

Jak se kosmické sondy dostávají k Marsu?

Vladimír Štefl^{*}, Přírodovědecká fakulta MU, Brno

V současné době jsme svědky intenzivního průzkumu Marsu, jehož strategickým cílem je příprava budoucího přistání lidské posádky. Proto jsou v současné době získávány informace o fyzikálních a chemických podmínkách v atmosféře i na povrchu Marsu. K výsledkům získaným sondami se vrátíme v některém z dalších příspěvků. Cíl tohoto je jiný, odpovědět na otázku, jak se kosmické sondy k Marsu dostávají.

Jednoduchá novinářská odpověď[†] je nasnadě – po meziplanetárním letu, který trvá zpravidla osm až devět měsíců. Žákům základních a středních škol je však účelné podat hlubší fyzikální vysvětlení. Především je třeba objasnit principiální rozdílnost pohybu v meziplanetárním prostoru od pohybu v zemském ovzduší, který žáci znají z mechaniky či běžného občanského života. Stručně proto budeme základní rozdíly charakterizovat na jednoduchých příkladech.

První a nejpodstatnější odlišnost je v použití a spotřebě energie. Při letu v kosmickém prostoru téměř neexistuje odpor prostředí a spotřeba energie závisí prakticky pouze na směru startu ze Země a úpravách dráhy v meziplanetárním prostoru. Provedeme přibližné srovnání: U letu letadla zemskou atmosférou nezáleží na směru, kterým se pohybuje, spotřeba energie je stále stejná, za předpokladu konstantních podmínek v atmosféře^{**}. Naopak kosmické sondy vypouštěné ve směru pohybu Země kolem Slunce spotřebují přibližně 3krát méně energie než při vypouštění proti směru pohybu Země. Vzhledem k tomu, že planety včetně Země obíhají kolem Slunce ve stejném směru, většina klasických kosmických sond letící k jiným planetám se z tohoto důvodu pohybuje v tomto směru.

Nejvýhodnější meziplanetární dráhy z hlediska spotřeby energie jsou tzv. poloeliptické. Velké osy těchto drah procházejí Sluncem, které leží v jednom z ohnisek. Nejbližší bod této dráhy ke Slunci – perihélium, perihel, přísluní – je na dráze Země a odtud tedy sonda startuje; nejvzdálenější bod – afélium, afel, odsuní – je na dráze cílové planety (obr. 1). V praxi při letech kosmických sond jsou vybírány takové dráhy, které se málo liší od poloeliptických. Malá chyba ve startovací rychlosti vede k velké odchylce skutečné dráhy kosmické sondy od propočítané a pak je nutné při letu provádět více korekčních manévrů.

Setkání kosmické sondy s cílovou planetou, v našem případě s Marsem, dovolí pouze takový termín startu, kdy polohu Země při startu a Marsu při setkání spojuje realizovatelná, v zásadě poloeliptická, dráha. To je velmi obtížné, jestliže si uvědomíme, že jak místo startu (Země), tak i cíl (Mars) jsou v pohybu. Vlivem rozdílné střední oběžné rychlosti pohybu Země $29,8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ a Marsu $24,1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ a jejich odlišné vzdálenosti od Slunce, se nepřetržitě mění i jejich vzájemná poloha v prostoru.

Podmínka jednoznačného určení poloh Země a Marsu dává vhodný okruh dat startu a setkání výhodných z hlediska spotřeby energie kosmické sondy. Vhodná doba pro start k letu na Mars je během každých dvou let zhruba 50 dnů.

