

Využití animací letů kosmických sond ve výuce fyziky

TOMÁŠ FRANČ

Matematicko-fyzikální fakulta UK, Praha

Zajímavým oživením hodin fyziky jsou lety kosmických sond, o kterých žáci gymnázií příliš mnoho nevědí. Jak se ukazuje z právě probíhajícího výzkumu některých znalostí středoškolských žáků o letech kosmických sond, žáci například netuší, že k letu se téměř vůbec nepoužívají motory a že se sonda po opuštění gravitačního pole Země pohybuje jen díky setrvačnosti v gravitačním poli Slunce a že pokud neuniká ze sluneční soustavy, pak je její trajektorii část elipsy. Výzkum rovněž ukazuje častou představu žáků, že sondy ve sluneční soustavě létají po úsečkách, protože to je nejkratší spojnice dvou bodů. (Jde pouze o předběžné výsledky výzkumu, který se teprve bude vyhodnocovat, podrobné výsledky se poté budou publikovat). Animace letů kosmických sond mohou pomoci tyto mylné představy žáků odstranit. Nejspíše jsou tyto miskoncepce způsobené tím, že žáci nikdy před tím žádnou takovou animaci letu vesmírné sondy neviděli (a dále samozřejmě i tím, že i když se žáci při probírání Keplerových zákonů dozvědí, že tyto zákony platí pro všechna tělesa sluneční soustavy, tak je nenapadne, že to platí i pro člověkem vyrobené sondy). Nami vytvořené animace byly zveřejněny na *Wolfram Demonstrations Project* [1] v anglické podobě a dále na internetových stránkách autora [2] s ovládacími prvky v češtině. V tomto článku stručně představíme portál *Wolfram Demonstrations Project* a především se seznámíme se základními možnostmi využití animací ve výuce fyziky a rovněž s ovládáním animací.

Wolfram Demonstrations Project

Wolfram Demonstrations Project je internetový portál, kde si lze zdarma přehrát či stáhnout zveřejněné animace. V únoru 2014 se zde nachází necelých 10 000 interaktivních demonstrací, z toho je 2 020 fyzikálních a 166 astronomických. K přehrání demonstrací je potřeba mít v počítači nain-

stalovaný *Wolfram CDF Player*, který je zdarma ke stažení na adrese [3] (nebo lze animace samozřejmě přehrát pomocí programu, ve kterém byly vytvořeny, tedy *Wolfram Mathematica*). U každé jednotlivé animace je navíc k dispozici kód, který si může uživatel vložit do svých internetových stránek, čímž se animace stane součástí jeho stránek. Dále je možné stáhnout zdrojový kód animace, a pokud vlastníme *Wolfram Mathematica*, lze si kód upravit podle svých potřeb (změnit barvy, počestit ovládací prvky atd.). I když je *Wolfram CDF Player* zdarma, tak zachovává všechny funkce programu *Wolfram Mathematica* nutné pro přehrání animace, např. stále lze 3D grafiku přibližovat či oddalovat, různé otáčet a posouvat, nejde však dělat změny ve zdrojovém kódu.

Při vytvoření vlastní animace v programu *Wolfram Mathematica* je možné ji na *Wolfram Demonstrations Project* zveřejnit, animace však musí nejprve projít kontrolou, zda je animace fyzikálně správná. Tím je zajištěna vysoká kvalita animací na tomto portálu.

Wolfram Demonstration Project tedy představuje velký zdroj fyzikálních animací a další animace každý týden přibývají.

Animace letů vesmírných sond

Animace lze nalézt jednak na [1] (anglicky) a rovněž na [2], kde jsou animace v české verzi (a anglické verzi také). Součástí stránek [2] je návod, jakým způsobem byly animace vytvořeny. Způsob vytvoření zde popisovat nebudeme, pouze uvedme, že souřadnice planet, komet, planetek a sond byly získány ze stránek [4], takže nejde o přibližné souřadnice, ale o reálné souřadnice poskytnutých NASA. Všechny animace je možné sledovat jak ve 2D, tak i ve 3D zobrazení (některé žáky ve 3D zobrazení navíc překvapí, že planety vlastně neobíhají v jedné rovině kolem Slunce). Pod animací je zobrazeno datum (bohužel jsou zkratky měsíců anglicky, to by však nemělo činit žákům problémy) a rychlost sondy v kilometrech za sekundu vzhledem ke Slunci.

