



## Několik postřehů k výuce astronomie

Jan Novotný<sup>1</sup>, Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity v Brně

Upozorňujeme na některé mylné představy o astronomických jevech, se kterými se mohou středoškoláci setkat v učebnicích, v tisku a v literatuře.

### Úvod

Nejsem asi jediný, kdo si povšiml výrazného kontrastu mezi poměrně širokým zájmem o astronomii a chatrností znalostí o základních astronomických jevech. Aspoň několik příkladů:

„*Jaké teplo musí být v té Austrálii, když tam i o vánocích kvetou stromy!*“ řekla mi kdysi knihovnice nad pohlednicí, kterou jí někdo od protinožců poslal. Jindy jsem ve vlaku vyslechl rozhovor teenagerů, kteří od zasvěcené diskuse o počítačích přešli k tomu, že rádi lyžují a vůbec by jim proto nevadilo, kdyby Země neobíhala kolem Slunce po elipse, ale po kružnici.

Když se 27. srpna 2003 dostal Mars do největší blízkosti Země za asi 70 000 let, obléhaly hvězdárny davy zájemců a bylo obtížné jim vymluvit, že o nic nepříjdou, když se podívají do dalekohledu o pár dní později. Mnozí si patrně představovali, že planeta po nebi jen profrčí a zítra už bude daleko. Od té doby jsem čas od času dostával dotaz, zda vím o podivuhodném astronomickém jevu, který se blíží: Mars bude v jistou hodinu jistého dne na nebi velký jako Měsíc! Jednou jsem to dokonce viděl v novinách i s fotografií a nebylo to na apríla. Jako reakce se na internetu objevovaly osvětově laděné snahy uvést věc na pravou míru. Jejich autoři někdy operovali katastrofálními přílivy, které by taková blízkost planety způsobila, v tom případě však často zapomínali, že slapové síly neubývají s kvadrátem, ale s třetí mocninou vzdálenosti.

Když bylo v březnu 2004 možno večer spatřit jediným pohledem pět viditelných planet, vyzýval jsem kamarádku, aby se na to nezapomněla podívat. „*Já jsem si už včera všimla, jak zapadala Severka*“, byla její vstřícná reakce.

Základní poučení o astronomických jevech je tedy žádoucí a vděčná složka školské výuky. Bohužel při malých časových dotacích věnovaných fyzice se na ni často nedostane. Já bych však zde rád uvedl několik výrazných příkladů, kdy jsou astronomické jevy tradičně vysvětlovány způsobem, který je fakticky uspokojivě nevysvětluje. S takovými výklady se setkáváme nejen v novinách či na internetu, ale někdy je podávají i velmi věrohodní autoři. Není proto divu, že pronikají i do středoškolských učebnic.

### Lucie noci upije

...ale dne nepřidá, říká známé rčení. Jevu, ke kterému odkazuji, jsem si povšiml již jako školák. Nerad jsem opouštěl lůžko za tmy a těšil jsem se, že až po Novém roce skončí vánoční prázdniny, bude už vstávání příjemnější. Vypozoroval jsem však, že právě v tuto dobu je ráno tma nejdéle – dne začíná ráno přibývat až od této chvíle. Jiní lidé si spíše povšimnou, že od půli prosince začíná upíjení noci (západ slunce nastává stále později). Jako bychom tedy neměli jen jediný zimní slunovrat, ale slunovraty dva – večerní před polovinou prosince a ranní po Novém roce. Proč tomu tak je? Touto otázkou se často zabývají noviny před vánocemi.

Problém mi kdysi pomohla vyřešit astronomická učebnice [1], kterou jsem dostal jako úspěšný řešitel matematické olympiády. Ve škole se o tom nemluvílo a nebylo to ani v učebnici fyziky. Myslím, že jev „rozštěpení slunovratu“, který může každý pozorovat, si místo ve středoškolských učebnicích zaslouží, a potěšilo mě, když se objevil i v nejnovější (výborné) učebnici fyziky [2].

