

# Měsíc ve školní výuce

VLADIMÍR ŠTEFL

Přírodovědecká fakulta MU, Brno

Nejbližším a nejvíce prozkoumaným kosmickým tělesem ve vesmíru je souputník Země Měsíc. Jak sledováním ze Země či přímým výzkumem na povrchu prostřednictvím lidských posádek, automatických vozítek, tak teoretickou analýzou údajů spojených s Měsícem, opírající se o fyzikální a chemické poznatky. Pro astronomii je nenahraditelný svou existencí na relativně blízké oběžné dráze kolem Země. Měsíc umožňuje zkoumání vzdálenějších těles, např. jeho zákryty hvězd stanovení poloměrů, u rádiových zdrojů zjištění jejich přesné polohy na obloze, připomínáme historii identifikace kvasaru 3C 273 [1].

Jaký je význam Měsíce pro život na Zemi? Jeho blízkost k ní, a tím i výraznost slapových sil vyvolávajících příliv a odliv, usnadnila přechod života z moře na pevninu. Pro jeho rozvoj na Zemi byla důležitá neproměnnost klimatu. To zajišťoval gravitační vliv Měsíce, který stabilizoval sklon zemské osy. Soustava Země–Měsíc a její vzdálenost od Slunce vytváří optimální životní podmínky.

Měsíc stál u kolébky historie objevu zákona všeobecné gravitace, patřila mu hlavní role v Newtonových úvahách o totožnosti tíhové a gravitační síly. Ve školní výuce je důležité porozumění problematice pohybu Měsíce pro tvorbu fyzikálních znalostí o gravitačním poli, které žáci vesměs postrádají, jak ukazuje řada výzkumů u nás [2] i v zahraničí [3]. Podstatné je rovněž osvojení prostorových představ o nejbližším okolí Země, jakož i pochopení skutečnosti, že rozměry Země, Měsíce a Slunce ve sluneční soustavě jsou zanedbatelné ve srovnání se vzdálenostmi mezi nimi.

Na obloze je Měsíc velmi působivý vzhledem k relativně rychlým změnám jeho vzhledu. Lze ho snadno sledovat i bez dalekohledu. Pro nepřehlédnutelnou jasnost, druhou největší na obloze po Slunci, je jeho pozorování pro žáky fascinující. Výše zmiňované může vytvářet motivační impuls k přemýšlení o jevech spojených s Měsícem na základě geometrických, kinematických a dynamických poznatků žákům známým z matematiky a fyziky.

Přemýšliví žáci, kterým je článek věnován především, si kladou v souvislosti s Měsícem řadu otázek:

Jak vznikl a jak je starý?

Jaká je stavba jeho nitra, má tekuté jádro jako Země?

Jak vznikly krátery na povrchu?

Probíhají i v současnosti nějaké změny na povrchu?

Existuje případně na Měsíci ještě vulkanická činnost?

Proč nemá Měsíc atmosféru?

Co je důvodem velkých rozdílů povrchových teplot mezi Měsícem a Zemí?

Ovlivňuje Měsíc Zemi, působí na její atmosféru, hydrosféru a litosféru?

Jaký je význam Měsíce pro život na Zemi?

Pro účely výuky připomeneme typické miskoncepce, s kterými se setkáváme zejména u žáků základních škol a nižších ročníků gymnázií. Pojem miskoncepce chápeme v klasickém pojetí podle Nachtigalla [4] ve smyslu „chybných představ o fyzikálních jevech, které se objevují u žáků, studentů“ ... „při vysvětlování nebo předpovědích týkajících se těchto jevů“. Uvedenou interpretaci budeme aplikovat na astronomické jevy, jejich vysvětlování či předpovědi.

K nejčastěji se vyskytujícím astronomickým miskonceptům, vztahujícím se k našemu tématu, patří:

Měsíc vyzařuje světlo stejně jako Slunce.

Měsíc pozorujeme pouze v noci.

Měsíc nerotuje kolem své osy, pozorujeme stále stejnou polokouli.

Fáze Měsíce jsou způsobeny stínem Země.

Zatmění Měsíce jsou částečným případem měsíčních fází.

Měsíc nemá gravitační pole, jinak by měl atmosféru.

Gravitační pole je konečné, mají ho pouze některá kosmická tělesa, Měsíc nikoliv.

Úvodem výkladu je vhodné získat správné prostorové představy o velikostech a vzdálenostech těles soustavy Země–Měsíc–Slunce. Vytvoříme žákům srozumitelný sportovní model. Připomínáme, že poloměr Měsíce činí pouze 27 % pozemského. K porovnání velikostí obou těles použijeme srovnání dvou míčů, Zemi reprezentuje basketbalový míč č. 7 o průměru 24 cm, Měsíc tenisový míček o průměru 6,9 cm. V tomto měřítku velikostí je průměrná vzdálenost obou míčů zachycujících Zemi a Měsíc v prostoru

7,2 m, vzdálenost Země–Slunce činí 2 800 m. Z uvedené modelové představy je žákům zřejmé, že velikosti kosmických těles Země a Měsíce jsou ve srovnání se vzdáleností mezi nimi zanedbatelné.

