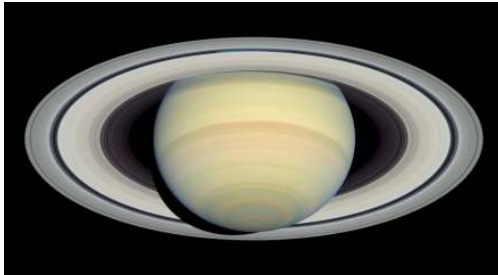


Nejkrásnější planeta sluneční soustavy Saturn v úlohách

VLADIMÍR ŠTEFL

Přírodovědecká fakulta MU, Brno

Pocity krásy hrají důležitou roli při motivaci studentů a zejména studentek ve výuce méně oblíbené fyziky. Na snímcích nebo při pozorování dalekohledem vyvolává největší pocit libosti z planet ve sluneční soustavě Saturn vzhledem k jeho systému prstenců. Planeta je snadno pozorovatelná již i menšími dalekohledy, nejintenzivnější estetické dojmy vznikají při největším rozevření prstenců. Zajímavá nažloutlá barva (obr. 1), je vyvolána odrazem slunečního světla v horní vrstvě mraků planety.

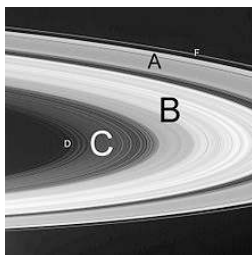


Obr. 1

Prvním, kdo systém prstenců nejen pozoroval, ale i pochopil jejich vzhled, byl *Christian Huygens* (1629–1695) v roce 1657. Mnohem později upřesnil výzkum kosmických sond Voyager I. a II. při průletech v letech 1980 a 1981 tloušťku prstenců na zhruba jeden kilometr a průměr

přibližně na 272 000 km. Prstence pozorujeme díky odrazu slunečního světla. Jsou tvořeny částicemi prachových zrn, ledem a menšími tělísky centimetrových, decimetrových až metrových velikostí. Spektrometry na zmiňovaných kosmických sondách pracující ve viditelném a infračerveném oboru zjistily, že střední rozměr částic prstence se zvětšuje s rostoucí vzdáleností od planety. Prstence jsou staré pouze stovky miliónů roků. Není dosud spolehlivě objasněno, zda vznikly rozpadem nějakého měsíce či z původního akrečního protoplanetárního disku. V systému prstenců existují mezery, nejzřetelnější je pojmenovaná po *Giovanim Dominicovi Cassinim* (1625–1712), která jím byla objevena roku 1675 (viz obr. 1). Je způsobena gravitačním působením především měsíce Mimas, který prostor gravitačně ovlivňuje, a téměř ho „vyčistil“. Obecně i další mezery v systému prstenců jsou vyvolány gravitačním působením jednoho či více měsíců.

Jak bylo dokázáno v [1] *Jamesem Clarkem Maxwellem* (1831–1879) na základě analýzy dynamické stability, je-li hmotnost Saturnu dostatečně velká, potom prstence diskretních vzájemně interagujících částic na oběžné dráze kolem planety udržují stabilní tvar a nejsou tvořeny tuhými tělesy, nýbrž systémy drobných částic. Později např. *James Edward Keller* (1857–1900) v [2] a *William Wallace Campbell* (1862–1938) proměřovali spektroskopicky relativní rychlosti vnitřních a vnějších částí prstenců k vyjasnění, který jejich okraj se pohybuje rychleji. Závislost rychlosti částic tuhého tělesa na vzdálenosti je $v \sim r$ zatímco u oběžné rychlosti pohybujícího se tělesa na kruhové dráze je dána závislostí $v \sim \sqrt{1/r}$. Bylo zjištěno, že ledové částičky tvořící převážně systém prstenců (obr. 2), se pohybují ve vnitřní oblasti rychleji než ve vnější, což je v souladu s pohybem volného tělesa a jde o tzv. keplerovskou rotaci. Modelové přiblížení problematiky lze demonstrovat následovně.