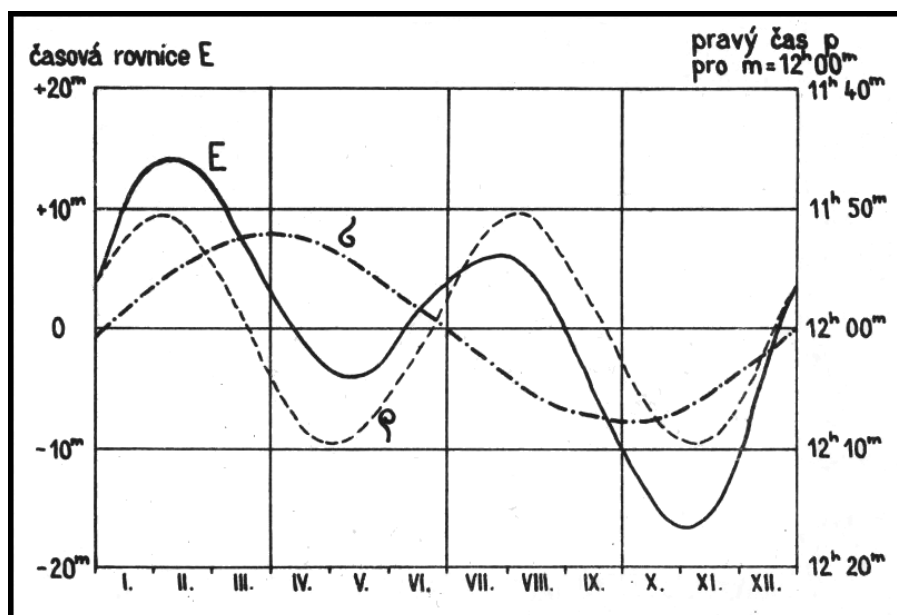
Podává se tu výklad, na který se většinou omezují i noviny a internetové texty. Nazval bych jej „keplerovským“: Země obíhá po elipse, tudíž s proměnnou rychlostí, délka pravého slunečního dne proto kolísá a tento den se posouvá vůči občanskému dni odpovídajícímu fyzikálnímu rovnoměrně plynoucímu času.

<sup>1</sup> novotny@physics.muni.cz

Z učebnice se dovídáme i některé detaily: uprostřed časového pásma splývá sluneční a občanské poledne čtyřikrát do roka, v přísluní je pravý sluneční den (doba mezi kulminacemi Slunce) asi o čtvrt minuty delší než v odsluní.

Představme si však, že se najde zvědavý žák, který si chce porovnat keplerovskou teorii s realitou. Bude mu asi divné, proč se sluneční a občanské poledne shodují do roka čtyřikrát a ne jen dvakrát. A proč nedochází k rozštěpení slunovratů také v blízkosti odsluní? Třeba tento žák sáhne po hvězdářské ročence, kterou lze dnes najít i na internetu. Sledování dob západů a východů slunce ho dovede k závěru, který je pro keplerovskou teorii fatální. Není pravda, že nejdelší pravý sluneční den je v přísluní a nejkratší v odsluní. Nejdelší je v okolí zimního slunovratu, v okolí letního slunovratu má lokální maximum a zhruba stejná minima má v okolí rovnodenností. Slunovrat se, i když méně nápadně, štěpí i v létě, ale opačně, než by měl podle keplerovské teorie – ranní slunovrat o několik dní předchází večernímu.

Pro znalce to samozřejmě není záhada – délku slunečního dne neovlivňuje jen keplerovská složka, ale i složka, kterou bych nazval „tropickou“, během roku proměnný sklon zemské osy vzhledem ke spojnici Země se Sluncem. Pohled na „časovou rovnici“ vyjadřující graficky vztah mezi slunečním a občanským časem během roku ukazuje, že tato složka je primární, keplerovská složka ji pouze modifikuje.



Obr. 1 – převzato z BUCHAR, Emil. Geodetická astronomie I., Praha: SNTL, 1963.

