

19. ročník, úloha I. 3 ... Armagedon (4 body; průměr 2,21; řešilo 34 studentů)

Poplach! Rudá světla indikují smrtelnou hrozbu. Směrem k Zemi se řítí meteoroid o známém průřezu S a tepelné kapacitě c . Určete, o kolik se zvýší jeho teplota během průletu atmosférou.

Předpokládejte, že se jeho rychlost stačí před dopadem ustálit a že se zahřívá rovnoměrně. Sami odhadněte, jaká část energie se spotřebuje na ohřátí vzduchu v atmosféře. Zamyslete se, jak je tento model realistický. Nakonec rozhodněte, zda bude mít meteoroid vyšší či nižší teplotu, pokud namísto vzduchem poletí vakuem, jež má nulovou tepelnou kapacitu.

Upravená úloha Karla Tůmy o padajícím kulovém kladívku.

Na úvod prozradím něco o řešení celého příkladu. Zjednodušení, která jsme při zadávání použili, jsou příliš velká. Dokonce podmínky, které jsme zadali, jsou navzájem fyzikálně neslučitelné, nemohou platit všechny zároveň.

Při zadání byly udělány tři podstatné chyby:

1. namísto teplotní kapacity c potřebujeme znát koeficient přestupu tepla λ ,
2. celý jev – průlet tělesa atmosférou – trvá méně než 10 sekund, za tento čas se nestačí ustanovit tepelná rovnováha,
3. teplota tělesa při průletu atmosférou vysoce převyšuje teplotu tání pevných látek a teplotu vypařování kapalin, proto při řešení není možné použít kalorimetrickou rovnici, musíme použít rovnici vypařování.

Nebo pouze jedna – nemělo se psát o meteoroidu a rudé hrozbě z vesmíru, ale o kameni puštěném volným pádem atmosférou.

Původně jsme vám totiž chtěli zadat příklad tak, že necháme těleso padat (volným pádem) atmosférou a pak budeme zkoumat, na jaké rychlosti se ustálí jeho rychlost a o kolik se ohřeje. Bohužel při vymýšlení zadání tak, aby bylo alespoň trochu poutavé, jsme si neuvědomili, že rychlost řekněme kladívka puštěného volným pádem a meteoroidu se liší o několik řádů. Tato malá drobnost vede k podstatně jinému chování obou těles v atmosféře.

Pokusíme se říct vám něco o meteoroidech, abyste si udělali představu o tom, jak vypadá let tělesa atmosférou při velmi vysokých rychlostech.

Energie a teplota

Rychlost, jakou meteoroid vletí do zemské atmosféry, je přinejmenším druhá kosmická rychlost. Dá se říct, že všechny meteoroidy mají rychlost v atmosféře někde mezi 10–70 km/s, čili se pohybují zhruba stokrát rychleji než kulka z pušky. Když vidíme, co dokáže kulka, jakou paseku by asi udělal meteoroid, kdyby ho atmosféra nezastavila? Kinetická energie jednoho kilogramu hmoty o rychlosti 50 km/s je

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = 1,25 \text{ GJ}, \quad (1)$$

což je zhruba 350 kWh. Toto číslo, pro porovnání, zhruba vyjadřuje spotřebu elektrické energie průměrné rodiny za jeden měsíc. Právě velké množství energie je důvodem, proč se u meteoroidu v atmosféře uplatňují efekty, se kterými nemáme v běžném životě zkušenost.

Při průletu atmosférou se meteoroid třením zahřívá.¹ Velikost tohoto zahřívání odhadneme pomocí následující úvahy. Molekuly dopadají na meteoroid rychlostí 10–70 km/s. Považujme

¹ Někteří z vás možná namítnou, že přece čím rychleji jedeme na kole, tím nám je větší zima, proto se tělesa pohybem ochlazují. Tomuto se říká *windchill effect*. Vysvětlení spočívá v tom, že ochlazování je způsobeno odpařováním vody z povrchu těla.

tuto rychlost za kinetickou rychlost molekul atmosféry a na základě ekvipartičního teorému odhadněme jeho teplotu.

$$\frac{1}{2}m_0v^2 = \frac{3}{2}kT \quad \Rightarrow \quad \frac{v_1^2}{v_2^2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (2)$$

Při rychlosti 330 m/s je kinetická teplota vzduchu 300 K. Uvedeným rychlostem pak odpovídá teplota 300 000 (rychlost 10 km/s) až 15 milionů kelvinů (rychlost 70 km/s).

