

Astronomie: Jak si představit nepředstavitelné

OTA KÉHAR

Fakulta pedagogická Západočeské univerzity v Plzni

Během různých akcí zaměřených na astronomii, ať již popularizačního rázu nebo samotnou výuku ve škole, narážím na situace, kdy je nutné účastníkům přiblížit některé těžko představitelné hodnoty některých veličin. V příspěvku se zaměřím na několik praktických ukázek, kde pomocí srovnávací metody ilustruji základní představu o velikostech vesmírných těles různých typů, prostorových vzdáleností mezi nimi, případně složitě představitelných fyzikálních veličin (např. tlak nebo množství vody v atmosféře).

Motivační úloha astronomie

Astronomie je jedna z nejstarších věd. Zabývá se vesmírnými tělesy a jejich fyzikálními a chemickými vlastnostmi, sleduje jejich vzájemné působení. Zkoumá vznik, vývoj a zánik vesmírných těles. I když lidé pozorují oblohu a vesmírná tělesa od počátku své existence, představy o vesmíru se neustále mění.

Při pohledu na hvězdnou oblohu se nám hvězdy, ale i planety jeví jako svítící body, které se od sebe liší barvou a jasností. Když si přečteme astronomický článek, může nás překvapit množství podrobností. Odkud to astronomové vědí? Jsou to pouze dohady, nebo je za tím množství měření a výpočtů?

Nechávat astronomii ve školách jako poslední téma fyziky navíc ztrácí další důležitý aspekt: jedná se o téma populární, atraktivní. Jednak pokládány otázkami a hlavně svými výsledky, ať již formou astronomických fotografií či získaných faktů. Motivační hodnota astronomie pro získání zájmu mladých o studium přírodních věd tak může zůstat nevyužita.

Volba metod výuky astronomického učiva nám dovoluje dosáhnout vytyčených vzdělávacích cílů se stanoveným obsahem učiva. Ukazuje se, že pro výuku astronomických poznatků na střední škole jsou vhodné metody deduktivní, induktivní a srovnávací.

Deduktivní metoda postupuje od obecných principů směrem k individuálním jevům a vztahům. Žáci se pomocí této metody učí třídit jevy užší platnosti pod jevy širší platnosti. Tato metoda výrazně přispívá k formování hierarchie zákonitostí a pojmů. Řada astronomických jevů různých měřítek má totiž společnou fyzikální podstatu. Například je tato metoda vhodná při výkladu kosmogonie sluneční soustavy, hvězd a Galaxie.

Induktivní metodu můžeme uplatnit při postupném výkladu vlastností planet, hvězd a galaxií. Obě metody (deduktivní, induktivní) není vhodné od sebe izolovat, ale lze je používat současně a vzájemně jimi výuku doplňovat.

K nejobtížnějším vzdělávacím cílům výuky astronomických poznatků patří bezesporu tvorba základních představ o velikostech vesmírných těles různých typů (planeta,

hvězda, sluneční soustava, galaxie, vesmír) a prostorových vzdálenostech mezi nimi. V tomto okamžiku je možné použít srovnávací metodu, kdy různá číselná, obrazová a modelová srovnání ulehčují žákům pochopení rozmanitosti rozměrů a hmotností vesmírných těles (planety kamenné a plynné, trpasličí planety, planetky, komety atd.) ve sluneční soustavě, rozměrů hvězd v jednotlivých stádiích jejich vývoje (hvězdy hlavní posloupnosti, obři, závěrečná stádia – bílý trpaslík, neutronová hvězda, černá díra). K snadnému pochopení prostorových měřítek ve vesmíru jsou vhodná srovnání vzdáleností kosmických těles, např. Země–Měsíc, Země–Slunce, Slunce–nejbližší hvězdy apod. Hojně používané je srovnání poloměru a hmotnosti Země s ostatními planetami, poloměru a hmotnosti Slunce s různými typy hvězd, naší Galaxie s jinými galaxiemi.