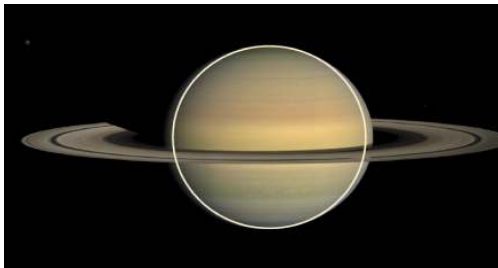


Obr. 2

Úloha 1. Určete oběžnou rychlost vnitřní části prstence D o vzdálenosti 67 000 km od Saturnu s oběžnou dobou 0,20 dne, vnitřní části prstence A o vzdálenosti 122 000 km s oběžnou dobou 0,50 dne, vnitřní části prstence E o vzdálenosti 181 000 km s oběžnou dobou 0,91 dne. Ověřte platnost závislosti $v \sim \sqrt{1/r}$.

Řešení. Dosazením do vztahu $v = \frac{2\pi r}{T}$ postupně získáme $v = 24,3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $17,7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ a $14,4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, tedy s rostoucí vzdáleností od planety klesá oběžná rychlost v souladu se závislostí $v \sim \sqrt{1/r}$.

Samotná planeta je druhou největší ve sluneční soustavě a má zhruba stokrát větší hmotnost než Země. Vyznačuje se velmi rychlou rotací, která zplošťuje její tvar (obr. 3). Na rovníku dosahuje rotační perioda 10 hodin. První měření úhlových velikostí polárního a rovníkového poloměru provedl *Friedrich Wilhelm Herschel* (1738–1822) [3].



Obr. 3

Úloha 2. Ze znalosti rovníkového poloměru $a = 60\,268 \text{ km}$ a polárního poloměru $b = 54\,364 \text{ km}$ Saturnu určete hodnotu jeho zploštění.

Řešení. Velikost zploštění stanovíme ze vztahu

$$f = \frac{a - b}{a} = 1 - \frac{b}{a}$$

a dosazením obdržíme $f = 0,09796$.

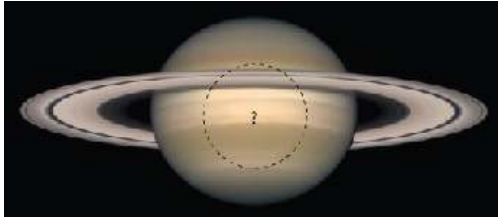
Saturn vyzařuje do svého okolí více energie, než zářením od Slunce přijímá. Nejpravděpodobnějšími dodatečnými vnitřními zdroji energie jsou gravitační smršťování, fázové přeměny vodíku v jeho nitru respektive klesání helia. Základní kvantitativní představy o energetických poměrech jsou zachyceny v následujících úlohách.

Úloha 3. Jak velká je hustota zářivého toku dopadajícího ze Slunce na Saturn?

Řešení. Porovnáním s hustotou zářivého toku tzv. solární konstantou pro Zemi obdržíme

$$K_S = K_Z \left(\frac{r_Z}{r_S} \right)^2 = 14,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Úloha 4. Stanovte efektivní povrchovou teplotu Saturnu (obr. 4).



Obr. 4

Řešení. Pro vyjádření hledaných souvislostí použijeme vztah

$$\pi R_S^2(1 - A)K_S + 4\pi R_S^2Q = 4\pi R_S^2\sigma T_{\text{ef}}^4$$

(podrobněji je rozebíráno v [4]).