Rovnice popisující meteoroid v atmosféře

V dalším výpočtu jsme zanedbali gravitační sílu, v našem případě je dostatečně malá. Vliv odporové a gravitační síly bude ve stejném poměru jako poměr jeho kinetické a rozdílu potenciální energie meteoroidu ve výšce 100 km a na povrchu Země.

$$\frac{F_o}{F_g} \approx \frac{E_{\text{kin.}}}{E_{\text{pot.}}} = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{GmM_Z \left(\frac{1}{R_Z} - \frac{1}{R_Z+h} \right)} = \frac{v^2}{v_{2k}^2} \left(1 + \frac{R_Z}{h} \right) \gg \frac{v^2}{v_{2k}^2} > 1,$$

kde $v_{2k}^2 = 2GM_Z/R_Z$ je druhá kosmická rychlost.

Na meteoroid při průletu atmosférou pak působí jenom odporová síla. Jejím působením se meteoroid zpomaluje.

$$m \frac{dv}{dt} = ma = -\Gamma S \rho v^2. \quad (3)$$

I když tato rovnice vypadá stejně jako rovnice pro odporovou sílu, nejsou to dvě stejné rovnice. Při zkoumání, jakou silou působí prostředí (kterým těleso padá) na pohybující se těleso, bylo zjištěno, že:

1. při malých rychlostech je odporová síla úměrná rychlosti v (tzv. laminární proudění),
2. při větších rychlostech je odporová síla úměrná v^2 (za obtékaným tělesem se začínají vytvářet víry, které způsobují větší brždění tělesa),
3. při rychlostech kolem rychlosti zvuku je odporová síla úměrná v^3 , před tělesem se tvoří rázová vlna, která dále podstatně zpomaluje těleso,
4. při rychlostech, které jsou podstatně větší než rychlost zvuku v prostředí (tj. rychlost, jakou se v něm pohybují molekuly), je odporová síla opět úměrná v^2 .

V případech 2 a 4 je sice odporová síla úměrná v^2 , ale fyzikálně se tyto dva případy liší.

Jak už víme, v okolí meteoroidu panuje vysoká teplota, která vede k vypařování hmoty z povrchu tělesa. Tento fyzikální děj můžeme popsat rovnicí vypařování

$$\xi \frac{dm}{dt} = -\frac{1}{2} \lambda S \rho v^3, \quad (4)$$

kde

- Γ – koeficient odporu tělesa, má stejný význam jako C_k v Newtonově rovnici pohybu tělesa v odporovém prostředí, nejsou si ale rovny.
- m – okamžitá hmotnost tělesa,
- S – efektivní průřez tělesa,
- λ – koeficient přestupu tepla,

- ξ – energie nutná k ablaci² jednotkové hmoty, jednoho kilogramu. Je vyšší než měrné skupenské teplo vypařování.
- ρ, v – okamžitá hustota atmosféry a rychlost tělesa.

V dalších úvahách budeme využívat ablační koeficient σ daný vztahem

$$\sigma = \frac{\lambda}{2\xi\Gamma}. \quad (5)$$

Jednoduchým dosazením rovnic do sebe dostaneme první integrál, závislost hmotnosti tělesa na rychlosti

$$m = m_\infty \exp\left(\frac{1}{2}\sigma(v^2 - v_\infty^2)\right),$$

kde m_∞, v_∞ jsou počáteční hmotnost a rychlost meteoroidu před vstupem do atmosféry.

