

(27) Název: Meteoroid

Ročník: 7.; 1993 – 1994

Č. úlohy: 9

Text: Meteorit o hmotnosti  $10^6$  kg vletne přímo do Slunce. Je možné tento úkaz pozorovat s užitím moderního vybavení?

### 1. Rozbor — model

Zadání úlohy jsme interpretovali dvěma způsoby. V prvním případě jsme pád do Slunce uvažovali již při vstupu do koróny, za druhé měl náš meteoroid hmotnost  $10^6$  kg až při styku s fotosférou, kterou jsme určili za povrch Slunce. Meteoroid jsme pozorovali výhradně z povrchu a oběžné dráhy Země, metody pozorování sondou, jež by sledovala meteoroid jsme vyloučili, stejně i umístění pozorovacího zařízení přímo na meteoroidu. Rovněž jsme předpokládali, že přesně známe trajektorii a okamžitou rychlost meteoroidu, tedy v každém okamžiku umíme na těleso zaměřit teleskop.

Při řešení úlohy jsme též účinně použili podrobnou zprávu o pozorování komety Howard-Koomen-Michels 1979 XI z Kreutzovy skupiny, která v srpnu 1979 velmi těsně proletěla okolo Slunce, přičemž ve sluneční koróně ztratila svoji komu a halo, což se projevilo emisními čarami SiII a FeII na spektrech zachycených téhož dne na hvězdárně na Lomnickém štítě. Ze zprávy jsme se jednak poučili o dějích ve sluneční atmosféře, za druhé zpráva poukázala na nejefektivnější řešení.

### 2. Pracovní hypotéza

Pád meteoroidu do Slunce lze pozorovat.

### 3. Teoretické řešení — parametry

#### a) Rychlost meteoroidu

Nejprve jsme se zajímali o děje, které budou souviset s pohybem meteoroidu kosmickým prostorem.

Pro případ našeho řešení se meteoroid před svým pádem do Slunce nacházel v pásu planetek mezi Marsem a Jupiterem, tj.  $5 \times 10^{11}$  metrů od Slunce. Jeho okamžitou rychlost jsme spočítali dle vztahu:

$$v = \sqrt{2\kappa M \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right)},$$

kde  $r$  je vzdálenost od středu Slunce,  $r_0$  je nejvzdálenější bod dráhy meteoroidu od Slunce (počáteční rychlost je nulová),  $\kappa$  je Newtonova gravitační konstanta a  $M$  hmotnost Slunce.

Tento způsob výpočtu rychlosti je výpočtem volného pádu v radiálním gravitačním poli. Zanedbáme-li člen  $1/r_0$ , který má v našem případě nepatrnou velikost, dostaneme vztah pro parabolickou rychlost.

b) *Teplota meteoroidu*

Meteoroid se bude v průběhu svého pádu ke Slunci zahřívat (díky slunečnímu záření) Téměř jako absolutně černé těleso dle Stefanova-Boltzmannova zákona, tedy energie, kterou těleso vyzařuje, je díky tepelné rovnováze rovna energii přijímané od Slunce, číselně rovna  $(r_m^2 t W)/(4r^2)$ , kde  $t$  je čas,  $W$  je zářivý výkon Slunce,  $r_m$  poloměr meteoroidu a  $r$  vzdálenost meteoroidu od středu Slunce. Pro energii meteoroidem vyzařovanou platí  $E = 4\pi r_m^2 t \sigma T^4$ , kde  $T$  je termodynamická teplota tělesa a  $\sigma$  Stefanova-Boltzmannova konstanta (číselně  $\sigma = 5,66956 \times 10^{-8}$ ).

Pro termodynamickou teplotu, kterou bude mít těleso po ustálení tepelné rovnováhy, tedy platí:

$$4\pi\sigma T^4 = \frac{W}{4r^2}$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{W}{16\pi\sigma r^2}}$$

Ve vzdálenosti tří milionů kilometrů od Slunce (hranice koróny) má meteoroid teplotu již cca 1800 K a materiál meteoroidu (uvažovali jsme železo, led a křemík), jak jsme zjistili v tabulkách, již zaručeně sublimuje (při tlacích blízkých nule materiály nutně sublimují, dokonce při výrazně nižších teplotách, než při tlaku u zemského povrchu, což vyplývá z fázového diagramu). Tedy hmotnost meteoroidu, který se odpařuje, se po vstupu do koróny (případ 1) zmenšuje

c) *Jasnost meteoroidu*

Výpočtem jsme zjistili, že meteoroid bude mít při vstupu do koróny přibližně 20. magnitudu, tedy nemůže být ze vzdáleností Země vizuálně pozorován, poněvadž bude zcela přesvětlen mnohonásobně jasnější korónou.