Gravitační manévry

Při vytváření animací letů sond jsme vybírali sondy, při jejichž letu byla využita technika *gravitačního manévru*. To je manévry, při které sonda vhodně obletí planetu a při tomto obletu se buď urychlí nebo zpomalí

vzhledem ke Slunci. Pro vysvětlení urychlení či zpomalení sondy vzhledem ke Slunci stačí zákon zachování (mechanické) energie – pokud se sonda urychlí (získá kinetickou energii), pak se planeta musí vůči Slunci zpomalit a naopak. Tato technika tedy vyžaduje přesné plánování, aby se sonda dostala do blízkosti planety, u které má využít gravitační manévru. Proto jsou tyto mise nesmírně zajímavé, obzvláště ty, které tuto techniku využily několikrát (velmi doporučujeme animace Voyager 2, Galileo, Cassini a především sondu MESSENGER, která techniku gravitačního manévru použila celkem šestkrát!). Je tedy velice působivé sledovat, jak sonda po několika měsících (a stovkách miliónů až několika miliardách kilometrů) skutečně k planetě doletí po různě komplikované trajektorii, která navíc byla přesně naplánovaná ještě před startem sondy!

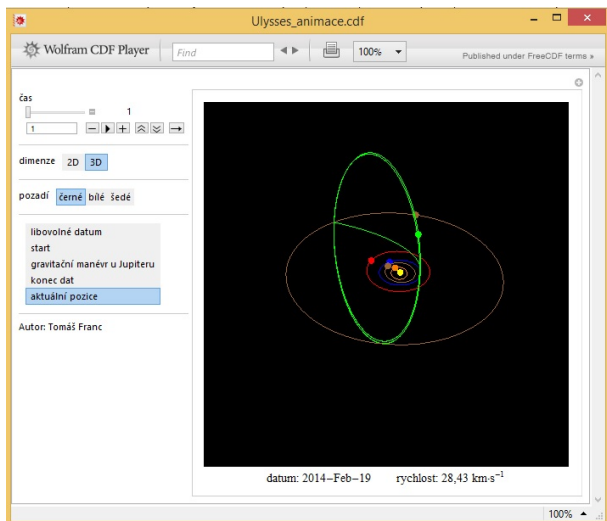
Seznam animací letů sond, které využily techniku gravitačního manévru (seřazeno podle data startu): Pioneer 10 a 11 (společně v jedné animaci), Voyager 1 a 2 (společně v jedné animaci), Galileo, Ulysses, NEAR Shoemaker, Cassini, Stardust-NEXT, Rosetta, MESSENGER, Deep Impact-EPOXI, New Horizons, Dawn, Juno. Celkem jde o 13 animací.

Proč se gravitační manévru používá? (1) Úspora paliva (je odhadnuto, že sonda Cassini díky gravitačním manévřům ušetřila 75 tun paliva, zatímco samotná sonda váží 5,5 tuny), (2) zkrácení času letu ke vzdáleným planetám (sonda Voyager 2 dolétla k Neptunu za 18 let, bez gravitačních manévřů by její let k této planetě trval 30 let), (3) lety k Merkuru či Slunci, neboť je potřeba sondu během letu zpomalit vůči Slunci, (4) únik ze sluneční soustavy (díky tomu tak ze sluneční soustavy unikají sondy Pioneer 10 i 11 a Voyager 1 i 2), (5) změna oběžné roviny kolem Slunce (této skutečnosti bylo využito zejména pro sondu Ulysses, která se po gravitačním manévru u Jupiteru dostala do roviny téměř kolmé na rovinu ekliptiky (obr. 1).

Využití animací ve výuce

Jako základní využití se přímo nabízí, že žáci (nejspíš vůbec poprvé) uvidí, jak vypadá let kosmické sondy, tvar trajektorie, průběh rychlosti (když se sonda dostává blíže k nějaké planetě, zrychluje vůči Slunci, když se od planety vzdaluje, zpomaluje vůči Slunci, je-li od planet daleko, rychlost se příliš nemění). V animaci lze kromě samotné sondy sledovat pohyby planet, komet a planetek. V případě planet není vůbec poznat, zda jde o elipsu nebo o kružnici, neboli lze pouhým pohledem „ověřit“ tvr-

zení 1. Keplerova zákona, že se planety pohybují kolem Slunce po elipsách málo odlišných od kružnic. Naopak trajektorie komet kružnice rozhodně nepřipomínají. Lze sledovat, jak s rostoucí vzdáleností od Slunce se rychlosti oběhu planet kolem Slunce zmenšují a stejně tak i rychlost sondy (neuvažujeme-li průlety kolem planet).