První výraz vyjadřuje množství energie dopadající ze Slunce na disk Saturnu, R_S je poloměr Saturnu, A je albedo a K_S je hustota zářivé energie od Slunce ve vzdálenosti Saturnu. Druhý člen charakterizuje vyzařování vnitřní energie samotným Saturnem. Člen na pravé straně zachycuje vyzařování Saturnu, kde T_{ef} je efektivní teplota. Vzhledem k rychlé rotaci Saturnu předpokládáme celým povrchem planety. Přestože planety nevyzařují úplně přesně jako absolutně černá tělesa použijeme Stefanův–Boltzmannův zákon. Při znalosti koeficientu vnitřního tepla činící u Saturnu $Q = 1,80$ a albeda $A = 0,45$ dosazení do rovnice obdržíme pro efektivní teplotu Saturnu $T_{\text{ef}} = 91 \text{ K}$.

Až detailní výzkum Saturnu z bezprostřední blízkosti prostřednictvím kosmických sond umožnil získat údaje, jejichž analýza vedla k chemickému složení a fyzikálním vlastnostem atmosférických vrstev Saturnu. K planetě se přiblížily kosmické sondy Pioneer II. roku 1979, Voyager I. 1980 a Voyager II. 1981, Cassini 2004.

Úloha 5. Určete práci nezbytnou k hypotetickému modelovému přesunu kosmické sondy Cassini o hmotnosti $m_C = 5\,700$ kg z polohy Země na její dráze k Saturnu, vše v gravitačním poli Slunce. Vzdálenost Země–Slunce činí $1,50 \cdot 10^{11}$ m, vzdálenost Saturnu od Slunce je $1,43 \cdot 10^{12}$ m.

Řešení. Práce je uskutečňována na úkor úbytku gravitační potenciální energie, tedy

$$A = G \frac{M_{\text{Sl}} m_C}{r_{\text{SlZ}}} \left(1 - \frac{1}{r_{\text{SlS}}} \right).$$

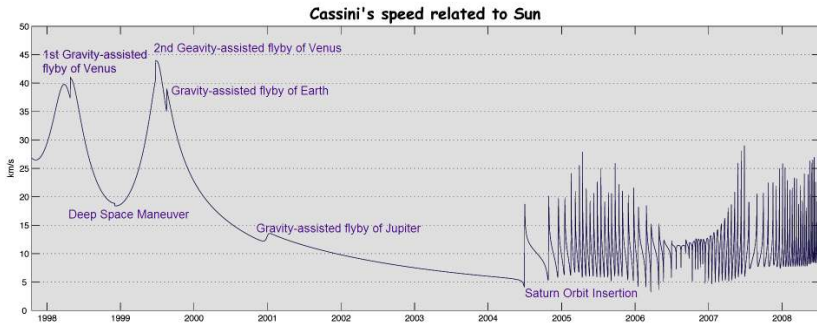
Po dosazení získáme $A \doteq 5,1 \cdot 10^{12}$ J.

Reálný let kosmické sondy Cassini s modulem Huygens na palubě byl komplikovanější. Po startu v roce 1997 kosmická sonda dvakrát v letech 1998 a 1999 prolétla kolem Venuše, využila jejího gravitačního pole k urychlení tzv. gravitačním prakem a po průletu kolem Země zamířila k Jupiteru, kde byla koncem roku 2000. Postupně tak při průletech kolem planet docházelo ke zrychlování pohybu kosmické sondy. Při letu kolem Jupitera se dále změnil i směr rychlosti po dráze k Saturnu. Rozeberme zjednodušenou teorii gravitačního praku – urychlení udíleného kosmických sondám planetami, podrobněji viz např. [5], [6].

Kosmická sonda Cassini při přiblížení k Jupiteru zvýšila svoji rychlost díky přitažlivé gravitační síle planety. Při průletu pericentrem ji měla největší, následně gravitace její pohyb zpomalila. V celkovém souhrnu rychlost kosmické sondy vzhledem k Jupiteru zůstala stejná. Avšak počáteční rychlost na začátku a koncová po průletu kolem Jupitera, obě vztahované k heliocentrické soustavě spojené se Sluncem, jsou rozdílné. Planeta Jupiter ztratila část pohybové energie, kterou převzala kosmická sonda Cassini (platí zákony zachování energie a hybnosti). Vzhledem k nepoměru hybností obou těles, daném značným rozdílem hmotností, je ovlivnění dráhy planety v praxi nepozorovatelné, zatímco kosmické sondy významné. Při výše popsaném manévru se rovněž změnil směr jejího letu po dráze. Průletem za Jupiterem (ve smyslu jeho oběžné rychlosti) kosmická sonda získala část oběžné rychlosti planety. V případě kosmické sondy Cassini obdržela dodatečnou rychlost $\Delta v = 2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Na obr. 5 jsou zachyceny změny její rychlosti vzhledem k Slunci při průletech u Venuše, Země a Jupitera.

