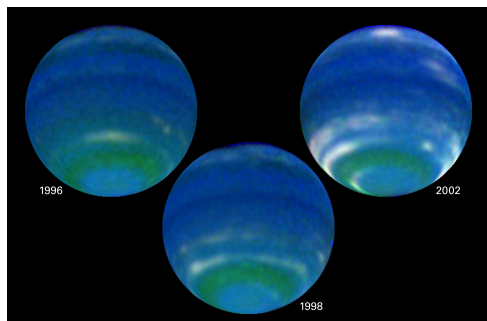
Připomínáme, že poloměr planety se zmenšuje,  $\frac{dR}{dt}$  je záporné. Zavedeme-li označení  $L_g = \frac{L_{cN}}{2}$ , lze změnu poloměru planety v čase vyjádřit vztahem

$$\frac{dR}{dt} = \frac{L_g R}{-\frac{1}{2}GM^2},$$

dosazením obdržíme hodnotu  $-3 \cdot 10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dalším příspěvkem ke zdrojům energie může být radioaktivní rozpad některých nestabilních prvků – uranu, thoria.

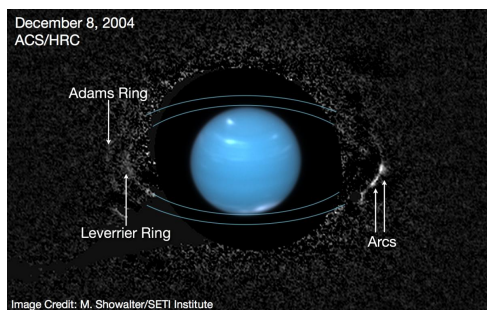
Nitro Neptunu lze zkoumat nepřímo prostřednictvím vlastností magnetického pole, které existuje díky tekuté elektricky vodivé vrstvě v nitru planety. Magnetické pole se vyznačuje sklonem osy  $47^\circ$  vzhledem k rotační ose. Je charakteristické pro planety s pohyblivým jádrem. Jeho intenzita kolísá mezi  $10^{-4} \text{ T}$  a  $10^{-5} \text{ T}$ , na rovníku dosahuje  $1,4 \mu\text{T}$ .

Neptun se kolem Slunce pohybuje po téměř kruhové dráze s oběžnou dobou 165 roků. S ohledem na sklon rotační osy zhruba  $28^\circ$  předpokládáme existenci ročních období s délkou přibližně 41 roků. Menší změny vzhledu jižní polokoule lze pozorovat i za kratší dobu (obr. 6).



Obr. 6

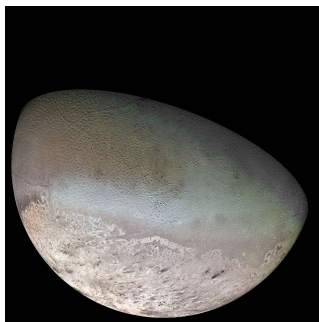
V roce 1984 bylo zjištěno nepravidelné zeslabování světla v pozadí ležících vzdálenějších hvězd, vysvětlením byly nekompletní prstence u Neptunu [8]. Tmavé oblouky zhuštěnin hmoty tvoří části prstenců (obr. 7). Rozlišujeme pět hlavních prstenců, pojmenovaných po astronomech podílejících se na objevu Neptunu. Dostaly název Galle, Le Verrier, Lassell, Arago, Adams. V nejnižší vzdálenosti 42 000 km se nachází Gallův velmi tenký prstenec, nejvýraznější Adamsův prstenec je v největší vzdálenosti 63 000 km, v obou případech od středu planety. Prstence nejsou stabilní, gravitační působení Neptunu překonává slabou vzájemnou přitažlivost částic a roztrhává prstenec. Částice jsou v chaotickém pohybu, při srážkách dochází k disipaci mechanické energie a působící moment hybnosti je transformuje vnějším směrem.



Obr. 7

Atraktivní je Neptunův měsíc Triton (obr. 8) o poloměru 1 350 km, hmotnosti  $2,2 \cdot 10^{22}$  kg s průměrnou hustotou  $2 \cdot 10^3$  kg  $\cdot$  m<sup>-3</sup>. Jde o nejchladnější těleso ve sluneční soustavě, povrchová teplota dosahuje pouze

37 K. Velmi řídká opticky tenká atmosféra je složena z dusíku podobně jako zemská, při tlaku pouze 1,6 Pa. Připomínáme, že na úrovni moře u Země je tlak  $1,01 \cdot 10^5$  Pa. Triton má jasný povrch, na němž se nachází zmrzlý dusík a vodní led, které vytvářejí ledovou čepičku. Odráží podstatnou část slunečního záření, albedo činí přibližně  $A = 0,76$ . Svými vlastnostmi měsíc připomíná planetesimály – tělesa z rané etapy formování sluneční soustavy.