Přejděme k charakterizaci fyzikálních podmínek na povrchu Měsíce. Určujícím faktorem pro pohyb po povrchu Měsíce či existenci jeho atmosféry je gravitační zrychlení. Je závislé na dvou základních charakteristikách, na hmotnosti  $M$  a poloměru  $R$ , což vyjadřujeme vztahem

$$g = G \frac{M_M}{R_M^2} \doteq 1,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Dalším parametrem je teplota, která se na povrchu mění, ve dne dosahuje asi 400 K, v noci 130 K. Plocha povrchu Měsíce  $3,8 \cdot 10^7 \text{ km}^2$  přibližně odpovídá ploše světadílu Amerika  $4,2 \cdot 10^7 \text{ km}^2$ .

Proč si Měsíc neuchoval atmosféru? Pro odpověď na otázku je zásadní porovnání únikové a střední kvadratické rychlosti za podmínek na povrchu Měsíce. Jak v článku dále určíme, úniková rychlost z Měsíce činí  $2,4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Za teplotu zvolíme maximální denní teplotu na povrchu Měsíce  $T = 400 \text{ K}$ . Provedeme výpočet střední kvadratické rychlosti

$$v_{\text{strk}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

pro molekuly  $\text{N}_2$  a  $\text{O}_2$ . Obdržíme  $v_{\text{strkN}_2} \doteq 840 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $v_{\text{strkO}_2} \doteq 786 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Z Maxwellova rozdělení rychlostí vyplývá, že existují molekuly pohybující se rychlostí větší než střední kvadratickou. Statistické propočty udávají, že při poměru hodnot střední kvadratické rychlosti a únikové rychlosti rovném  $1/3$ , což přibližně platí pro obě uvedené molekuly, by unikla polovina atmosféry Měsíce za zhruba 40 dnů. Hmotnost Měsíce je malá, aby udržela gravitační silou částice atmosféry při teplotách existujících na Měsíci. Trvalá atmosféra u Měsíce by zůstala v případě, jestliže střední kvadratická rychlost nepřekročí  $1/6$  únikové rychlosti.

V souvislosti s pohybem Měsíce a soustavou Země–Měsíc–Slunce si položíme otázku, které těleso, Země nebo Slunce působí větší gravitační silou na Měsíc? Předpokládejme znalost hmotností uvedených těles a vztahu  $r_{\text{MS}} = 390r_{\text{MZ}}$ . Dosadíme do poměru velikostí porovnávaných sil:

$$\frac{F_{\text{MS}}}{F_{\text{MZ}}} = \frac{G \frac{M_M M_S}{r_{\text{MS}}^2}}{G \frac{M_M M_Z}{r_{\text{MZ}}^2}} = 2,17$$

Gravitační působení Slunce je více než 2krát větší než Země. Proč tedy říkáme, že se Měsíc pohybuje kolem Země?

Měsíc se pohybuje uvnitř tzv. oblasti aktivity planety Země vzhledem k Slunci. V tomto prostoru převládá gravitační vliv Země nad rušivým působením Slunce. Planeta ruší pohyb vztahovaný ke Slunci více, než ruší Slunce pohyb vztahovaný k Zemi. Přesněji vyjádřeno oblastí aktivity Země nazýváme prostor kolem ní, ve kterém je poměr hlavního zrychlení udíleného Zemi Měsíci ku poruchovému zrychlení, vyvolávaném Sluncem větší, než poměr hlavního zrychlení získávaného od Slunce ku poruchovému zrychlení udíleného Zemi. Proto je výhodné zvolit Zemi jako centrální těleso a Slunce jako rušící.

Matematicky první poměr, zlomek můžeme vyjádřit

$$k_1 = \frac{M_Z}{M_S} \left( \frac{r_{MZ}}{r_{MS}} \right)^3 \frac{1}{\sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi}},$$

kde  $\varphi$  je úhel MZS. Zjednodušeně předpokládáme, že Měsíc a Země se nachází ve stejné vzdálenosti od Slunce. Druhý zlomek je dán vztahem

$$k_2 = \frac{M_S}{M_Z} \left( \frac{r_{MZ}}{r_{MS}} \right)^2.$$

Slovní nerovnici zachytíme matematicky  $k_1 > k_2$ , úpravou obdržíme

$$r_{MS} \sqrt[5]{\frac{\left(\frac{M_Z}{M_S}\right)^2}{\sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi}}} > r_{MZ}.$$

Je zřejmé, že oblast není sférická, jde o zploštělý sféroid. Závislost na úhlu  $\varphi$  je slabá, proto se zjednodušeně uvádí, že oblast aktivity Země zahrnuje prostor přibližně do vzdálenosti 930 000 km od ní. Kolem Slunce se pohybuje barycentrum soustavy Země–Měsíc, což je podstatné pro správný výklad například slapů. Podrobnější rozbor vhodný pro střední školy najde čtenář v [5], [6], úplný vysokoškolský v [7].