Výpočet jasnosti dle Poggonovy rovnice:

$$m = 2,5 \log \frac{\rho^2 r^2}{2\pi a k r_m^2 R^2} - 26,8,$$

kde  $\rho$  je vzdálenost Země – meteoroid,  $r$  je vzdálenost meteoroid – Slunce,  $R$  je vzdálenost Země – Slunce,  $a$  je albedo,  $k$  je procento osvětleného povrchu při pozorování ze Země.

Skutečná jasnost meteoroidu bude ještě o něco málo menší — unikající prach totiž bude stínit sluneční záření. Tento jev se výrazně projevuje např. u kometárních jader, u tak malého tělesa, jako máme my, ale není příliš významný.

#### d) *Rychlost sublimace meteoroidu*

Hrubý odhad rychlosti sublimace meteoroidu si můžeme udělat podle známého vztahu  $E = ml_s$ , kde  $l_s$  je měrné skupenské teplo sublimace (okolo 1 GJ.kg<sup>-1</sup> — závisí na materiálu).  $E$  je energie, přijímaná od Slunce (viz výše). Po dosažení  $t = (4ml_s r^2) / W r_m^2$ . Tento vztah nevystihuje plně skutečnost, neboť předpokládá, že se vzdálenost od Slunce (a tedy i přijímaná energie) s časem nemění. Rovněž neuvažuje záření meteoroidu, které část přijaté energie zase „pošle pryč“. Pro základní představu však tento vztah stačí.

Velké přesnosti se též dosahuje při pozorování spektroskopickém, tj. sledování absorpčních čar (viz dále).

### 4. **Dosažené výsledky — diskuse**

#### a) *Pád meteoroidu do koróny*

Jak jsme již výše zmínili, v koróně v úvahu připadají pouze pozorování spektroskopická.

Meteoroid se na své trajektorii bude odpařovat, odpařený plyn bude vytvářet jakýsi „tunel“, který se bude zvolna rozptylovat. Celkem pravděpodobný je rovněž výbuch meteoroidu, tedy okamžitý rozptyl zbývající hmoty celého tělesa.

Pokusme se zjistit, jaké změny v hmotnosti těžkých prvků (resp. intenzity spektrálních čar), se ještě dají spektroskopicky pozorovat. Uvažovali jsme takto:

Ve slunečním spektru jsou velmi zřetelně pozorovatelné spektrální čáry těžkých prvků (samozřejmě i FeII a SiII). Tyto spektrální čáry vznikají téměř výhradně ve fotosféře, v oblasti až do hloubky 500 km, kde je mez dohlednosti. Díky tomu, že fotosféra má hustotu 10<sup>-5</sup> kg.m<sup>-3</sup>, můžeme říci, že na ploše 100×100 km (která se na Slunci dá skutečně snadno pozorovat) sledujeme spektrální čáry, jež vznikají díky 10<sup>9</sup> kg těžkých prvků (10<sup>9</sup> = 5×10<sup>5</sup>·10<sup>10</sup>·10<sup>-5</sup>·0,02 — kde činitelé postupně jsou hloubka fotosféry v metrech, plocha 100×100 km v metrech čtverečných, hustota fotosféry a hmotnostní část zaujímaná těžkými prvky na Slunci). Jestliže bychom měli na takové ploše pozorovat i přírůstek 10<sup>6</sup> kg těžkých prvků, museli bychom zjistit i změnu intenzity čáry 1000krát menší oproti intenzitě obvyklé (platí v přibližně stejném poměru i pro intenzity čar SiII a FeII, o které se zvláště zajímáme). Tak malá změna hraničí s rozlišovací schopností spektrografů (jak jsme se dozvěděli v Astronomickém ústavu MFF UK). Tedy na ploše 100×100 km se dají ještě změny v intenzitách spektrálních čar (u FeII a SiII se jedná o prohloubení jádra čáry) zaznamenat.

Změna intenzity se dá tedy sledovat právě tehdy, když se hmota meteoroidu rozptýlí do plochy menší než  $100 \times 100$  km. Vzhledem k rychlosti meteoroidu je to téměř nemožné. V úvahu by přicházela případ, že meteoroid dostatečně rychle padá (aby se odpařená hmota nestačila rozptýlit) po spojnici Země – Slunce.

Je docela pravděpodobné, že by meteoroid vybuchl — celá jeho hmota by se naráz rozptýlila do prostoru. Tento jev by byl rovněž zachytitelný při neustálém spektroskopickém snímání oblasti v okolí meteoroidu.

#### b) *Pád meteoroidu do fotosféry*

Neuvažujeme případ, kdy by se těleso zčistajasna objevilo na hranicích fotosféry, ale samozřejmě tam meteoroid přiletěl. Pokusme se nejprve zjistit, nakolik se fotosféra zjasní přeměnou kinetické energie meteoroidu na zářivou.