Obr. 1

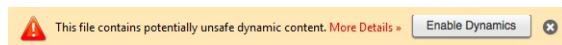
Gravitační manévry může sonda urychlit nebo zpomalit vůči Slunci. Která z těchto možností nastane, o tom rozhoduje způsob obletu planety – pokud sonda obletí planetu „za ní“, dojde k jejímu urychlení vůči Slunci a pokud naopak sonda obletí planetu „před ní“, sonda se vůči Slunci zpomalí. I tuto skutečnost lze v animacích sledovat. Gravitační manévry se používá mj. ke změně roviny oběhu sondy kolem Slunce – ve 3D zobrazení můžeme pozorovat, že ke změně roviny dochází v podstatě při každém gravitačním manévru a různým natáčením animace pak lze porovnávat rovinu oběhu sondy kolem Slunce s rovinami oběhů dalších těles v animaci.

Při sledování animací žáky může začít zajímat, jak vlastně gravitační manévry funguje, jak to, že se sonda může urychlit či zpomalit vůči Slunci. A stejně tak žáky napadne otázka, proč si při výkladu dává učitel dobrý pozor na to, aby nezapomněl uvést, že jde o změny rychlosti *vůči Slunci*. Pokud to nastane, pak má učitel vyhráno. Při vysvětlení je potřeba zákon zachování energie, volba vztažné soustavy, operace s vektory. Dále je

možné zmínit stavbu sondy, přístroje, kterými byla sonda vybavena, samotný start, komplikace letu, objevy sondy, ukázat fotografie, které sonda pořídila, jaké otázky mise zodpověděla a jaké naopak nastolila. Zejména vyhledání pěkných fotografií je vhodné dát jako domácí úkol, aby žáci připravili např. prezentace. Většina obrázků pochází od NASA, žáci tak budou vyhledávat na internetových stránkách, které jsou v angličtině (mezipředmětový vztah). Při probírání pohonu sondy a jejích přístrojů dojde navíc i na jadernou fyziku (radioaktivní rozpad), elektřinu (termoelektrický jev) a další obory fyziky, při studiu letů kosmických sond tak obsáhneme nejen kapitoly z mechaniky.

Ovládání animací

Pokud se při spouštění animace objeví varování podle obr. 2, pak se není třeba ničeho obávat, animace letů sond neobsahují žádný škodlivý obsah (je to pouze varování kvůli tomu, že animace obsahuje příkaz, který při spouštění rozbalí nějaký rozsáhlý text – aby soubory nebyly příliš velké, neboť obsahují velké množství souřadnic, byly souřadnice komprimovány a při spuštění animace dojde k převedení komprimovaného textu zpět na číselná data a chování programu *Wolfram CDF Player* je takové, že zobrazí varování vždy, když dochází k dekomprimaci).



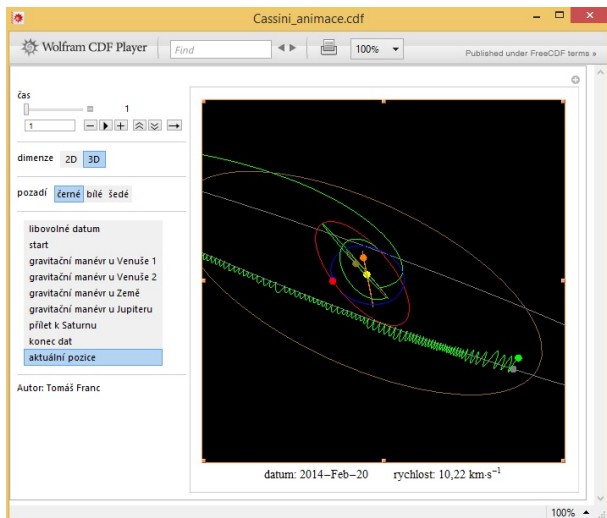
Obr. 2

Animace je možné zvětšovat či zmenšovat (bez ztráty kvality zobrazení) – jednak je vpravo dole v okně animace možná změna velikosti zobrazení v procentech (obr. 3), nebo je možné kliknout levým tlačítkem myši kamkoli na obrázek animace, čímž se animace oranžově orámuje (obr. 3) a po kliknutí levým tlačítkem myši na tento rámeček a následným tažením je možné animaci libovolně zvětšit či zmenšit.