Kolem Saturnu obíhá větší počet měsíců, největším o průměru 5 150 km je Titan, objevený *Christianem Huygensem* r. 1655 [7]. Měsíc má vlastní hustou atmosféru tvořenou molekulárním dusíkem, metanem a argonem. První spektroskopické studium atmosféry Titanu provedl *Gerrit Pieter*

Kuiper (1905–1973) [8]. Po určení číselné hodnoty gravitační konstanty bylo možné prostřednictvím III. Keplerova zákona v přesném tvaru stanovit přímo nejdůležitější charakteristiku Saturnu – hmotnost.



Obr. 5

Úloha 6. Nalezněte hmotnost Saturnu, jestliže z pozorování bylo zjištěno, že měsíc Titan (obr. 6), obíhá ve vzdálenosti $a = 1221,8 \cdot 10^3$ km s oběžnou dobou $T = 15,945$ dne.



Obr. 6

Řešení. Úpravou III. Keplerova zákona obdržíme

$$M_S = \frac{G}{4\pi^2} \frac{a^3}{T^2} = 5,7 \cdot 10^{26} \text{ kg.}$$

Spolupráce NASA, ESA a ASI vedla v roce 2004 k přistání modulu Huygens na povrchu Titanu. Modul přes hodinu úspěšně prováděl průzkum chemických a fyzikálních vlastností jeho povrchu. Ve zjednodušeném přiblížení zachycuje závěrečnou fázi přistání modulu obr. 7.



Obr. 7

Úloha 7. Při sestupu modulu Huygens o hmotnosti $m = 320$ kg na padáku na měsíc Titan rychlostí $v = 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, došlo při dopadu modulu k jeho zaboření do hloubky $s = 12$ cm. Stanovte střední sílu F odporu materiálu hornin na Titanu. Jaké decelerační zrychlení a při tom působilo na modul?

Řešení. Kinetická energie modulu je rovna vykonané práci vynaložené při vnikání do povrchových hornin měsíce. Platí

$$Fs = \frac{1}{2}mv^2,$$

odkud po numerickém dosazení obdržíme $F = 57\,600$ N. Dále ze vztahu $mv = Ft$ stanovíme $t = 0,033$ s. Odtud

$$a = \frac{2s}{t^2} = 218 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Druhým největším měsícem Saturnovy soustavy je tzv. ledový Rhea s průměrem 1 530 km. Jeho povrch je pokryt krátery. Dokážeme určit jeho vzdálenost od Saturnu, jestliže známe údaje o pohybu Titanu?

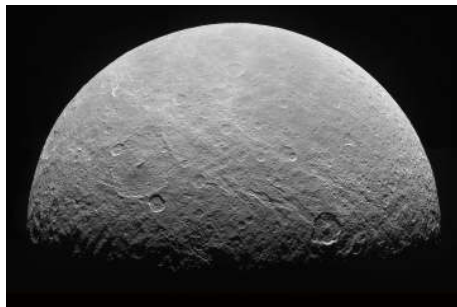
Úloha 8. Jak jsme uvedli, největší Saturnův měsíc Titan obíhá kolem planety po dráze s velkou poloosou $1,22 \cdot 10^6$ km za 15,945 dne. Nalezněte střední vzdálenost měsíce Rhea od Saturnu, jestliže jeho oběžná doba činí 4,518 dne.