K zamyšlení nad působením gravitačního pole Měsíce vede následující problém. Rozhodněte, zda raketa vypuštěná z povrchu Měsíce rychlostí  $-\mathbf{v}$ , kde  $\mathbf{v}$  je okamžitá rychlost Měsíce na jeho dráze kolem Země, dopadne zpět na Měsíc, na Zemi, či se dostane na oběžnou dráhu kolem některého z kosmických těles. Předpokládáme znalost jejich charakteristik.

Nejprve porovnáme silové působení gravitačních sil Měsíce a Země působících na raketu nacházející se na povrchu Měsíce

$$\frac{F_M}{F_Z} = \frac{G \frac{M_M m_{\text{rak}}}{R_M^2}}{G \frac{M_Z M_{\text{rak}}}{r_{MZ}^2}} = \frac{M_M r_{MZ}^2}{M_Z R_M^2} \doteq 600.$$

Přitažlivá síla Země je velmi malá ve srovnání se silou Měsíce, pouze slabě narušuje pohyb rakety v gravitačním poli Měsíce. K prověření, zda raketa spadne zpět na Měsíc nebo se od něj vzdálí, provedeme následující výpočet. První kosmická rychlost na Měsíci činí

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M_M}{R_M}} \doteq 1,7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1},$$

druhá kosmická rychlost je

$$v_2 = \sqrt{2G \frac{M_M}{R_M}} \doteq 2,4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Rychlost pohybu Měsíce kolem Země dosahuje

$$v = \frac{2\pi r_{ZM}}{T_M} \doteq 1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Z porovnání hodnot je zřejmé, že raketa dopadne zpět na Měsíc.

Jak je známo, měsíční slapy jsou silnější než sluneční, ale proč? Slovní výklad v [8] upozorňuje na nesprávnost obvyklé odpovědi, že slapy ubývají s třetí mocninou vzdálenosti, kdežto hmotnosti uvedených těles vystupují pouze v lineární závislosti. Doplníme uvedené vysvětlení matematickými vztahy. Měsíc a Slunce mají na obloze stejnou úhlovou velikost, která je rovna poměru lineárních velikostí a vzdáleností, tedy platí

$$\alpha_M = \alpha_S, \quad \alpha_M = \frac{R_M}{r_{MZ}}, \quad \alpha_S = \frac{R_S}{r_{MS}}.$$

Dále platí  $V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi \alpha^3 r^3$ , tudíž objemy obou těles rostou s třetí mocninou vzdáleností. Hmotnost je rovna součinu objemu a hustoty, proto je rozhodujícím poměr hustot obou těles. Při  $\rho_M = 3,3 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\rho_S = 1,4 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  je hustota Měsíce 2,4krát větší. Slapový vliv Měsíce je průměrně 2,4krát větší než Slunce.

Se slapy souvisí jev vzdalování Měsíce od Země, který v současnosti činí průměrně  $37 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Tato velmi malá hodnota byla naměřena po instalaci laserových odražečů na povrchu Měsíce výpravami Apolla 11, 14 a 15. Zmiňovaná přesná měření v kombinaci se zdokonalenou teorií pohybu Měsíce umožňují nyní zjišťovat jeho polohu s přesností 1,1 mm. Proč se Měsíc vzdaluje od Země?

Zjednodušeně předpokládejme, že soustava Země–Měsíc je izolována z gravitačního hlediska, platí v ní zákon zachování celkového momentu hybnosti. Skládá se z rotačních momentů hybnosti obou těles a jejich dráhových momentů hybnosti kolem barycentra soustavy Země–Měsíc. Mezi nimi působí vzájemně slapové síly, obě tělesa jsou částečně deformovatelná. Nelze proto uvažovat dva nezávislé zákony zachování momentu hybnosti, pro rotační a dráhové momenty hybnosti, nýbrž jeden jediný:

$$L_c = L_{\text{rotZ}} + L_{\text{rotM}} + L_{\text{dZ}} + L_{\text{dM}}.$$

Hodnoty v současnosti jsou:

$$\begin{aligned} L_{\text{rotZ}} &= 5,9 \cdot 10^{33} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \\ L_{\text{rotM}} &= 2,3 \cdot 10^{29} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \\ L_{\text{dZ}} &= 3,5 \cdot 10^{32} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \\ L_{\text{dM}} &= 2,9 \cdot 10^{34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \\ L_c &= 3,5 \cdot 10^{34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}. \end{aligned}$$