Rovnice (3) a (4) vedou k plnému popisu pohybu tělesa v atmosféře za předpokladu, že těleso ztrácí hmotu pouze ablací. To ale není pravda ve všech případech.

	v= konst.	rovn. zahřívání	dopadne na Zem
mikrometeoroid	ANO	ANO	NE
meteor	ANO	NE	NE
bolid	NE	NE	NE
„Tunguzka“	NE	NE	ANO/NE ³
planetka (\varnothing 1 km)	ANO	ANO/NE ⁴	ANO

Tabulka popisuje, jak meteoroid, v závislosti na velikosti, splňuje podmínky zadání.

Realita

Když mluvíme o pohybu tělesa v atmosféře, rozlišujeme tři pojmy: *meteoroid*, *meteor*, *meteorit*.

- Meteoroid – tělísko nebo těleso meziplanetárního původu, které obíhá kolem Slunce. V našem smyslu je to samotné hmotné těleso, které popisujeme během letu atmosférou.
- Meteor – samotné světlo, které vidí pozorovatel koukající se na oblohu. Velice jasný meteor se jmenuje *bolid*.

²⁾ *Ablace* je proces, při kterém ztrácí meteoroid svou hmotu vlivem drolení a tavení povrchu. Z povrchu se oddělují úlomky, vznikají z nich roztavené kapky a vypařuje se hmota. Materiál, ze kterého je meteoroid, je většinou velice křehký. Můžete si to představit tak, že vezmete sklenici a prudce ji zahřejete. Sklenice vám popraská. Stejný proces, na efekt ještě lepší, probíhá při ochlazení, protože rychle ochladit sklo je mnohem jednodušší než ho prudce zahřát. Prudce ji ponoříte do vody. Sklo popraská, a když byla původní teplota dostatečně vysoká, tak se rozdrolí na malé kousky. Podobný proces probíhá i na povrchu meteoroidu.

Tento efekt se využívá i v praxi. Např. mise Apollo používala ablační štíty, které díky odpařování kovu na povrchu chránily vlastní kosmickou loď při přistání před roztavením.

³⁾ Křehká tělesa o průměru desítek metrů se dostanou do dolní části atmosféry, kde explodují. Jejich zbytky ve formě malých skleněných kuliček, *sféru*, spadnou na zem.

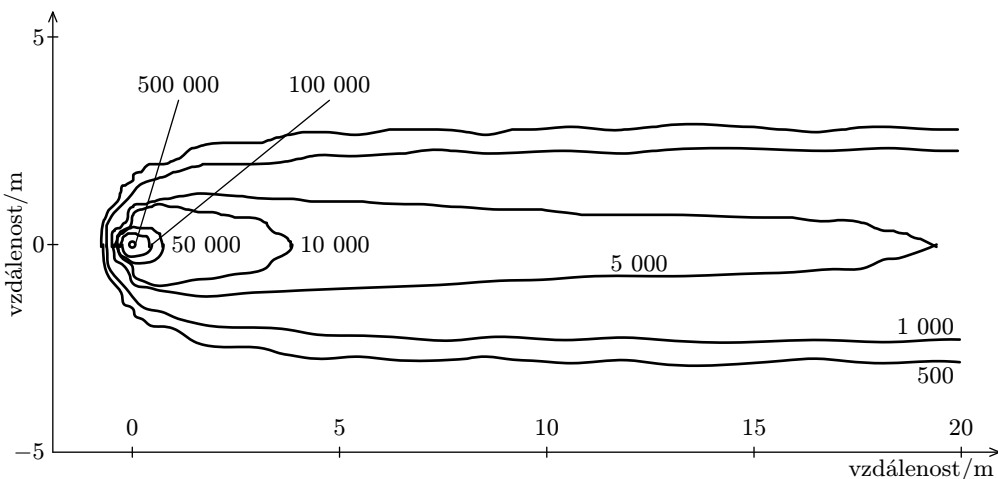
⁴⁾ Kromě malé části povrchu se nezahřeje vůbec, až při samotném dopadu na povrch Země.