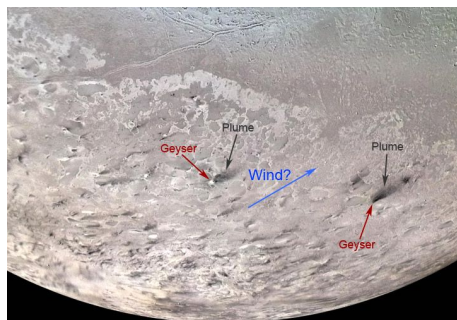


Obr. 8

Na povrchu Tritonu pozorujeme rozhraní dvou rozdílných typů terénů (obr. 9). Celkově je však povrch geologicky velmi aktivní, je mladší než 100 milionů roků. Proto nepřekvapuje relativně menší počet nalezených impaktních kráterů. Kosmická sonda Voyager 2 zjistila na Tritonu tavení zmrzlého dusíku, který v kapalně podobě tryskal a vytvářel gejzíry až do výše 8 km nad povrch měsíce [9]. Následné chvosty se táhly až do délky 150 km. Jde o projevy tzv. kryovulkanismu, který je vyvolán působením slapových sil zahřívajících nitro měsíce, tepelný tok z nitra činí řádově zhruba  $15 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ . Předpokládáme, že Triton má kamenné jádro tvořící 2/3 celkové hmotnosti měsíce. Plášť tělesa tvoří výrazná vrstva vodního a suchého ledu s amoniakem.

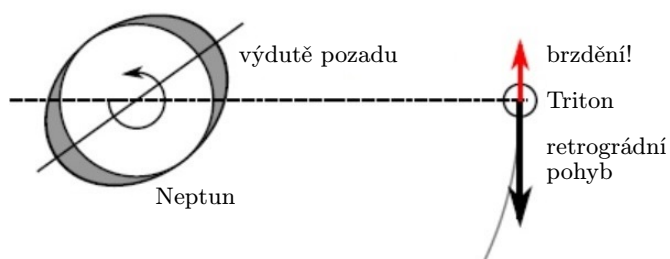
Jevem vhodným pro rozbor ve fyzikální výuce je sestupný pohyb měsíce Tritonu kolem Neptunu v opačném retrográdním směru vzhledem k rotaci planety. Podporuje kosmogonickou hypotézu, že jde o těleso původně z Kuiperova pásu, které bylo Neptunem zachyceno [10]. Doba oběhu je shodná s dobou rotace měsíce, jde o synchronní pohyb s tzv. vázanou rotací. Samotná dráha Tritonu je téměř ideálně kruhová, se vzdáleností od planety 354 800 km a oběžnou dobou 5,877 dne. Měsíc se pozvolna po spirální dráze přibližuje k Neptunu. Po překonání Rocheovy sféry, za několik miliard let, nastane jeho roztrhání a následný vznik prstence.





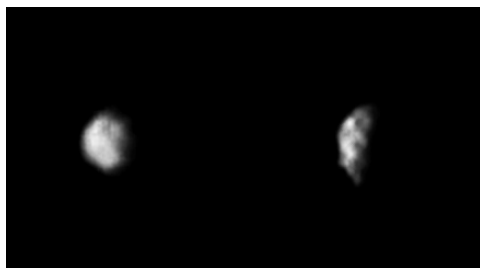
Obr. 9

Působící slapové síly při retrográdním pohybu Tritonu vyvolávají zásluhou tření vzduť, výdutě na Neptunu jsou posunuty vzhledem k spojnici planeta–měsíc dozadu. Dvojice sil Neptun–Triton způsobuje zpomalování rotace planety a pozvolné přibližování měsíce k ní, viz obr. 10 převzatý z [11]. Pravá výduť Neptunu je měsíci Tritonu blíže, proto silové působení mezi ní a měsícem je větší než v případě levé. Celkový moment hybnosti soustavy Neptun–Triton zůstává zachován. Vývoj soustavy je analyzován v [12, 13, 14] u nás je rozebírán pro výukové účely v [11, 15].



Obr. 10

Triton svým gravitačním poruchovým působením ovlivňuje výrazně pohyb malého měsíce Nereidy o hmotnosti  $3,1 \cdot 10^{19}$  kg. Ten obíhá po velmi výstředné dráze kolem Neptunu ve střední vzdálenosti  $a = 5\,513\,400$  km, s oběžnou dobou  $T = 360,136$  dne. Poloměr měsíce činí 170 km a při nízkém albedu  $A = 0,15$  je obtížně pozorovatelný. Dva snímky Nereidy, pořízené s odstupem tří dnů v srpnu 1989 (obr. 11) pořídila kosmická sonda Voyager 2 ze vzdálenosti 4,7 milionů km.



Obr. 11

Článek nás stručně seznámil s historií objevu Neptunu, jakož i s fyzikální podstatou vybraných jevů spojených s touto planetou a některými jejími měsíci. Věcný rozbor, i když v některých případech pouze v kvalitativní podobě, umožnil demonstrovat platnost fyzikálních zákonů. Ukázal možnosti případného rozšíření obsahu středoškolské výuky astronomie.