Řešení. Dosadíme do III. Keplerova zákona

$$\frac{a_{\text{T}}^3}{T_{\text{T}}^2} = \frac{a_{\text{R}}^3}{T_{\text{R}}^2},$$

odtud vyjádříme $a_{\text{R}} = 526 \cdot 10^3$ km.

Úloha 9. Případní obyvatelé měsíce Rhea (obr. 8), který má pro pozemský život svým složením příhodnou kyslíkovou atmosféru, bohužel však velmi řídkou s nízkou teplotou 50–100 K, by pozorovali Saturn pod středním úhlovým průměrem $\alpha = 0,2163$ rad.



Obr. 8

Při znalosti oběžné doby měsíce činící $T = 4,5175$ dne díky svým fyzikálním znalostem určili střední hustotu Saturnu. Zkuste je napodobit.

Řešení. Použijeme III. Keplerův zákon

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_S + M_R).$$

Dále platí pro úhlovou velikost průměru

$$\alpha = \frac{2R_S}{a}.$$

Hmotnost měsíce Rhea $M_R = 2,5 \cdot 10^{21}$ kg můžeme oproti hmotnosti Saturna $M_S = 5,7 \cdot 10^{26}$ kg zanedbávat. Dosazením do III. Keplerova zákona při

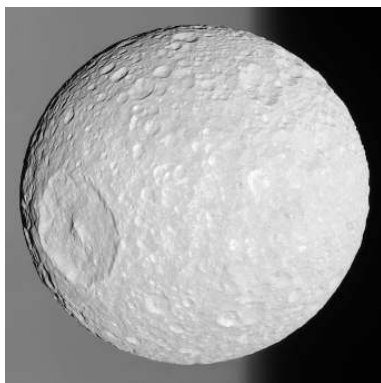
$$M_S = \frac{4}{3}\pi R_S^3 \rho_S$$

obdržíme pro hustotu

$$\rho_S = \frac{24\pi}{GT^2\alpha^3} \doteq 700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

Nízká hustota naznačuje, že vodík a helium jsou značně zastoupeny i v nitru planety. Po chemické stránce je planeta složena z molekulárního vodíku, helia, metanu a čpavku.

Dalším zajímavým měsícem Saturnu je Mimas objevený 17. září 1789 *F. W. Herschelem*. Je nejmenším tělesem ve sluneční soustavě zformovaným do sférického tvaru o průměru přibližně 400 km. V minulosti se měsíc srazil s tělesem o průměru přibližně 10 km. Při srážce vznikl zajímavý útvar – velký impaktní kráter Herschel (obr. 9), který zaujal lineární velikostí až čtvrtinu měsíční polokoule, má průměr 130 km, hloubku 10 km s centrální horou o výšce 6,5 km. Průměrná hustota měsíce $1\,150\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ napovídá, že je složen z vodního ledu s příměsí hornin. Kosmická sonda Cassini ze vzdálenosti 9 500 km upřesnila proměřením infračerveným spektrometrem povrchovou teplotu, které dosahuje nejvyšší hodnoty 92 K při průměrné teplotě 77 K. Při těchto teplotách je vodní led extrémně tvrdý.



Obr. 9

Úloha 10. Určete střední rychlost měsíce Mimas, jestliže jeho vzdálenost od planety je $r = 185,5 \cdot 10^3\text{ km}$ a hmotnost Saturnu $M_S = 5,7 \cdot 10^{26}\text{ kg}$.

Řešení. Dosadíme do vztahu

$$G_S \frac{M_S m_M}{r^2} = \frac{m_M v^2}{r}.$$

odkud obdržíme

$$v = \sqrt{G \frac{M_S}{r}} = 14,1\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}.$$

V soustavě obíhajících měsíců kolem Saturnu, s větší excentricitou eliptických drah, se projevují slapové jevy.