Druhý rozdíl mezi pohybem na Zemi a v meziplanetárním prostoru spočívá ve vlivu tření. Při pohybu na Zemi, například při zastavování automobilu, je možné prostým vypnutím motoru automobil zastavit, neboť vlivem odporu prostředí a tření se zastaví sám. V meziplanetárním prostoru téměř neexistuje odpor prostředí, a tudíž rychlost kosmické sondy přibližující se k cílové planetě musí být blízká k rychlosti této planety. Přitom je nepodstatné, která z obou rychlostí je větší, neboť v obou případech je nutné k dosažení planety vynaložit další energii. Jestliže se cílová planeta pohybuje rychleji než kosmická sonda, je třeba zvýšit rych-

^{*} steffl@astro.sci.muni.cz

^{**} Ve skutečnosti se i zde projeví setrvačná síla v neinerciální soustavě rotující Země, takže spotřeba energie je například při letu západ–východ menší než při letu opačným směrem.

lost k „dohnání“ planety. Naopak jestliže cílová planeta se pohybuje pomaleji, je nutno kosmickou sondu „zbrzdít“. Obecně tedy při meziplanetárním letu je fakticky nutná dvojitá spotřeba energie, jak při uvedení kosmické sondy do pohybu, tak při „stíhání“, respektive „brzdění“ u cílové planety.

Dráhy v meziplanetárním prostoru se rozprostírají na stovky milionů kilometrů, což vyžaduje speciální požadavky na velikost a směr rychlosti při navedení na meziplanetární dráhu. Velká vzdálenost planet a jejich relativně malé rozměry ztěžují přesné přilety kosmických sond k planetám. Jak jsme se již zmiňovali, jsou nutné korekční manévry, které jsou nezbytné pro přesný let sondy. Tak například v případě letu kosmické sondy Mars Pathfinder byly provedeny v lednu, únoru, květnu a červnu 1997 čtyři korekční manévry. Bez přesné znalosti mechaniky kosmického letu by nebylo možné realizovat rozsáhlý a náročný program, kterým nesporně celý projekt výzkumu Marsu je.

Přejdeme nyní k rozboru konkrétního letu ze Země na Mars podle [1], [2]. Vydjeme ze zjednodušujícího předpokladu, že dráhy Země i Marsu kolem Slunce jsou kruhové a leží v jedné rovině. Nejprve je třeba určit minimální rychlost, kterou kosmická sonda musí dosáhnout, aby se vzdálila z oblasti aktivity Země a směřovala po dráze směrem k Marsu.

Definice pojmu **oblast aktivity planety**, v našem případě Země, je poměrně obtížná, na vysokoškolské úrovni je matematické odvození definiční nerovnice uvedeno například v [3], [4], [5]. Oblastí aktivity (u nás nepřesně nazývané sférou aktivity, ale o sférický tvar jde pouze přibližně!) nazýváme množinu všech bodů v prostoru kolem planety, pro které platí, že poměr rušícího zrychlení udílenému kosmické sondě planetou a_{Pr} ku zrychlení udílenému Sluncem a_S je větší než poměr rušícího zrychlení udílenému Sluncem sondě a_{Sr} ku zrychle-

ní, udílenému sondě planetou a_P , tedy $\frac{a_{Pr}}{a_S} > \frac{a_{Sr}}{a_P}$.

Jinak řečeno: uvnitř oblasti aktivity planeta „ruší“ pohyb vztahovaný ke Slunci více než „ruší“ Slunce pohyb vztahovaný k planetě. Uvnitř oblasti aktivity planety vzhledem k Slunci převládá vliv planety nad rušivým působením Slunce. Proto uvnitř oblasti aktivity vztahujeme pohyb kosmických sond k planetám jako k hlavnímu centrálnímu tělesu, Slunce chápeme jako rušící těleso.

Vraťme se k našemu výkladu. Heliocentrická rychlost k dosažení Marsu má hodnotu $32,7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Země se pohybuje po dráze střední oběžnou rychlostí $29,8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, nutná rychlost kosmické sondy při opuštění oblasti aktivity Země, sahající do vzdálenosti přibližně $930\,000 \text{ km}$, je dána rozdílem obou rychlostí, tedy $2,9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Minimální počáteční tzv. startovací rychlost z povrchu Země je určena vztahem

$$v = \sqrt{11,2^2 + 2,9^2} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} = 11,6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1},$$

kde $11,2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ je hodnota druhé kosmické rychlosti.