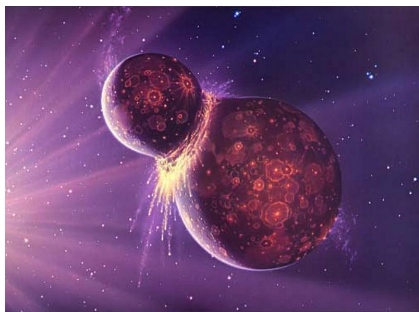
Podstatný je tedy rotační moment hybnosti Země  $L_{\text{rotZ}}$  a dráhový moment hybnosti Měsíce  $L_{\text{dM}}$ . Z celkového momentu hybnosti soustavy Země–Měsíc  $L_c$  tvoří rotační moment hybnosti Země 17 % a dráhový moment hybnosti Měsíce 82 %. Dráhový moment hybnosti Země je přibližně 1 %, budeme ho proto v úvaze zanedbávat. Zhruba platí, že rotační moment hybnosti Země je 5krát menší než dráhový moment hybnosti Měsíce. Proto lze rovnici zákona zachování momentu hybnosti sledované soustavy zapsat ve tvaru

$$L_c = L_{\text{rotZ}} + L_{\text{dM}}.$$

Síly přílivového tření vyvolané především měsíčními slapy zpomalují rotaci Země, za jednu otočku dosahuje zvětšení rotační periody  $4,4 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ . Pokles velikosti úhlové rotace Země a tudíž i jejího rotačního momentu hybnosti  $L_{\text{rotZ}}$  je v důsledku platnosti zákona zachování momentu hybnosti v soustavě kompenzován nárůstem dráhového momentu hybnosti Měsíce  $L_{\text{dM}}$ , tedy vzdálenosti Měsíce. Za předpokladu lineárního vzdalování Měsíce od Země lze propočítat jak minulý, tak i budoucí vývoj popsáního

procesu. Předchozí vývoj potvrzují počty denních přírůstky korálů v roce v druhohorách, což při konstantní délce roku dává kratší délku dne, podrobnější údaje jsou zpracovány v didaktickém článku [9].

S uplatněním zákona zachování momentu hybnosti je spjata teorie vzniku Měsíce. Musí vysvětlovat dynamiku soustavy Země–Měsíc, současnou velikost jejího celkového momentu hybnosti stejně jako shodnost chemického složení hornin obou těles. Podle nejpravděpodobnější tzv. teorie velkého impaktu [10], [11] vznikl Měsíc před zhruba 4,5 miliardami roků, kdy se Země střetla s tělesem o hmotnosti asi jedné desetiny hmotnosti Země, viz obr. 1, které se pohybovalo rychlostí přibližně  $13,5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Úhel, pod kterým se obě tělesa srazila, byl malý, šlo o tzv. tečnou srážku, ale i tak uvolněná energie vyvolala roztavení a uvolnění horních vrstev Země. Vyvržený materiál kolem ní vytvořil prstenec, který se při ochlazení začal formovat do malých zrněk prachu slepujících se do větších úlomků, až vznikl Měsíc. Shodnost materiálu obou těles dokládá například stejný poměr izotopů kyslíku  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  a  $^{18}\text{O}$  v jejich horninách. Původní vzdálenost Měsíce od Země činila asi 15 000 km. Postupně se však od ní vzdaloval až na dnešní průměrnou vzdálenost 384 400 km. Srážka způsobila změnu úhlu rotační osy Země na oběžné dráze kolem Slunce.



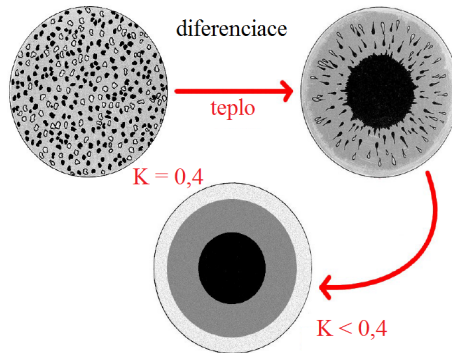
Obr. 1<sup>1</sup>

Po vzniku Měsíce došlo v jeho nitru ke gravitační diferenciaci prvků podle hustoty, migraci těžší klesaly do středu (obr. 2). Železné jádro o poloměru zhruba 350 km umožnilo před 4,2 miliardami roků vznik silného magnetického pole. Pro jeho formování byly nezbytné dvě podmínky, přítomnost magnetického materiálu a elektrických polí. Tím prvním jsou sloučeniny železa v jádře. Pohyby jednotlivých vrstev vůči sobě vyvolávají

<sup>1</sup>Zdroj: [www.universetoday.com/19718/formation-of-the-moon](http://www.universetoday.com/19718/formation-of-the-moon)

elektrické proudy. Magnetické pole vzniká pohybem elektrických nábojů. V dnešní době má Měsíc slabé magnetické pole, řádově zhruba  $10^{-9}$  T.