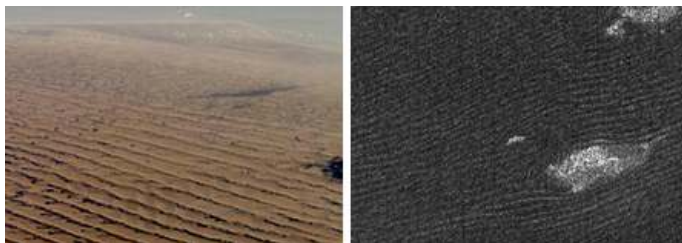
Úloha 11. Stanovte velikost slapové síly Saturnu působící na jeho měsíc Titan. Hmotnost Saturnu je $M_S = 5,7 \cdot 10^{26}$ kg, měsíc Titan má hmotnost $M_T = 1,35 \cdot 10^{23}$ kg, průměr $D_T = 5\,150$ km a Saturn obíhá ve vzdálenosti $r = 1,22 \cdot 10^6$ km.

Řešení. Působící slapová síla je dána vztahem

$$F = 2G \frac{M_S m_m}{r^3} D_m.$$

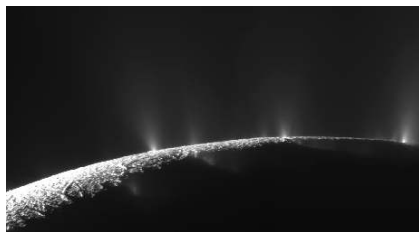
Dosadíme do vztahu parametry soustavy Saturn–Titan, $F_T = 2,9 \cdot 10^{19}$ N.

Relativně velká slapová síla Saturnu, výraznější než slapová síla Měsíce působící na Zemi, vyvolává v dusíkové a metanové atmosféře Titanu značný pozorovaný vítr, který způsobuje přesuny písku na povrchu ([9], obr. 10).



Obr. 10

Dalším měsícem, kde se projevují slapové síly je Enceladus, vyznačující se nejvyšším albedem z těles ve sluneční soustavě, odráží 99 % dopadajícího světla. Byl objeven W. Herschelem roku 1789. Na jeho povrchu, byly zjištěny výtrysky vody rychlostí několik set metrů za sekundu (obr. 11). Tato aktivita je pravděpodobně vyvolána působením slapových sil měsíců Saturnu, především Dione a Mimase, jejímž důsledkem je ohřev nitra měsíce.



Obr. 11

Existují metody určování vnitřních charakteristik Saturnu?

Úloha 12. Stanovte centrální tlak v nitru Saturnu při jeho známé hmotnosti $M_S = 5,7 \cdot 10^{26}$ kg a poloměru $R_S = 5,7 \cdot 10^7$ m.

Řešení. Pro sférické planety platí rovnice hydrostatické rovnováhy

$$\frac{dP}{dR} = -\rho g = -\rho \frac{GM}{r^2}.$$

Při

$$M = \frac{4}{3}\pi\rho r^3$$

získáme pro centrální tlak vztah

$$P_c = -\frac{4}{3}\pi G\rho \int_0^R r \, dr = \frac{2}{3}\pi G\rho^2 R^2 = \frac{3GM^2}{8\pi R^4}.$$

Dosazením číselných hodnot hmotnosti a poloměru Saturnu do uvedeného vztahu obdržíme $P_c = 2,4 \cdot 10^{11}$ Pa.

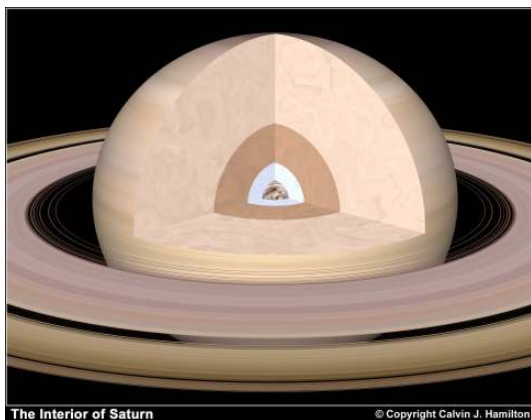
Úloha 13. Proč má obří plynná planeta Saturn horké nitro o teplotě 15 000 K?