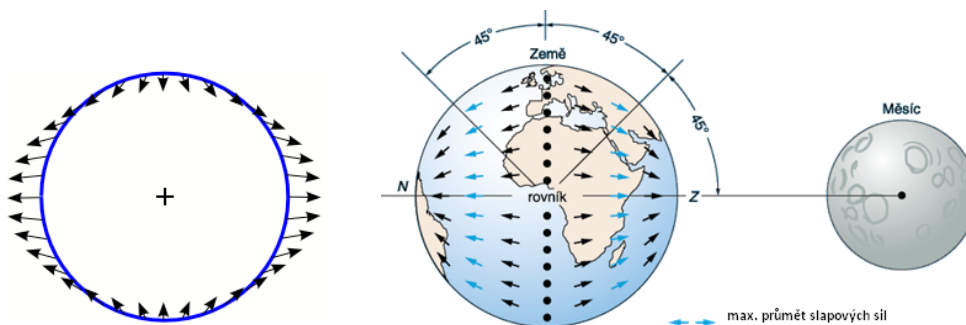
Argument pro běžné zamlčování tropické složky je patrně jediný – vysvětluje se hůře než složka keplerovská. Na toto zamlčování ovšem doplatíme tím, že jsme základní rysy jevu nevysvětlili. Zejména však chybně stanovíme doby, v nichž vliv časové rovnice neuniká pozornosti běžného člověka – tyto doby nejsou vázány na přísluní a odsluní, ale na slunovraty. Pouze v okolí extrémů délky „bílých dnů“ (od východu Slunce k jeho západu), k nimž jsme pochopitelně citliví, se může malý posun daný časovou rovnicí zřetelně projevit. Tak by tomu bylo i v případě, že by se přísluní a odsluní zhruba krylo nikoliv se slunovraty, ale s rovnodennostmi (jak tomu ostatně v dlouhodobé historii Země už bývalo a zase bude).

Jestliže jsme se už tedy rozhodli o „rozštěpení slunovratů“ vykládat, neměli bychom tajit, že omezení se na keplerovskou složku k vysvětlení jeho podstatných rysů nestačí. Kdybych užíval zde uvedené učebnice, vyzval bych žáky, aby si její keplerovský výklad porovnali s hvězdářskou ročenkou a zamysleli se nad nesrovnalostmi.

## Nešťastná mořská dmutí

Časová shoda bouře a úplňku málem zmařila Caesarovu první výpravu do Británie, když přišel o část nedbale zakotvených lodí. Jak říká ve svých pamětech [3]: „*Náhodou byl té noci také úplněk. V tu dobu bývá v oceánu největší vlnobítí. To bylo našim neznámo.*“

Mořská dmutí nepřinesla štěstí ani Galileimu, který v nich hledal v poslední den svého Dialogu [4] rozhodující důkaz pohybu Země. Neměl však dostatek fyzikálních znalostí ani matematických prostředků, aby svou teorii jasně formuloval, určil její důsledky a porovnal je s realitou. Dnes bychom mu asi připsali snahu vyložit dmutí pouze působením setrvačných sil, bez přihlídnutí ke gravitačnímu zákonu. Předpovědi takové teorie by se bohužel naprosto rozcházely s realitou. Rozhodující argument pro heliocentrismus tedy Galilei nepodal, což také obvykle v učebnicích nenajdeme.



Obr. 2 – zdroj: <http://en.wikipedia.org/wiki/Tides>

Hledá-li zájemce dnešní vysvětlení dmutí, narazí patrně s nadpoloviční pravděpodobností na výklad pomocí bilance mezi silou gravitační a odstředivou. Velmi sugestivně je podán ve Feynmanových lekcích [5]. Země obíhá kolem společného středu hmotnosti soustavy Země–Měsíc. Proto masy vod na odvrácené straně jsou odstředivou silou odpuzovány více než střed Země, který je přitažlivostí Měsíce udržován v rovnováze. Naopak na přivrácené straně Měsíc vody přitahuje silněji, ale odstředivá síla je tu menší. Podobná úvaha se pak provádí i pro působení Slunce, které je menší a posiluje působení Měsíce jen v úplňku či v novu.

Potíž „odstředivé“ teorie se ukáže, když příslušné síly vypočteme. Uvidíme především, že prostorová proměnnost odstředivé síly má mnohem větší vliv než prostorová proměnnost gravitačního působení Měsíce. Jedině významným výsledkem složení sil je odstředivá síla vzniklá otáčením Země kolem své osy s měsíční periodou. Ta je mnohem větší než síla skutečně působící přílivy a odlivy. Ani poměr vlivu Měsíce a Slunce nepodává odstředivá teorie správně.