Jaká je stavba nitra Měsíce a jak ji můžeme zkoumat? Především je využívána metoda analýzy deformací způsobených slapovými silami Země či šíření seismických vln na Měsíci. Příčné vlny, tzv. S vlny, se prakticky nešíří v kapalinách, neboť tečná napětí jsou velmi malá. Naopak podélné vlny, tzv. P vlny, tedy stlačování a rozpínání ve směru šíření, se šíří v kapalném prostředí, platí  $v_p \doteq \sqrt{E/\rho}$ , kde  $E$  je Youngův modul pružnosti a  $\rho$  hustota.



Obr. 2<sup>2</sup>

Další možností je vytváření modelů vnitřní stavby Měsíce na základě teoretických výpočtů a jejich konfrontace s pozorovanými změnami od sférického tvaru, či koeficientu momentu setrvačnosti měsíčního tělesa, dosahujícího  $K = 0,394$ . Připomínáme, že u homogenní koule je  $K = 0,400$ . Pro porovnání Země má  $K = 0,331$ , u obřích plyných planet leží  $K$  v intervalu 0,21–0,25. U Slunce, jehož hmotnost je soustředěna v centrální části, je  $K = 0,08$ .

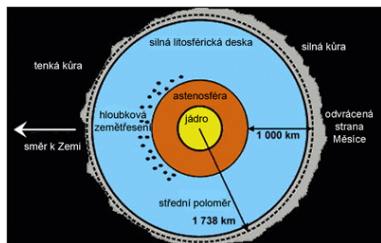
Vnitřní jádro Měsíce o poloměru 240 km je tuhé, složené převážně ze železa s příměsí lehkých slitin. To dosvědčuje, že po jeho vzniku došlo k diferenciaci hornin podle hustoty. Před 4,2 miliardami let měl Měsíc silné magnetické pole, tudíž železné jádro o poloměru asi 350 km bylo tekuté.

Vnější jádro o tloušťce asi 90 km je kapalné, železné. Nad ním se nachází přechodová vrstva o tloušťce 150 km a průměrné teplotě 1 650 K. Do

<sup>2</sup>Zdroj: [www.astro.washington.edu/users/nms/teaching/a150winter2013/slides/102-Moon.pdf](http://www.astro.washington.edu/users/nms/teaching/a150winter2013/slides/102-Moon.pdf)

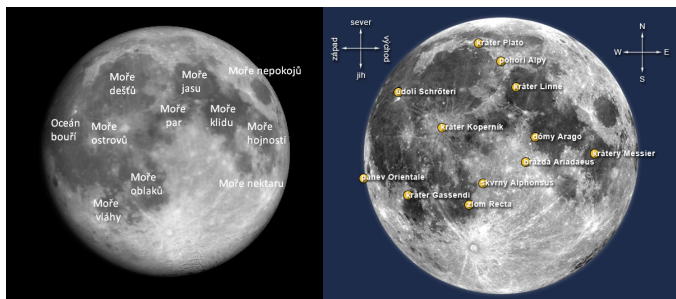


vzdálenosti zhruba 750 km od středu se sahá spodní plášť – astenosféra, tvořená horninami v tekutém plastickém stavu. Po ní se pohybují litosférické desky horního pláště, nesoucí měsíční povrchovou kůru. Stavba nitra Měsíce je zachycena na obr. 3.



Obr. 3<sup>3</sup>

Pánve měsíčních moří vznikly v intervalu 4–3 miliardy let. Stáří jednotlivých moří na povrchu Měsíce je mírně odlišné. Příkladně k nejstarším patří Moře jasu (3,75 miliardy let), k nejmladším Moře nepokojů (3,22 miliardy let) (obr. 4). Jedním z nejstarších útvarů na Měsíci je pohoří Apenniny (3,85 miliardy let). Výpravy Apollo 11, 12, 14, 16 a 17 dovezly horniny, jejichž stáří leží v intervalu 3,5–4,5 miliardy let.



Obr. 4<sup>4</sup>

Jak vznikly moře na Měsíci? Jde o prohlubně zaplněné vychladlou lávou. Moře pravděpodobně vznikla jako výsledek dopadu na Měsíc těles o průměru menším než 200 km rychlostí řádově  $8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Tento proces probíhal v období tzv. velkého bombardování, v období vymezeném výše.