Řešení. Menší poměr plochy povrchu k objemu

$$\frac{4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{3}{r}$$

způsobuje pomalejší uvolňování tepla a následné ochlazování planety.

Stavba nitra planety je následující (obr. 12): Vnější část tvoří molekulární vodík, následuje rozsáhlá vrstva tekutého molekulárního vodíku a helia. Pod ní se nachází vrstva tekutého velmi vodivého vodíku. Zásaditou rotací jádra pohybem nabitých částic vzniká silné magnetické pole Saturnu, které objevila sonda Pioneer 11 r. 1979. Jejím zdrojem je tenká stlačená vrstva vodíku vytvářející vedení elektrického proudu v kapalině schopné generovat magnetického pole. V centrální části planety se nachází kamenné jádro. Po chemické stránce je Saturn složen z vodíku, helia, metanu a amoniaku.



Obr. 12

Úloha 14. Určete střední kvadratickou rychlost vodíku v atmosféře Saturnu a její izotermickou škálovou výšku při teplotě 90 K. Zdůvodněte existenci vodíku a helia v atmosféře.

Řešení. Pro střední kvadratickou rychlost platí vztah

$$v_{\text{H}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{\text{H}}}} = 1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Izotermická škálová výška je dána vztahem $h = \frac{kT}{m_{\text{H}}g} = 40 \text{ km}$. Vzhledem k obsahu i těžších molekul v atmosféře je skutečná hodnota škálové výšky menší.

Úloha 15. Stanovte únikovou rychlost na rovníku Saturnu při hmotnosti $M_{\text{S}} = 5,7 \cdot 10^{26} \text{ kg}$ a rovníkovém poloměru $R_{\text{Sr}} = 60\,268 \text{ km}$.

Řešení. Pro druhou kosmickou rychlost platí vztah

$$v_{\text{Sr}} = \sqrt{2G \frac{M_{\text{S}}}{R_{\text{Sr}}}} = 36 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Shrnuto s ohledem na výsledek předcházející úlohy $v_{\text{Sr}} \gg v_{\text{H}}$, tudíž vodík a těžší helium s ještě menší střední kvadratickou rychlostí z atmosféry neunikají. Teplu stoupající z nitra planety uvolňuje energii pro pohyb plynu v atmosféře Saturnu.

Při ukončení mise bude ekologicky kosmická sonda Cassini v roce 2017 navedena do nitra severní polokoule Saturnu. Kdyby však hypoteticky měla opustit sluneční soustavu, jakou by musela mít rychlost?

Úloha 16. Stanovte únikovou rychlost ze sluneční soustavy tělesa startujícího z oběžné dráhy Saturnu. Jeho vzdálenost od Slunce je $1,43 \cdot 10^{12}$ m.

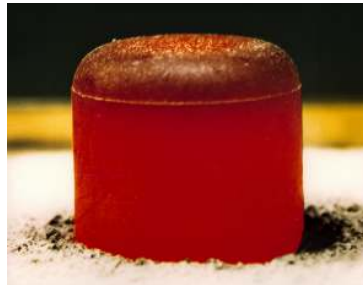
Řešení. Úniková rychlost je rovna

$$v = \sqrt{2G \frac{M_{\text{Sl}}}{r_{\text{SlS}}}} = 13,8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Úloha 17. Kosmická sonda Cassini (obr. 13), se pohybovala ve větších vzdálenostech od Slunce, tudíž energie získávaná solárními panely byla nedostatečná, protože hustota zářivého toku od Slunce je u Saturnu, jak jsme propočítali v předchozím textu, příliš nízká. Proto zdrojem energie o celkovém výkonu 885 W kosmické sondy byly tři radioizotopové články RTG, tableta oxidu plutoničitého PuO_2 (obr. 14). V nich bylo využíváno rozpadu plutonia $^{238}_{94}\text{Pu}$, které produkuje částice α se značnou kinetickou energií, která se přeměňuje na tepelnou energii. Následný převod na elektrickou energii se uskutečňuje bez pohyblivých částí, prostřednictvím termočlánků založených na rozdílu teplot radioaktivní látky izolované uvnitř pouzdra a vnějšího chladiče. Určete nezbytné množství plutonia k zabezpečení uvedeného výkonu, průměrná účinnost je přibližně 5 %. Předpokládaná doba využitelnosti tohoto zdroje energie je nejméně 15 roků, po dobu hlavních úkolů mise Cassini.