Netradiční příklady srovnávací metody

Hledání exoplanet aneb jedna ku miliardě

Nejsnáze představitelná metoda používaná při hledání planet u jiných hvězd (pro tyto planety používáme pojem exoplanety) je metoda přímého zobrazení, která spočívá v přímém vyfotografování exoplanety obíhající okolo vzdálené hvězdy. Tato metoda má ovšem svá omezení a nelze ji (snadno) použít. Na vině jsou rozlišovací schopnost přístrojů (úhlová vzdálenost mezi hvězdou a exoplanetou) a kontrast (relativní jasnost hvězdy a exoplanety). Podíváme se na poměry ve sluneční soustavě: zářivý výkon Slunce je $4 \cdot 10^{26}$ W, odražený výkon od Země je $5 \cdot 10^{16}$ W, od Jupiteru $2,5 \cdot 10^{17}$ W; tzn. kontrastní poměr je 1:1 000 000 000, což odpovídá změně o 23 mag. Detekovat takovou změnu je za současného technického vybavení snímacích prvků nemožné. Kdybychom uvažovali hvězdu ve vzdálenosti 100 světelných let a chtěli odhalit exoplanetu ve vzdálenosti 1 astronomické jednotky, znamenalo by to rozlišovací schopnost dalekohledu lepší než 0,03 úhlové vteřiny. K tomu by byl zapotřebí objektiv o průměru 4 m. To je technicky realizovatelné, nicméně museli bychom vyřešit vliv atmosféry Země – její neklid neboli seeing, který je v řádu jedné úhlové vteřiny. To lze řešit adaptivní optikou nebo umístěním dalekohledu mimo atmosféru Země.

Jak si ale představit kontrastní poměr jedna ku jedné miliardě? Představme si maják a světlušku, kterou bychom umístili do vzdálenosti 30 cm od majáku. Celé toto uskupení bychom pozorovali ze vzdálenosti 700 km, což znamená umístit maják např. do Bruselu a pozorovat vše z Prahy. Nesmíme v tomto případě brát v úvahu zakřivení Země (ale ani atmosférickou refrakci), protože jinak bychom potřebovali maják, který bude vysoký několik desítek km, abychom ho mohli z této vzdálenosti pozorovat.

Atmosféra Marsu aneb sedm hektopascalů

Atmosféra planety Mars je zcela odlišná od atmosféry naší Země. Je složena zejména z oxidu uhličitého s malým množstvím ostatních plynů.

Vzduch na Marsu obsahuje pouze jednu tisícinu vody v porovnání se Zemí, přesto toto množství je schopné zkonenzovat a vytvořit oblačnost, která se vznáší vysoko v atmosféře nebo se víří okolo svahů ohromných sopek. V údolích se mohou v časných ranních hodinách utvářet místa s mlhou.

Vzhledem k tomu, že má Mars zhruba třetinové gravitační zrychlení vůči Zemi, unikají z horních vrstev jeho atmosféry částice plynů mnohem rychleji, než je tomu u hmotnější a větší Země. Tlak na povrchu se pohybuje mezi 600 a 1 000 Pa (s extrémní 30 Pa na vrcholku hory Olympus Mons až 1 155 Pa v oblasti Hellas Planitia). Je to přibližně 100krát až 150krát méně než na povrchu Země; odpovídá to tlaku zhruba ve výšce 30 km nad zemským povrchem (průměrný tlak na povrchu Země je 101,3 kPa).

Jsou schopni si tyto hodnoty představit studenti? Kdo z nich se nacházel ve výšce nad 30 km nad Zemí jako např. Felix Baumgartner, který skočil z výšky 39 km nebo viceprezident Google, který se podíval o 2 km výše? Stejně tak představa o tlaku není příliš názorná. Proto raději používám lépe představitelnou hmotnost.