<sup>3</sup>Zdroj: [www.astronomia.zcu.cz/planety/země/1957-stavba-nitra-mesice](http://www.astronomia.zcu.cz/planety/země/1957-stavba-nitra-mesice)

<sup>4</sup>Zdroje: [mladez.astro.cz/upload/clanky/nocni-obloha/minimum\\_o\\_hvezdach/obr.24-mesicni\\_more.jpg](http://mladez.astro.cz/upload/clanky/nocni-obloha/minimum_o_hvezdach/obr.24-mesicni_more.jpg) a <http://mesic.astronomie.cz/pruvodce-po-mesici.htm>

Dále stručně objasníme vznik fází Měsíce, což lze spojit s pozorováními žáků.

Základním úkazem, který je znám od starověku, je střídání měsíčních fází (obr. 5). Přesnější definice matematickým vztahem uvádí, že fáze  $\Psi = a/d$ , kde  $a$  je největší šířka osvětlené části disku Měsíce, jehož průměr je  $d$ . Polovina Měsíce je Sluncem vždy osvětlována, ale pozorovaná ze Země osvětlená část se mění. Proměna fází probíhá v důsledku změn polohy Měsíce vzhledem k Slunci. Lunární Měsíc začíná neviditelným novem. O několik nocí později se objevuje na západní obloze krátce po západu Slunce zahnutý srpek Měsíce, vypuklou částí vpravo. Následně o hodinu či dvě později po západu Slunce, zapadá i Měsíc. V průběhu dalších nocí srpek postupně dorůstá tak, jak se hranice světla a stínu posunuje po měsíčním disku. Asi týden po novu dosahuje první čtvrti, kdy zasahuje osvětlená plocha zhruba polovinu viditelného povrchu Měsíce. Po dvou týdnech od počátku zahltí světlo celou přivrácenou stranu Měsíce. Jelikož je Slunce naproti, vychází úplňkový Měsíc těsně po západu Slunce na východě, je vidět po celou noc, a zapadá při východu Slunce. Poté Měsíc ubývá a mizí.



Obr. 5<sup>5</sup>

Astronomové rozeznávají více časových měsíců (synodický, siderický, anomalistický, drakonický). Z hlediska pozorování je důležitý synodický, odpovídající době oběhu Měsíce vzhledem k Slunci. V jeho průběhu se vystřídají všechny měsíční fáze, trvá přibližně 29,5 dne. Měsíc se v důsledku oběhu posunuje východně při pozorování ze Země přibližně o  $\frac{360^\circ}{27,3} = 13,2^\circ$  za den, trochu více než  $0,5^\circ$  za hodinu vůči hvězdám. Připomínáme, že hodnota 27,3 dne je periodou měsíčního pohybu okolo Země s ohledem na postavení hvězd, tzv. hvězdný (siderický) měsíc.

Popisovali jsme pohyb Měsíce po obloze. Je třeba dodat, že na pozadí hvězd se přemísťuje východním směrem, každodenně však zapadá na západní části oblohy. Důvodem je skutečnost, že úhlová rychlost pozorované

<sup>5</sup>Zdroj: [www.sirrah.troja.mff.cuni.cz/~puda/ulohy/dipl-pp/04htm](http://www.sirrah.troja.mff.cuni.cz/~puda/ulohy/dipl-pp/04htm)

rotace světové sféry vyvolaná rotací Země je větší než úhlová rychlost pohybu Měsíce po dráze kolem Země.

Vystupuje nad horizont na vyšší úhlovou výšku Slunce nebo Měsíc? Vzhledem ke sklonu dráhové roviny Měsíce k ekliptice, je jeho maximální výška (v horní kulminaci) v každém místě Země o  $5^{\circ}9'$  výše než maximální výška Slunce. Minimální výška Měsíce v horní kulminaci bude menší než u Slunce o  $5^{\circ}9'$ .

Přejděme zpět k pozorování. Měsíc vychází stále později. Sledujeme východ Měsíce během úplňku těsně po západu Slunce. Při dalším východu zjišťujeme, že se posunul východně. Všechna pozorování lze provádět pouhým okem, žáci mohou svá sledování Měsíce v jednotlivých fázích zachytit kresbou. Tak lze v průběhu 29,5 dne získat příkladně sbírku osmi kreseb vývoje měsíčního vzhledu.

Pozorování můžeme rozdělit do tří etap. V první etapě, pozorování pouhým okem, žáci zakreslují na papír zvláštnosti pozorovaného pohybu Měsíce po obloze. Sledují proměnu fází Měsíce srovnáním kreseb každé 3 až 4 dny. Současně zachycují změnu polohy mezi hvězdami v souhvězdích.