Tato teorie je zvláště oblíbená v učebnicích geografie. V době vlády marxistické dialektiky si někteří zeměpisci dokonce přičítali zásluhu, že tento jejich výklad vysvětluje dmutí „dialekticky“ jako výsledek boje protikladů, zatímco původní Newtonovo vysvětlení je „metafyzické“.

Důvod rozporu odstředivé teorie s realitou je prostý. Příslušná síla skutečně existuje, ale je součástí odstředivé síly, která vzniká časově neproměnným otáčením Země. Tím je způsobeno její trvalé zploštění, ale nikoliv časově proměnná mořská dmutí. Pro jejich určení musíme skládat měsíční (a podobně i sluneční) gravitaci se setrvačnou silou, která vzniká obíháním Země kolem společného hmotného středu bez rotace. Její pole je homogenní, nemění se v prostoru a ruší se s měsíční gravitací ve středu Země. Co zbývá, je vliv nehomogenity pole Měsíce (a Slunce), tedy slapová síla.

Současné u nás nejpoužívanější středoškolská učebnice [6] se odstředivé teorie nedovolává a spojuje dmutí s tím, že vody na straně přivrácené k Měsíci podléhají většímu zrychlení než vody na straně odvrácené. Ani toto vysvětlení však neuspokojí. Proč potom nepozorujeme přílivy a odlivy i v púllitru či v rybníce?

Tekutiny se zde pod vlivem slapových sil nepředbíhají ani nezpožďují za Zemí, protože jim v tom brání zemská gravitace. Abychom skutečně vysvětlili pohyb vod pod vlivem slapových sil, nestačí se omezit na přivrácenou a odvrácenou stranu. Slapové síly zde vody pouze nadlehčují, ale neuvádějí je do pohybu. Musíme si nakreslit pole slapových sil na celém povrchu Země, resp. aspoň na jejím průřezu. Do odvrácených a přivrácených míst musí vody přitékat odjinud.

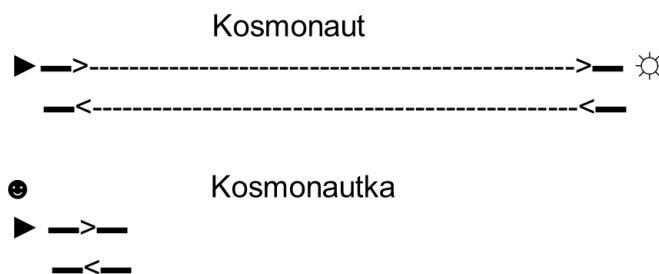
## Dvojčata a relativita

Patří to ještě do astronomie? Nebál bych se říci, že ano, protože o relativistickém paradoxu hodin či dvojčat se nejčastěji mluví v souvislosti s lety ke vzdáleným hvězdám či galaxiím, jak nám je líčí autoři science fiction.

Ani nejjednodušší výklad speciální teorie relativity se neobejde bez dilatace času a zvídaví žáci nám pak stěží dovolí se pohodlně omezit na setrvačné pohyby a inerciální soustavy. Jak to bude s kosmonautem, který poletí ke vzdálené hvězdě, obrátí u ní směr svého letu a vrátí se zpět? Můžeme sice předpokládat, že let byl dlouhý a dobu manévru prováděných se zrychlením lze oproti inerciálním fázím zanedbat, ale což nelze totéž provést i z hlediska kosmonauta? Jak tedy můžeme tvrdit, že právě on bude po návratu mladší než dvojče, které zůstalo na Zemi?

Nechceme-li se problému vyhnout – a zvídaví žáci nám to asi nedovolí –, můžeme se odvolat na zjevnou asymetrii mezi kosmickým a pozemským dvojčetem. Kosmonaut musel prožít neinerciální fáze letu. „*Kosmická loď letící k daleké hvězdě musí nejprve odstartovat, u hvězdy se zastavit, a opět se vrátit zpět, při tom se pohybuje zrychleně, a proto není inerciální vztažnou soustavou.*“ [7] Názorně řečeno, v době, kdy kosmonaut startoval, přistával, nebo obracel chod své rakety, v ní „padaly kufry“.