Stanovme, jaká plocha bude dvakrát jasnější, než okolí:

$$S = \frac{4mv^2r^2}{2W}$$

Dostáváme, že zjasnění by bylo 1 s pozorovatelné na ploše  $55 \times 55$  km. Fotosféra má tloušťku asi 500 km, meteoroid rychlost asi  $600 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Zároveň však fotosféra má daleko větší hustotu než koróna, a proto jevy zde probíhající budou mít charakter výbuchu. Další prvek vstupující do hry je menší průhlednost fotosféry, a proto i zeslabení jasnosti všech probíhajících jevů. Dalo by se uvažovat o možnosti, zachytit takový výbuch. Museli bychom však přesně vědět, kdy a kam se podívat. (V úvodních předpokladech to uvažujeme.) Jestliže těleso mělo v okamžiku dopadu do fotosféry hmotnost  $10^6$  kg, muselo mít na počátku svého letu hmotnost mnohem (podle našich výpočtů asi 10krát) větší a na svojí cestě se muselo silně odpařovat. Tedy pro pozorování jevů v koróně, jež by dosvědčily pád do fotosféry, platí stejná pravidla, jako v případě prvním, jen plochu pro mezní rozlišení změny intenzity čar ve spektru můžeme uvažovat až  $320 \times 320$  km (viz výše).

### 5. **Závěr**

Zjistili jsme, že v obou uvažovaných případech existuje možnost pozorování pádu tělesa do Slunce. Výjimečné je pozorování vizuální, mnohem lépe a častěji zaznamenáme změny intenzity spektrálních čar. Samozřejmě to vše za předpokladu znalosti přesné polohy a rychlosti meteoroidu v každém okamžiku pozorování.

*Pozn.: Projekt Spacewatch*

Pro pozorování (zejména vizuální) lze doporučit již existující projekt Spacewatch, který sleduje v okolí Země tělesa, jež by mohla případně na Zemi dopadnout. Ze zprávy o projektu jsme zjistili, že tělesa podobná našemu meteoroidu jsou poměrně častá i v okolí Země. Každý

den proletí ve vzdálenosti do 400 000 km od Země až 50 těles s průměrem 10 m, jednou za 10 týdnů se Země s takovým tělesem srazí.

Spacewatch za noc prozkoumá jednu dvoutisícinu oblohy a pozoruje tělesa do 17. magnitudy a uvažuje se o rozšíření — s využitím družic by projekt zachytil tělesa i 24. magnitudy, tedy nedaleko Slunce (mimo korónu). Meteoroid z naší úlohy by mohl být zachycen a určena poměrně přesně jeho budoucí trajektorie. Jednoduchou úpravou bychom mohli k teleskopům projektu Spacewatch přimontovat spektrografy a získali bychom ideální zařízení pro sledování meteoroidu.

## (28) Název: Slunce

Ročník: 9.; 1995 – 1996

Č. úlohy: 7

Text: Ve středu Slunce je vyprodukováno takové množství energie „navíc“, jaké odpovídá energii emitované Sluncem za rok. Jak se změní parametry Slunce na Zemi v průběhu jednoho roku?

### 1. Rozbor problému

Jak je patrné ze zadání, problém je velmi obecný, a proto je naším prvním úkolem jej blíže vymezit. Než začneme s vlastní analýzou úlohy, specifikujme, že energií „navíc“ rozumíme nikoli energii, která se ve Slunci pouze transformuje, ale energii, která byla do středu Slunce „přidána“, či „vložená“ a spočítáme, kolik energie vlastně Slunce za rok vyzáří.

### 2. Model

Slunce emituje energii nejen ve formě fotonů, ale též ve formě neutronů nebo ve formě slunečního větru (nabité částice). Pro náš výpočet bude postačující určit energii fotonů; tím, že nezahrneme další složky celkové vyzařované energie, vznikne chyba v řádu procent, která se v detekovatelnosti té či oné níže uvedené energetické formy neprojeví. Pro určení energie fotonů existuje samozřejmě více způsobů, mezi nejjednodušší patří využití Stefanova-Boltzmannova vyzařovacího zákona:

$$E_{\text{rok}} = \sigma T_{\text{ef}}^4 P_S \tau_r = 4\pi\sigma T_{\text{ef}}^4 R_S^2 \tau_r,$$

kde  $E_{\text{rok}}$  je celková energie,  $\sigma$  je Stefanova-Boltzmannova konstanta,  $T_{\text{ef}}$  je efektivní teplota (povrchová teplota) Slunce,  $P_S$  je plošný obsah Slunce,  $R_S$  je poloměr Slunce a  $\tau_r$  je počet sekund v roce. Vyjádřeno číselně:

$$E_{\text{rok}} \approx 5,67 \times 10^{-8} \cdot 5750^4 \cdot (7 \times 10^8)^2 \cdot 3,15 \times 10^7 \approx 1,21 \times 10^{34} \text{ J}.$$