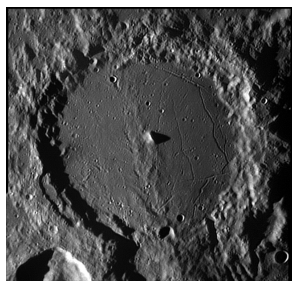
Druhá etapa, pozorování menším dalekohledem s třicetinasobným zvětšením ( $Z = 30$ ), umožní žákům zakreslení hlavních detailů přivrácené polokoule Měsíce a provedení jejich ztotožnění s objekty na mapě, případně identifikované fotografii. Lze využít podrobného výkladu v [12], či interaktivní mapy [13]. Žáci zakreslí a identifikují objekty: Oceán bouří, Moře dešťů, Moře jasu, Moře klidu, Moře hojnosti, krátery Tycho, Kepler, Koperník, Aristarchos (obr. 4).

Jednotlivé detaily lze sledovat větším dalekohledem ( $Z = 70\text{--}120$ ) ve třetí etapě. Vhodné je rovněž provedení odhadu nejmenšího rozměru detailu sledovatelného dalekohledem na povrchu Měsíce.

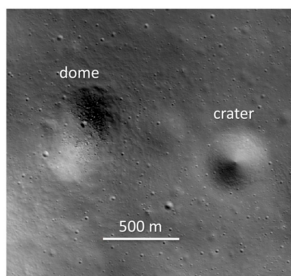
S problematikou pozorování je spjata otázka, jaká je velikost útvarů, jež můžeme na Měsíci pozorovat lidským zrakem, jestliže noční rozlišovací schopnost lidského oka činí asi  $1'$ ? Rozlišovací schopnosti  $1'$  odpovídá úhel  $\alpha = 2,9 \cdot 10^{-4}$  rad, proto lze z průměrné vzdálenosti Měsíce od Země  $r = 3,84 \cdot 10^8$  m pozorovat útvary o velikosti  $d = \alpha r \doteq 110$  km.

Na přivrácené polokouli Měsíce činí plocha tmavých moří 31 %, na odvrácené pouhá 2 %. Odlišný vzhledu polokoulí je objasňován rozdílnou tloušťkou měsíční kůry, která je větší na odvrácené straně, zhruba 100 km, zatímco na přivrácené asi 40 km. Proto se žhavé magma na přivrácené straně z pláště dostalo na povrch snadněji. Proč však je tloušťka kůry na obou polokoulích Měsíce rozdílná, není dosud vyjasněno.

Na povrchu Měsíce pozorujeme velké množství kráterů. V převážné většině vznikly impaktním způsobem, pouze výjimečně jde o menší vulkanické krátery. Na mořích se zpravidla nachází mladší krátery, zatímco v pohorích jde o krátery staré. Příkladem impaktního kráteru je kráter Alphonsus (obr. 6), ukázka vulkanicky vzniklého kráteru (obr. 7).

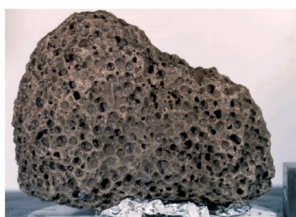


Obr. 6<sup>6</sup>



Obr. 7<sup>7</sup>

Procesy formující povrch Měsíc jsou jiné než na Zemi, erozivní procesy probíhají dlouhodobě podstatně pomaleji než na Zemi. Na povrchu Měsíce se nalézá prach a porézní hornina zvaná regolit. Vyskytují se dva druhy hornin: výlečná magmatická čedičová hornina – *basalt* (obr. 8) a stmelená hornina vzniklá po nárazu impaktu – *brekie* (obr. 9).



Obr. 8<sup>8</sup>



Obr. 9<sup>9</sup>

Několikrát do roka pozorujeme popelavý svit Měsíce (obr. 10), ale jaký je jeho původ? Jde o odražené sluneční světlo od Země, především od oceánů, na temný povrch Měsíce. Jev jako první vyložil Leonardo da Vinci

<sup>6</sup>Zdroj: [www.damianpeach.com/lunar.htm](http://www.damianpeach.com/lunar.htm)

<sup>7</sup>Zdroj: [blogs.discovermagazine.com/badastronomy/2011/12/12/tiny-lunar-volcanoes/](http://blogs.discovermagazine.com/badastronomy/2011/12/12/tiny-lunar-volcanoes/)

<sup>8</sup>Zdroj: [www.astro.washington.edu/users/smith/Astro150/Labs/MoonRocks/images/15016\\_Big.jpg](http://www.astro.washington.edu/users/smith/Astro150/Labs/MoonRocks/images/15016_Big.jpg)

<sup>9</sup>Zdroj: [www.meteoritecollector.org/gallery/main.php?g2\\_itemId=5700](http://www.meteoritecollector.org/gallery/main.php?g2_itemId=5700)

(1452–1543), který v [14] uvedl: „Měsíc je neprůhledné a pevné těleso, a kdyby byl naopak průhledný, nepřijímal by světlo Slunce. Měsíc nemá světlo sám od sebe, ale Slunce osvětluje takovou jeho část, jakou vidí. Z této zářící části vidíme tolik, kolik ona vidí z nás. A jeho noc přijímá tolik záře, kolik mu propůjčují naše vodstva tím, že mu odrážejí obraz Slunce, který se zrcadlí ve všech (vodách), jež vidí Slunce a Lunu. Měsíc je studený a vlhký.“ Z Codexu Leicaster pochází obr. 11.