Existuje ale zajímavá námitka, kterou jsem slyšel od jednoho z „popěračů“ teorie relativity. Představme si, že kosmické dvojče je na cestě vyprovázeno sourozencem v jeho vlastní lodi. Když cestovatel nabude velké rychlosti, kterou bude nadále setrvačně pokračovat, sourozenec mu zamává a vrátí se na Zem, přičemž přesně kopíruje manévr, kterým obrátí směr letu kosmonaut u vzdálené hvězdy. Oba sourozenci prožijí naprosto stejné zrychlené fáze letu. Kde je potom rozdíl?



Další problém svádění problému na zrychlenou fázi je v tom, že se zdá naznačovat, že úplný a přesný relativistický vzorec pro dilataci času by měl zahrnout i vliv zrychlení. V knihách (např. [8]) se ale dočítáme, že ani obrovská zrychlení nemají na chod hodin pozorovatelný vliv.

Nechceme-li se odvolávat na geometrii čtyřrozměrného prostoročasu ani na fyziku v neinerciálních soustavách, můžeme vůbec neodbytného žáka uspokojit? Taková možnost přece jen existuje. Představme si, že kosmonaut a pozemšťan se neustále navzájem pozorují. Na první pohled by se zdálo, že si tím nepomůžeme, protože i pozorování jsou symetrická – při vzdalování vidí oba červený, při přibližování modrý posuv spekter. Rozdíl je však v době, po kterou to vidí. Kosmonaut vidí změnu červeného posuvu na modrý v půli svého letu, pozemšťan až ke konci svého pozorování, protože v době, kdy vidí své dvojče obracet loď, ono se k němu již dávno rychlostí blízkou rychlosti světla přibližovalo.

Toto „dopplerovské“ vysvětlení asymetrie může být velmi chytrému a zvídavému žákovi dokonce předvedeno ve formě přesného výpočtu – odvození relativistického vztahu pro Dopplerův posuv nevyžaduje nic víc než klasický Dopplerův jev plus dilataci času.

## Závěr

Všechny tři předvedené ukázky mají cosi společného. Zdánlivě uspokojivé jednoduché vysvětlení neobstojí před kritikou – někdy je zcela chybné, jindy má svá úskalí. Vzniká tak problém: mluvit o tom vůbec, přiznat, že na úrovni posluchačů věc vysvětlit neumíme, nebo se pokusit o vysvětlení, které je obtížnější, ale před kritikou obstojí? Nemůže být povrchní a neuspokojivý výklad dokonce východiskem k tomu, abychom v žácích probudili hlubší zájem? To je jistě důstojný námět k přemýšlení.

## Dedikace

Článek vznikl v rámci projektu CZ.1.07/2.2.00/28.0182 „Moduly jako prostředek inovace v integraci výuky moderní fyziky a chemie“ řešeného na Pedagogické fakultě Masarykovy univerzity a Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého.

## Literatura

- [1] GUTH, Vladimír, LINK, František, MOHR, Josef Mikuláš, ŠTERNBERK, Bohumil. *Astronomie I*. Praha: ČAV, 1954, 35–40.
- [2] RAUNER, Karel, HAVEL, Václav, RANDA, Miroslav. *Fyzika 9*. Plzeň: Nakladatelství Fraus, 2007, 121–122.
- [3] CAESAR, Gaius Julius. *Válečné paměti*. Praha: Svoboda, 1972, 128–129.
- [4] GALILEI, Galileo. *Dialóg o dvoch systémoch sveta*. Bratislava: SAV, 1962, 410–454.
- [5] FEYNMAN, Richard Phillips, LEIGHTON, Robert B., SANDS, Matthew Linzee. *Feynmanovskije lekcie po fizike, sv. I*. Moskva: Mir, 1976, 129–130.
- [6] MACHÁČEK, Martin. *Fyzika pro gymnázia. Astrofyzika*. Praha: Prometheus, 2004, 42–43.
- [7] BARTUŠKA, Karel. *Fyzika pro gymnázia. Speciální teorie relativity*. Praha: Prometheus, 2001, 30.
- [8] HORSKÝ, Jan, NOVOTNÝ, Jan, ŠTEFANÍK, Milan. *Mechanika ve fyzice*. Praha: Academia, 2002, 278–279.