Dráhy s potřebnou minimální energií jsou tzv. hohmannovské dráhy, nazývané na počest německého matematika a fyzika Waltera Hohmanna (1880–1943). Přejod ze Země (A) k Marsu (B) se uskutečňuje po poloeliptické přechodové dráze, velikost jejíž velké poloosy vypočítáme v souladu s obr. 1 takto: $a_s = \frac{1}{2} \cdot (a_1 + a_2)$. Excentricitu přechodové dráhy určíme

ze vztahu $e_s = \frac{a_2 - a_1}{a_2 + a_1}$. Dobu letu získáme ze třetího Keplerova zákona $\frac{T_s^2}{T_1^2} = \frac{a_s^3}{a_1^3}$, což po do-

sazení dá hodnotu $\frac{T_s}{2} = 0,7$ roku.

Heliocentrickou rychlost kosmické sondy obdržíme výpočtem

$$v = 29,8 \cdot \sqrt{\frac{2}{\{a_1\}} - \frac{1}{\{a_s\}}} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1},$$

vzdálenosti a_1 , a_s dosazujeme v astronomických jednotkách.

Přejdeme od zjednodušeného idealizovaného letu k reálnému, při kterém přihlížíme k eliptičnosti drah planet. V tom případě je vhodné, aby se v okamžiku startu nacházela Země v perihéliu své dráhy, kde je rychlost planety asi o $1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ vyšší než v aféliu a má hodnotu $30,4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Vyšší startovací rychlost umožňuje zkrácení dráhy letu a také výhodnější kratší rádiové spojení s případnými přistávacími moduly v okamžiku přiblížení a přistání kosmických lodí, neboť Mars je v menší vzdálenosti od Země.

Na ukázkou uvedeme údaje z letu kosmické sondy nesoucí na palubě Mars Pathfinder. Přechodová dráha, blízká se hohmannovské, měla následující hodnoty oskulačních elementů:

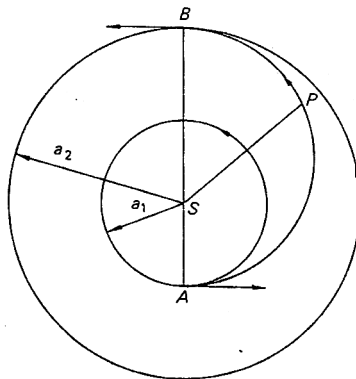
velká poloosa dráhy	$a = 1,292 \text{ AU};$
numerická excentricita	$e = 0,236;$
sklon dráhy	$i = 23,455^\circ;$
oběžná doba	$T = 536,137 \text{ dne}.$

Připomínáme, že oskulačními elementy rozumíme elementy propočítané pro oskulační dráhu v daný časový okamžik. Oskulační dráha je dráha, po níž by se kosmická sonda pohybovala, pokud bychom uvažovali od daného časového okamžiku pouze gravitační vliv Slunce.

Pro detailnější demonstraci průběhu letu uvádíme hodnoty heliocentrické rychlosti a vzdálenosti výše uvedené kosmické sondy, je patrný pokles rychlosti při přibližování k Marsu:

Heliocentrická vzdálenost [km]	Datum	Heliocentrická rychlost [$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$]
151 896 996	1. 1. 1997	32,583
164 374 506	1. 2. 1997	30,462
179 121 651	1. 3. 1997	28,195
195 985 854	1. 4. 1997	25,835
210 771 423	1. 5. 1997	23,926
223 251 712	1. 6. 1997	22,406
232 723 381	1. 7. 1997	21,377

Kosmická sonda nesoucí na palubě Mars Pathfinder uletěla na své dráze od 3. prosince 1996 do 4. července 1997, kdy přistála na Marsu, 203 miliónů kilometrů. V okamžiku při-