Vzhledem k přehrávání animací v různých místnostech a na různých dataprojektorech může být výsledná projekce více či méně kontrastní, proto je možné měnit barvu pozadí (černé, šedé a bílé).

Ve 3D zobrazení lze animaci různě natáčet a dívat se na situaci z různých úhlů pohledu, přibližovat a oddalovat pomocí stisku klávesy CTRL a pohybu myši, nebo posouvat pomocí stisku klávesy SHIFT a pohybu

myši, takže např. u mise Cassini můžeme získat obr. 3, který pěkně ukazuje, jak tato sonda obíhá Saturn (a také je možné na obr. 3 názorně vidět, jak sonda po prvním gravitačním manévru u Venuše obíhala kolem Slunce v rovině oběhu Venuše kolem Slunce a po druhém gravitačním manévru tuto rovinu změnila).



Obr. 3

Pokud chceme animace automaticky přehrávat pomocí tlačítka *Play*, musíme mít nastavenou volbu „libovolné datum“. Ostatní volby umožňují přepnout zobrazení animace pouze na statický obrázek znázorňující pozice všech těles ve vybraný moment (např. přilet sonda k planetě).

Pokud daná mise dosud neskončila, pak je možné v animaci použít volbu „aktuální pozice“ a nechat si tak zobrazit aktuální pozice všech planet, samotné sondy (a případně dalších těles zahrnutých do animace).

V některých animacích je možné nechat si zobrazit vybrané komety či planetky, stejně jako je možné pro komplikované trajektorie sond nechat si zobrazit buď celou trajektorii sondy, nebo jen její část za posledních 500 dní letu (nebo naopak nenechat, aby nebylo v animaci příliš mnoho objektů a trajektorií).

V animacích může žákům připadat, že se sonda s planetou srazí, což samozřejmě není pravda. V některých animacích stačí přepnout 2D zobrazení na 3D (a vhodně obrázek natočit) a již je vidět, že sonda ve skutečnosti

planetu mívjí. Pokud by to stále působilo, že se sonda s planetou srazila a následně letěla dále, pak je nutné žáky upozornit, že v dané animaci používáme vhodné měřítko, abychom sondu a planety vůbec viděli, museli jsme použít k jejich znázornění body o velikosti, která neodpovídá měřítku animace – pro opravdu těsné průlety sond kolem planet by bylo nutné vytvořit samostatné animace jen pro tyto průlety (např. sonda Galileo při gravitačním manévru u Země dne 8. 12. 1992 se v okamžiku nejtěsnějšího přiblížení nacházela pouze 300 km! nad povrchem, zatímco 2D animace zobrazuje oblast zhruba 1,5 miliardy km \times 1,5 miliardy km).

Dále je nutné žákům zdůraznit, že nejde o žádné simulace, ale o skutečné trajektorie skutečných sond získané ze stránek NASA [4], neboť při přednáškách autora na toto téma zazněly názory, že „to sice vypadá hezky, ale stejně jde jen o simulaci, a tedy o nic reálného“, neboli žáci pod pojmem simulace vidí něco naprosto nereálného. Tyto animace však přesně ukazují reálné trajektorie vesmírných sond.

Animace letů kosmických sond mohou pomoci žákům získat správnou představu o trajektoriích sond, jejich rychlostech a rovněž i o trajektoriích planet, komet, planetek. Zajímavou volbou jsou lety, které využily techniku gravitačního manévru, neboť je nutné, aby se sonda k planetě, u které realizuje manévru, přiblížila. Zvláště pěkné jsou animace sond s komplikovanou trajektorií, zejména mise MESSENGER. Celkově jde o zajímavé oživení výuky, žáci navíc mohou začít sami od sebe klást otázky, jak vlastně gravitační manévru funguje, mohou se zajímat o další podrobnosti letu, což je hlavní cíl, proč byly takové animace vytvořeny.

Poděkování. Tento článek vznikl za podpory Grantové agentury Univerzity Karlovy (číslo projektu 341311). Dále děkujeme NASA za poskytnutí dat na adrese [4].

Literatura

- [1] Wolfram Demonstrations Project: <http://demonstrations.wolfram.com/>.
- [2] Tomáš Franc homepage: <http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~franc/>.
- [3] Wolfram CDF Player for Interactive Computable Document Format: <http://www.wolfram.com/cdf-player/>.
- [4] HORIZONS Web-Interface: <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>.