Obr. 10<sup>10</sup>



Obr. 11<sup>11</sup>

Rozeberme jev podrobněji při současných astronomických znalostech. Disk Země pozorovaný z povrchu Měsíce je 13,5krát větší než disk měsíční na obloze pozemské. Albedo Země (0,367) je asi 5krát větší než měsíční (0,073), proto Země osvětluje měsíční povrch asi 68krát více. S tím souvisí otázka, v jaké čtvrti Měsíc více osvětluje Zemi, v první nebo v třetí? Ze snímku na obr. 12 je zřejmé, že na pravé části povrchu Měsíce je méně moří, proto odráží sluneční záření lépe než levá část.



Obr. 12<sup>12</sup>

<sup>10</sup>Zdroj: [home.zcu.cz/~smid/mesic/mesic.htm](http://home.zcu.cz/~smid/mesic/mesic.htm)

<sup>11</sup>Zdroj: [science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2005/04oct\\_leonardo/](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2005/04oct_leonardo/)

<sup>12</sup>Zdroj: [apod.nasa.gov/apod/image/0001/fm1222\\_gendler\\_big.jpg](http://apod.nasa.gov/apod/image/0001/fm1222_gendler_big.jpg)

## Závěr

Cílem článku bylo seznámení s vybranými fyzikálními a chemickými vlastnostmi Měsíce, zejména s jeho významem pro existenci a rozvoj života na Zemi. Posledně zmiňované si velmi dobře uvědomují v zahraničí, kde výuce problematiky Měsíce je věnována značná pozornost, viz [15], [16]. Vzhledem k snadné pozorovatelnosti Měsíce lze provést jednoduché sledování změn jeho fází a určit délku synodického měsíce.

## Literatura

- [1] *Hazard, C., Mackey, M. B., Shimmins, A. J.*: Investigation of the Radio Source 3C 273 by method of Lunar Occultations. *Nature* **197** (1963), s. 1037–1039.
- [2] *Franc, T.*: Vybrané gravitační jevy ve vesmíru a jejich přiblížení středoškolákům. Disertační práce, MFF UK, Praha, 2014.
- [3] *Jones, B., Lynch, P., Reesink, C.*: Children's conceptions of the Earth, Sun and Moon. *International Journal of Science Education* **9** (1987), s. 43–53.
- [4] *Nachtigall, D.*: Vorstellungen im Bereich der Mechanik. *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik/Chemie* **34** (1986), č. 13, s. 16–24.
- [5] *Domanski, J., Štefl, V.*: Strefy oddziaływania planet. *Fizyka w Szkole* **43** (1997), č. 1, s. 50–51.
- [6] *Kwast, T.*: Czy Księżyc jest satelitą Zemi? *Urania* 1977, č. 6, s. 167–171.
- [7] *Chebotarev, G. A.*: Gravitational spheres of the major planets, Moon and Sun. *Soviet Astronomy* **7** (1964), č. 5, s. 618–622.
- [8] *Grygar, J.*: Žeň objevů 2011. [cygnus.astro.sk/zne/zneXLVI2011A.html](http://cygnus.astro.sk/zne/zneXLVI2011A.html).
- [9] *Domanski, J., Štefl, V.*: Dlaczego Księżyc oddala się od Ziemi? *Fizyka w Szkole* **41** (1995), č. 2, s. 51–53.
- [10] *Hartmann, W. K., Davis, D. R.*: Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus* **24** (1975), s. 504–514.
- [11] *Cameron, A., Ward, W.*: The Origin of the Moon. *Lunar and Planetary Science* **7** (1976), s. 120–122.
- [12] *Gabzdyl, P.*: Měsíc. Aventinum, Praha, 2006.
- [13] <http://petdrhlik.webzdarma.cz/astro/zajimavosti/interaktivni-mapa-mesice.htm>.
- [14] *da Vinci, L.*: Codex Leicester. Firenze, 1504–1508.
- [15] *Benacchio, L.*: The Importance of the Moon teaching astronomy. In: *Earth, Moon and Planets* 85–86, Kluwer Academic Publishers, 2001, s. 51–60.
- [16] *Trumper, R.*: Teaching future teachers basic astronomy concepts—Sun–Earth–Moon relative movements—at a time of reform in science education. *Research in Science & Technological Education* **24** (2006), s. 85–109.