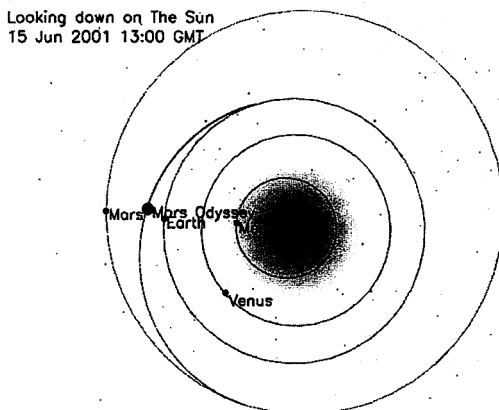


Obr. 1

stání v oblasti Ares Vallis byla její vzdálenost od Slunce 233 milionů km a od Země 191 milionů km. Její heliocentrická rychlost před přistávacím manévrem byla $21,27 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Poznámka: Mars Pathfinder 6. července 1997 opustil mobilní robot Sojourner (dočasný obyvatel) – automatické šestikolové vozítko o hmotnosti přibližně 10 kg, které provádělo mimo jiné chemickou analýzu povrchových hornin. Vedle toho bylo každodenně zkoumáno počasí, například 7. srpna 1997 byl zjištěn tlak 6,68 milibarů, teplota $-16 \text{ }^\circ\text{C}$, slabý západní vítr.

Průzkum Marsu i přes některé dílčí neúspěchy (Mars Climate Orbiter) pokračuje dále. V dubnu 2001 vypuštěná kosmická sonda Mars Odyssey doletí (obrázek dráhy pod odstavcem) koncem října k Marsu, kolem kterého má obíhat ve výšce 400 km. Pro její misi je plánováno několik úkolů. Především je to velmi důležité studium mineralogického a chemického složení povrchu a tvorba fotografického atlasu. Dále bude gama spektrometr GRS sledovat a registrovat záření radioaktivních prvků na povrchu. Na výzkum interakcí kosmického záření s atomy atmosféry je určen detektor MARIE. Kamera THEMIS se středním rozlišením stovky metrů v infračerveném oboru bude analyzovat případné rozdíly v teplotních polích, podrobněji viz článek RNDr. Randy v tomto čísle [6], případně další informace na adrese [7].



Solar System Simulator

Výstižně RNDr. Grygar v prvním díle Žně objevů 2001 v [8] shrnuje, že Mars je planeta se záhadnou minulostí a perspektivní budoucností. Ta je spojena s předpokládanou existencí vody, nalézající se s velkou pravděpodobností pod povrchem v hloubkách několika set metrů. Planeta bude předmětem výzkumu jak dalších kosmických sond, tak také přímého pozorování. Při velké opozici v srpnu 2003 při vzdálenosti od Země pouze 56 milionů kilometrů budou příznivé podmínky pro pozorování povrchu Marsu i menšími pozemskými dalekohledy.

Literatura:

- [1] Roy A. E., Clarke D.: *Astronomy. Principles and Practice*. Adam Hilger Ltd, Bristol 1978.
- [2] Štefl V.: *Výuka astronomie na gymnáziu*. UJEP, Brno 1987.
- [3] Andriele P.: *Základy mechaniky nebeských těles*. Academia, Praha 1971.
- [4] Kolář J.: *Základy kosmonautiky*. ČVUT, Praha 1972.
- [5] Domanski J., Štefl V.: *Strefy oddziaływania planet*. Fyzyka w Szkole, No. 1 (1997).
- [6] Randa M.: *Astronomické novinky 16*. Školská fyzika VII, č. 1 (2001) 59.
- [7] <<http://marsweb.jpl.nasa.gov/odyssey/>> 2001 Mars Odyssey (anglicky).
- [8] <<http://www.ian.cz/detart.asp?id=500>> Žně objevů 2000 – díl první (česky).