- Meteorit – pozůstatek meteoroidu, který dopadl na povrch Země. Na to, aby meteoroid dopadl na povrch jako meteorit, musí mít malou rychlost a velkou hmotnost. Menší tělesa se při letu atmosférou zbrzdí asi na rychlost 3 km/s, přestanou svítit a pak padají atmosférou volným pádem. Jejich dopadová rychlost je v řádu desítek metrů za sekundu. Větší tělesa se nezbrzdí na tuto rychlost a narazí na povrch rychlostí několik kilometrů za sekundu. Těmto se říká *impaktní meteority*.

Pojďme si teď rozebrat jednotlivé případy letu tělesa atmosférou, v závislosti na jejich hmotnosti.

Mikrometeoroid

Mikrometeoroid je tak málo hmotné těleso Sluneční soustavy, že se v atmosféře zbrzdí dříve, než se stačí dostatečně ohřát. Jeho hmotnost je 10^{-18} až 10^{-12} kg a průměr menší než 10 μm .



Obr. 1. Rozložení teploty atmosféry v okolí meteoroidu dle modelu Iaina Boyda.

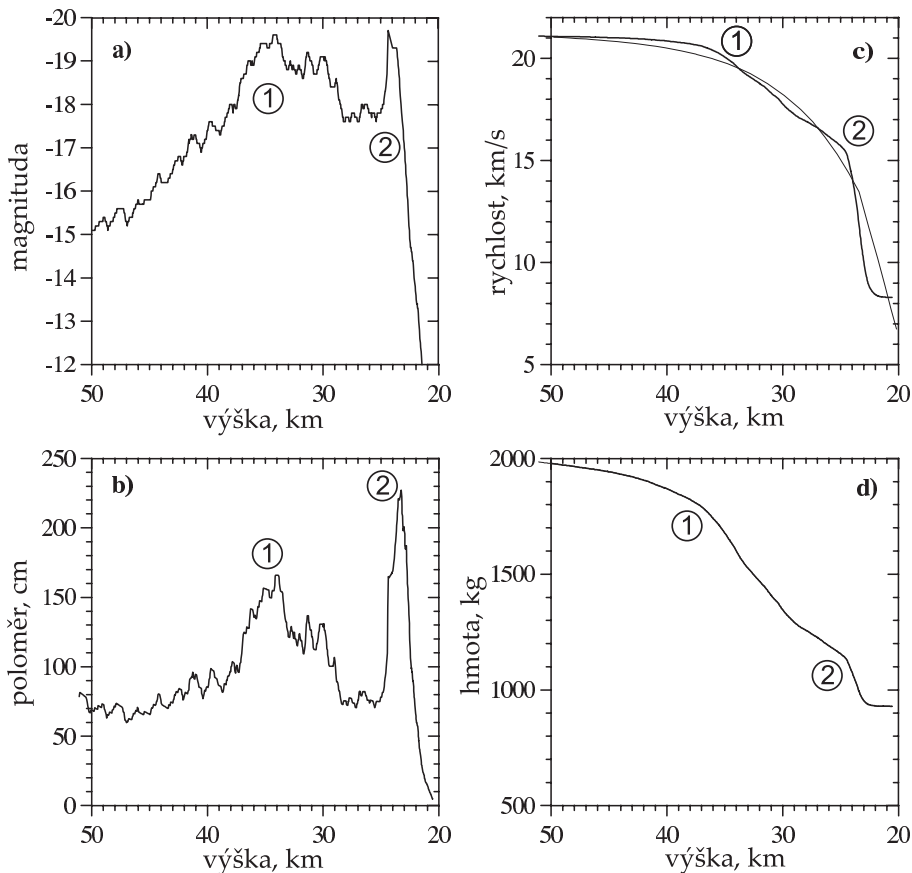
Meteor

Meteor je samotné světlo, které někdy vidíme na noční obloze. Říká se mu též padající hvězda. Tělesa hmotnější než mikrometeoroidy se dostatečně zahřejí, aby začaly zářit. Samotný meteoroid moc nezáří (jeho teplotu udržuje ablace na několika tisících kelvinů), světlo vychází především ze stopy za meteoroidem, z teplé plazmy o teplotě zhruba 4 000 K. Samotná plazma není v tepelné rovnováze, v jejím spektru lze nalézt i čáry, které odpovídají teplotám kolem 10 000 K. Rozložení teploty kolem meteoroidu můžeme vidět na obrázku 1.