Začínám jednoduchou otázkou, jakou má hmotnost 1 m³ vzduchu na Zemi (přičemž pomocí svinovacího metru ukazují právě 1 m, aby představa pro studenty byla dokonalejší). Odpovědi se různí...přeci nemůže vážit vůbec nic, když je kolem nás, až po řádově kilogramy. Abych odpověď usnadnil (případně používám jako doplňující nápovědu), používám některé běžné známé pomůcky – několikagramový sáček čaje, 20 g vanilkový cukr, 100 g čokoládovou polevu, 1000 g polohrubou mouku.

Jako správnou odpověď považuji 1 kg. Nicméně není to tak jednoznačné. Je nutné doplnit informaci o podmínkách. Stejnou hustotu má vzduch ve výšce 1 500 m nad mořem, tzn. před výstupem na Sněžku (1 602 m) nebo při teplotě 100 °C. Při běžné pokojové teplotě je hustota vzduchu okolo 1,3 kg/m³; při nadmořské výšce 300 m je to více jak 1 kg/m³, při nadmořské výšce 0 m a 15 °C je hustota vzduchu 1,225 kg/m³.

Následuje otázka na odhad hmotnosti 1 m³ vzduchu na Marsu. Je vhodné připomenout, že vzduch je na této planetě mnohem řidší, hodnota musí být (mnohem) menší než na Zemi. Odpovědi se mohou lišit nejenom od studentů, ale i na různých zdrojích na internetu. Původně jsem našel hodnotu 3 g/m³ [5], k nalezení je i mnohem vyšší hodnota 15 g/m³ [6], až po 20 g/m³ nacházející se na stránkách NASA [7].

Pokud porovnáme hmotnostní složení obou atmosfér, zjistíme, že atmosférický tlak při povrchu Země je 145krát vyšší, než při povrchu Marsu (1013 hPa versus 7 hPa), nicméně atmosféra Marsu je 1,5krát těžší než atmosféra Země (Mars: 95 % CO₂ = 44 nukleonů = 42 g/mol; Země: 77 % N₂ a 21 % O₂ = 60 nukleonů = 28 g/mol). Jestliže má 1 m³ vzduchu Země hmotnost 1,3 kg, pak na Marsu je nejbližší hodnota zhruba 13 g (odpovídá svojí hmotností sáčku cappuccina).

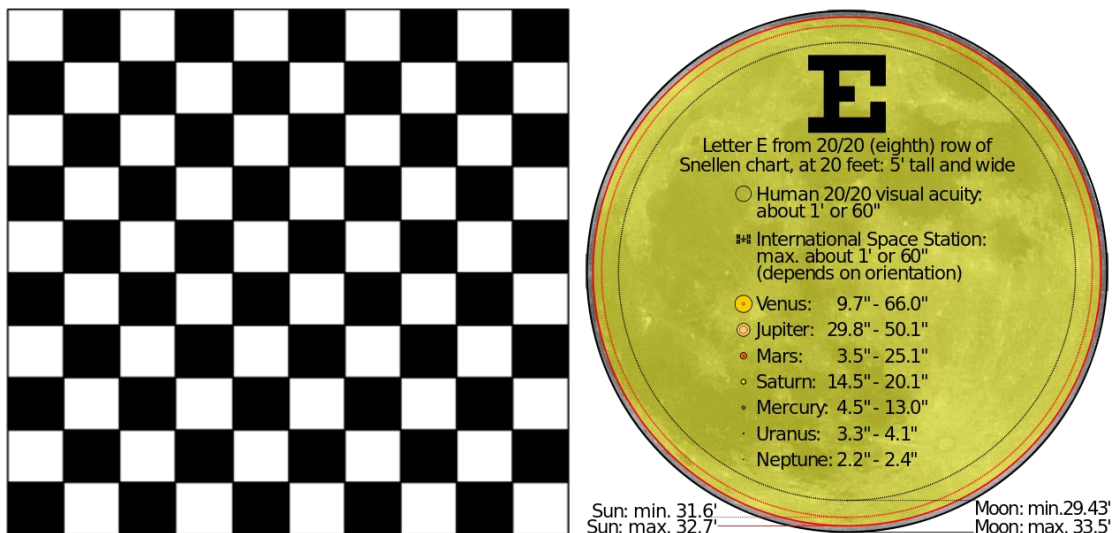
Planety na obloze aneb jedna úhlová minuta