## Literatura

- [1] *Rees, M.*: The Role of Astronomy in Education and Public Understanding. In: New Trends in Astronomy Teaching. Cambridge University Press, London, 1996.
- [2] *Štefl, V.*: Byl objev Neptunu náhodný? Čes. čas. fyz., roč. 65 (2015), č. 4, s. 217–226.
- [3] *Comins, N. F.*: Sources of Misconceptions in Astronomy. Third International Seminars of Misconceptions and Educational in Sciences and Mathematics. Cornell University, 1993.
- [4] *Gomes, R. S., Levison, H. F., Tsiganis, K., Morbidelli, A.*: Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardement period of the terrestrial planets. *Nature* **435** (2005), 466–469.
- [5] *Gomes, R. S., Morbidelli, A., Levison, H. F.*: Planetary migration in a planetesimal disk: why did Neptune stop at 30 AU? *Ikarus* **170** (2004), 492–507.
- [6] *Pearl, J. C., Conrath, B. J.*: The albedo, effective temperature, and energy balance of Neptune, as terminated from Voyager data. *Journal of Geophysical Research Supplement*. **96** (1991), 18 921–18 930.
- [7] *Guillot, T.*: The Interiors of Giant Planets: Models and Outstanding Questions. *Annual Review of Earth and Planetary Science* **33** (2005), 493–530.
- [8] *Hubbard, W. B.*: 1981N1: A Neptune arc? *Science* **231** (1986), 1276–1278.
- [9] *Soderblom L. A., a.j.*: Triton's geyser – like plumes. Discovery and basic characterization. *Science* **250** (1990), 410–415.
- [10] *Angor, C. B., Hamilton, D. P.*: Neptune's capture of its moon Triton in a binary planet gravitational encounter. *Nature* **441** (2006), 192–194.
- [11] *Brož, M., Šolc, M.*: Fyzika sluneční soustavy. Matfyzpress, Praha, 2013.

- [12] *McCord, B. T.*: Dynamical Evolution of the Neptunian System. *The Astronomical Journal* **71**, 7 (1966), 585–590.
- [13] *Banfi, V.*: Future Dynamical Evolution of the Neptun – Triton System. A New Synthetic Method of Analysis. *Earth, Moon and Planets* **30** (1984), 43–52.
- [14] *Čuk, M., Gladman, B. J.*: Constraints on the Orbital Evolution of Triton. *The Astrophysical Journal* **626** (2005), L 113–116.
- [15] *Franc, T.*: Vybrané gravitační jevy ve vesmíru a jejich přiblížení středoškolákům. *Disertační práce*. MFF UK Praha, 2014.

## Zdroje vyobrazení

- Obr. 1: [https://en.wikipedia.org/wiki/Discovery\\_of\\_Neptune](https://en.wikipedia.org/wiki/Discovery_of_Neptune)
- Obr. 2: <http://faculty.humanities.uci.edu/bjbecker/ExploringtheCosmos/lecture12.html>
- Obr. 3: <http://en.wikipedia.org/wiki/Neptune>
- Obr. 4: <http://www.irishastronomy.org/index.php>
- Obr. 5: <https://en.wikipedia.org/wiki/Neptune>
- Obr. 6: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neptune\\_seasons.JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neptune_seasons.JPG)
- Obr. 7: [http://www.seti.org/sites/default/files/Neptune\\_Ring\\_Arcs.v3.jpg](http://www.seti.org/sites/default/files/Neptune_Ring_Arcs.v3.jpg)
- Obr. 8: [http://en.wikipedia.org/wiki/Triton\\_\(moon\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Triton_(moon))
- Obr. 9: [www.wolaver.org/space/triton-geysers.jpg](http://www.wolaver.org/space/triton-geysers.jpg)
- Obr. 10: Brož, M., Šolc, M.: *Fyzika sluneční soustavy*. Matfyzpress, Praha, 2013, obr. 177.
- Obr. 11: <http://planetimages.blogspot.cz/2015/05/neriid-from-voyager.html>

# Astronomie ve škole a mimo školu

RADEK KRÍČEK

Matematicko-fyzikální fakulta UK, Praha

Výuka astronomie na našich základních a středních školách má za sebou historii dlouhou desítky let. Názor na to, proč a jak astronomii vyučovat, prošel za tu dobu značnými změnami. V dnešní době se vzdělávací dokumenty soustředí v první řadě na vytváření klíčových kompetencí a astronomie, obsažená dříve ve školních osnovách, z oficiálních dokumentů do značné míry vymizela. Z pohledu některých astronomů je to nepřijemná zpráva. Ovšem jak si uvědomují mnozí učitelé, nemusí povědomí o vesmíru

---

\*) Článek vznikl díky podpoře grantu SVV 260220 Univerzity Karlovy.