Velká většina meteoroidů pochází z komet, mají tedy podobné složení. Současný model předpokládá, že meteoroidy jsou takové malé „prachové koule“. Jednotlivá křemičitanová zrna (jejich průměr je kolem 100 μm a teplota tání kolem 3 000 K) jsou slepena těžkými látkami s nižší teplotou tání (kolem 1 300 K), které se odpaří jako první. Následkem toho po jistém čase pokračuje dále shluk zrn nezávisle na sobě a prochází ablací nezávisle. Do svého úplného vypaření svou rychlost zrna prakticky nezmění. Meteory začínají svítit ve výšce kolem 100 km a končí ve výšce 80 kilometrů. Začátek a konec dráhy na hmotnosti nezávisí, pouze na vstupní rychlosti.

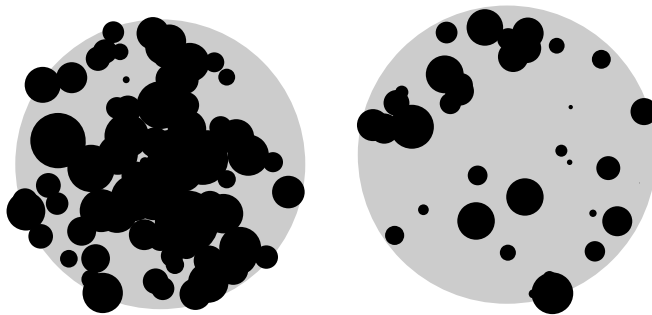
Bolid

Větší tělesa (o hmotnosti desítek gramů a více, přičemž jas silně závisí na rychlosti: rychlý meteoroid produkuje stejné množství světla při podstatně menší hmotnosti) jsou natolik jasná, že v noci osvětlí okolí tak, že předměty vrhají stíny. Často se stane, že tyto meteory vybuchují, prudce zvyšují svoji jasnost. Je to způsobeno tím, že v jistém okamžiku u nich dochází k rozlomení – fragmentaci – a dále pokračují v letu. Dynamický tlak dosahuje až 10 MPa/m^2 .⁵ Při větších tělesech se už tékavý materiál mezi zrny nestihne vypařit dříve, než začne těleso svítit. Rozpadem meteoroidu dojde k prudkému vypaření tohoto materiálu, zvýšení odporu vzduchu (dle rovnice (3) je zrychlení $a \sim 1/R$) a většímu zrychlení. Při skutečně velkých bolidech zaznamenají okamžik rozlomení i pozemní seismické stanice.



Obr. 2. Bolid Benešov

⁵⁾ Zkuste si najít křehký materiál, vezměte ho do dlaně a zkuste ho zmáčknout. Jak budete pomalu zvyšovat svou sílu, najednou se vám celý rozsype na mnoho malých částí. Stejný proces se děje i s meteoroidem.



Obr. 3. Vlevo je zjednodušený model chondritu, vpravo meteoroidu pocházejícího z komety. Šedá hmota není prázdný prostor, ale těkavější složka, u Leonidy částečně smíchaná s ledem.