Planety se na obloze na první pohled, při pozorování pouhými očima, jeví jako bod. Souvisí to s rozlišovací schopností lidského oka neboli schopností oka rozlišit dva co nejbližší ležící body. Bod se na sítnici oka zobrazuje jako malý rozptylový kroužek. Dva body lze vzájemně odlišit, pokud je na sítnici mezi jejich obrazy (rozptylovými kroužky), alespoň jeden volný světlem nezasažený čípek. Průměr čípku je asi 5 μm, vzdálenost sítnice od obrazového uzlového bodu oka je 17 mm. Úhlová vzdálenost ještě rozlišitelných bodů je tedy 1 úhlová minuta. Rozlišovací mez závisí na kontras-

tu, jas a počtu pozorovacích podrobností. Meze 1 úhlové minuty dosáhneme při pozorování černých čárek na bílém podkladě při vhodném osvětlení.

Jak si představit 1 úhlovou minutu? Jako pozemský předmět můžeme použít 1 Kč, která má dle ČNB průměr 20 mm. Studenti mohou odhadnout, jak daleko se musíme vzdálit, abychom korunu viděli právě pod úhlem jedné úhlové minuty. Jde o vzdálenost 69 m. Snazší varianta realizovatelná i ve třídě je použít šachovnici o velikosti 10 x 10 políček (viz obr. níže vlevo). Pokud uděláme tento čtverec o velikosti 10 mm, měli bychom ho rozlišit ještě ve vzdálenosti 7 m, což se ukazuje, že je nereálné. Můžeme si udělat i další varianty: 15 mm @ 10 m, 22 mm @ 15 m, 29 mm @ 20 m.

Na tomto příkladě lze demonstrovat, proč planety vidíme na obloze jen jako bod. Největší planeta na obloze, Venuše, dosahuje max. 66 úhlových vteřin. Jupiter dosahuje max. 50 úhlových vteřin. Okolo Jupitera se pohybují čtyři velké měsíce ve vzdálenosti až 7 úhlových minut, což je sice nad rozlišovací schopností lidského oka, nicméně pouhýma očima je nelze snadno pozorovat, protože jas Jupitera nám to znemožňuje. Mars dosahuje při svém největším přiblížení max. 25 úhlových vteřin, což je již hluboko pod rozlišovací schopností lidského oka.



K porovnání úhlových průměru Slunce, Měsíce a planet s Mezinárodní vesmírnou stanicí, znakem E z osmého řádku Snellenovy tabule lze použít schéma na obrázku výše vpravo. Pro získání věrného zobrazení velikostí je nutné mít obrázek ve vzdálenosti 103 násobku šířky kružnice odpovídající „Měsíc: max.“ (Moon: max.). Například pokud bude tento rozměr na monitoru 10 cm, je nutné být od něj vzdálen 10,3 m.

Nepovedený přírůstek na kilometr krychlový

Vraťme se ještě na okamžik k atmosféře Marsu. Mars se značně liší od Země. Jeho průměr je poloviční. Zatímco povrch Země je ze 70 % pokryt vodou, na povrchu Marsu se nemůže vyskytovat voda v kapalném skupenství, a to díky nízkému atmosférickému tlaku. Přesto se voda nachází v jeho atmosféře, i když je velmi suchá, obsahuje 10 000krát méně vody než atmosféra Země. Ale i z tak nepatrného množství vznikají oblaka z jemných ledových částic, tvoří se přízemní ranní mlhy v údolích a

tenká vrstva jíní v zimě. Uvádí se, že atmosféra Marsu obsahuje zhruba 1–2 km³ vody. Je to hodně nebo málo? Kolik je 1 km³ vody?