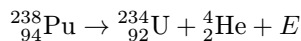


Obr. 13



Obr. 14

Řešení. Celkovou uvolněnou energii E při reakci



stanovíme z tabulkových hodnot vazebných energií [10]

$$E = 5\,593 \text{ keV} = 8,949 \cdot 10^{-13} \text{ J.}$$

Nezbytné množství paliva určíme následující úvahou. Pro zabezpečení celkového výkonu všech tří článků je zapotřebí $\frac{885}{8,95 \cdot 10^{-13}} = 9,9 \cdot 10^{14}$ atomů plutonia na jednu sekundu při 100 % účinnosti. Vzhledem k zadané reálné 5 % účinnosti potřebujeme 20krát větší počet atomů, tudíž $1,98 \cdot 10^{16}$ atomů plutonia. Jeden atom plutonia ${}_{94}^{238}\text{Pu}$ má hmotnost $3,95 \cdot 10^{-25}$ kg. Celkem je zapotřebí na jednu sekundu $7,8 \cdot 10^{-9}$ kg, na 15 roků 3,7 kg paliva, za zjednodušujícího modelového předpokladu neklesající aktivity zářiče. Ve skutečnosti kosmická sonda Cassini nesla zhruba desetinásobně větší množství paliva ≈ 40 kg, neboť použité plutonium nebylo zcela čisté, jeho koncentrace dosahovala maximálně zhruba 70 %, aktivita zářiče s časem klesala, zdroj elektrické energie ztrácel ročně 0,8 % kapacity atd.

Článek naznačil možnosti, jak prostřednictvím motivace „transformovat fyzikální podstatu krásy“ do výuky fyziky. Jeho cílem bylo seznámení žáků a učitelů s vybranými projevy fyzikálních zákonitostí na Saturnu, jeho soustavě prstenců a měsíců. Je na učiteli, které z uvedených úloh si vybere a následně ve výuce použije.

Literatura

- [1] *Maxwell, J. C.*: On the stability of the Motion of Saturn's Rings. Macmillan and Company, Cambridge and London, 1859.
- [2] *Keeler, J. E.*: A Spectroscopic Proof of the Meteorit Constitution of Saturn's Rings. *The Astrophysical Journal*, roč. 1 (1895), s. 416–427.
- [3] *Herschel, W.*: Account of the Discovery of a Sixth and Seventh of the Planet Saturn. *Phil. Trans. Royal Society of London*, roč. 80 (1790), s. 1–20.
- [4] *Unsöld, A., Baschek, B.*: *The New Cosmos*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002.
- [5] *Bartlett, A. A, Hord, Ch. W.*: The slingshot effect: explanation and analogies. *The Physics Teacher*, roč. 23 (1985), č. 8, s. 466–473.
- [6] *Jones, J. B.*: How does the slingshot effect work to change the orbit of a spacecraft. *Scientific American*, 2005, s. 1136.
- [7] *Huygens, Ch.*: *De Saturni luna observatio nova*. Hague, 1656.
- [8] *Kuiper, G.*: Titan: A Satellite With An Atmosphere. *The Astrophysical Journal*, roč. 100 (1944), s. 378–383.
- [9] *Dermott, S., Sagan, C.*: Tidal effects of disconnected hydrocarbon seas on Titan. *Nature*, roč. 374 (1994), 238–240.
- [10] Ernest Orlando Lawrence and Berkeley National Laboratory:
<http://ie.lbl.gov/toi.html>