Na obrázku 2 jsou tato místa označena 1 a 2. U tohoto bolidu vidíme, že se rozpadl dokonce dvakrát. Pro velká tělesa s hmotností několika tun je to běžná záležitost. Pro chování bolidů jsou podstatná dvě čísla – jejich hustota a ablační koeficient. Hustota kolísá většinou mezi 600 až 2500 kg/m³. Čím je hustota nižší, tím více je meteoroid složen z těkavých látek a tím větší je pravděpodobnost, že se při svém letu rozpadne. S hustotou souvisí i ablační koeficient. Čím je vyšší, tím poréznější a křehčí materiál tvoří meteoroid. Na porovnání si vezměme jako příklad meteoroid pocházející z komety Tempel-Tuttle (tyto meteoroidy se jmenují Leonidy) a meteoroid pocházející z pásma asteroidů, složením velice podobný kamení (*chondrit*). Leonida má $\sigma = 0,16 \text{ s}^2/\text{km}^2$ a $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$, chondrit $\sigma = 0,02 \text{ s}^2/\text{km}^2$ a $\rho = 3000 \text{ kg/m}^3$.

Meteorit

Dále budeme hovořit pouze o chondritech čili o kamení. O tom, proč na Zemi nedopadne těleso o nízké hustotě, si povíme v další části. Maximální rychlost meteoroidu, aby se celý nevypařil v atmosféře, je kolem 30 km/s. Jestliže vstupuje do atmosféry malou rychlostí (druhou kosmickou) a pod malým úhlem, stačí mu jen několik kilogramů k tomu, aby část dopadla jako meteorit.

V případě, že se tělesu podaří snížit svou rychlost na 3 km/s, jeho teplota se sníží natolik, že přestane probíhat ablace. Následně jej okolní vzduch zbrzdí a těleso padá k zemi volným pádem. Trvá mu několik minut, než dopadne. Jelikož se zahřívá pouze povrch (do hloubky max. několika milimetrů), vnitřek meteoroidu zůstal netknutý. Na povrchu se, v důsledku přetavení, vytvoří černá kůra. Podle ní poznáme meteority poměrně snadno, i když si je lze někdy mylně zaměnit např. se struskou.

Skutečně velká tělesa

30. července 1908 vybuchl nad Sibiří blízko řeky Podkamennaja Tunguzka obrovský meteoroid. Jeho průměr se odhaduje zhruba na 100 metrů. Svým výbuchem ve výšce zhruba 8 km nad zemí zničil obrovské území. Jednalo se pravděpodobně o úlomek komety. Kdyby bylo toto těleso chondrit, dopadlo by až na Zemi a vyhloubilo by meteorický kráter. Navíc, pozůstatky komet mají vyšší rychlost než kamenné meteoroidy, pocházející z pásu asteroidů.

Na Zemi můžeme najít stovky kráterů, které tady vytvořila vesmírná tělesa. Soudí se, že jedno takové těleso pomohlo dinosaurům odejít na evoluční odpočinek. Aby se nám nestala stejná nehoda, běží několik projektů, které mají za úkol najít všechna tělesa větší než 1 kilometr, která by v budoucnu mohla zasáhnout Zemi – zmiňme např. projekt LINEAR. Proto

nepodceňujme červená světýlka, blikající a varující před srážkou s meteoroidem – pohled na nádherný bolid letící atmosférou by mohl být pro nás tím posledním, co vůbec uvidíme.

Teplota ve vakuu

Co se týče teploty meteoroidu ve vakuu, většina z vás správně podotkla, že jelikož vakuum neobsahuje žádné částice, meteoroid se zpomalovat nebude. Proto bude mít pořád stejnou teplotu.

K malé výměně energie ale docházet bude, a to zářením. Meteoroid obíhá kolem Slunce a jeho vzdálenost se mění – v různých částech své dráhy přijímá více nebo méně slunečního záření. Pak bude i jeho teplota kolísat, ale podstatně pomaleji než při průletu atmosférou.

Komentáře k řešení

Mnoho z vás zarazily dvě věci: chybějící proměnné a to, že alespoň nějaký výsledek se dá získat více způsoby. Při výpočtu jste dostali více navzájem různých výsledků. Všechno to ale byly odhady, některé lepší, některé horší. Fyzika ale není o tom, vzít množinu písmenek ze zadání a z nich zkombinovat správný vzorec, ale popsát přírodní děj tak, abychom dovedli dopředu říct, jak se bude chovat a vyvíjet v čase.

Pavol Habuda

bzuc0@fykos.mff.cuni.cz