Představme si nádrž, která má 1 km na šířku, 1 km na délku a 1 km na výšku = 1 km³, kterou naplníme vodou. Nyní do nádrže uděláme otvor, kterým necháme vytékat 1 litr za sekundu. Otázka zní: za jak dlouho nádrž vyteče? Necháme studenty tipovat, zda mají o této záležitosti nějakou představu, zároveň je vtáhneme lépe do děje a budou chtít znát správnou odpověď. Odpověď bude víceméně překvapivá, zní 31 710 let a v tomto případě jsme udělali špatný příklad na srovnání (1 km³ je 1 bilion litrů vody neboli 1 teralitr, $10^{12} \text{ l} = 10^{12} \text{ s} = 11\,574\,074 \text{ dnů}$). Nicméně můžeme poukázat na velikost (půdorys) nádrže v porovnání s velikostí náměstí či čtvrtí ve městě – normální chůzí potřebujeme okolo nádrže necelou hodinu. Na Zemi není vyšší stavby, než naše kilometrová nádrž – nejvyšší budova světa Burdž Chalífa v Dubaji by se svými 828 m tiše záviděla. A co pak množství vody? V České republice není přehrada, která obsahuje více vody. Nejrozlehlejší přehrada Lipno obsahuje 0,3 km³ vody, nejobjemnější přehrada České republiky Orlík 0,7 km³ vody. Bylo by zapotřebí vody z obou nádrží na naplnění naší nádrže. Na stránkách Povodí Vltavy (nebo i jiných povodí) lze najít průtoky jednotlivých řek. Pokud např. Prahou protéká 200 m³/s (tzn. hůře představitelných 200 000 l/s), nádrž by se zaplnila za necelé 2 měsíce. Výhodnější by byly pro nás záplavy; to když v roce 2013 protékalo Prahou v kulminaci 3 500 m³/s, stačily by na naplnění naší nádrže jen necelé 4 dny.

Závěr

Srovnávací metodu najdeme již u J. A. Komenského, kdy vyžadoval přirozenou metodu vzdělávání, odvozenou z poznání a napodobování přírody. Z vlastní zkušenosti mám ověřené, že studentům tato metoda vyhovuje a lépe je to vtáhne do diskuze ohledně možných výsledků. Pokud student odhadne výsledek, je potom mnohem více zvědavý, jaká je správná odpověď a jak blízký jí on sám byl, případně jak na tom byl v porovnání s dalšími studenty.

Literatura

- [1] Wikimedia Commons. *Comparison angular diameter solar system* [online]. [cit. 2015-09-14]. Dostupné z: commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison_angular_diameter_solar_system.svg
- [2] WikiSkripta, projekt sítě lékařských fakult MEFANET. *Rozlišovací schopnost lidského oka* [online]. [cit. 2015-09-14]. Dostupné z: www.wikiskripta.eu/index.php/Rozlišovací_schopnost_lidského_oka
- [3] KÉHAR, O. *Katalogy astronomických objektů na webových stránkách Astronomia a jejich použití ve školách*. Plzeň, 2014. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta pedagogická. Dostupná z: kof.zcu.cz/st/dis/kehar/disertacni_prace_kehar.pdf.
- [4] Povodí Vltavy. *Povodí Vltavy* [online]. 2013 [cit. 2015-09-14]. Dostupné z: pvl.cz

- [5] Mission to Mars. *Climate & Weather* [online]. [cit. 2015-09-14]. Dostupné z: http://resources.yesican-science.ca/trek/mars2/final2/mars_info/mars_info_climate.html
- [6] Physics Forums. *Mars balloon, forces, pressure* [online]. [cit. 2015-09-14]. Dostupné z: <https://www.physicsforums.com/threads/mars-balloon-forces-pressure.481367/>
- [7] Planetary Fact Sheets. *Mars Fact Sheet* [online]. [cit. 2015-09-14]. Dostupné z: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>