

Úvod

Meteoroid je malé těleso (obvykle menší než 1 m) z komety nebo asteroidu. Meteoroid, který zasáhne povrch země, se nazývá meteoritem.

V noci 17. ledna 2009 mnoho lidí kolem Baltského moře zahlédlo zářící trasu ohnivé koule meteoroidu padajícího zemskou atmosférou. Bezpečnostní kamera ve Švédsku zaznamenala tuto událost na video, viz Obr. 1.1(a). Pomocí těchto obrázků a pozorování očitých svědků bylo možné odhadnout místo dopadu a o šest týdnů později byl nalezen meteorit o hmotnosti 0,025 kg v okolí města Maribo na jihu Dánska. Měření meteoritu, nyní pojmenovaném meteorit Maribo a jeho dráha na obloze ukázaly zajímavé výsledky. Jeho rychlost při vstupu do atmosféry byla výjimečně vysoká. Jeho stáří, $4,567 \cdot 10^9$ let, naznačuje, že byl zformován krátce po zrodu sluneční soustavy. Meteorit Maribo je pravděpodobně částí Enckeovy komety.

Rychlost meteoritu Maribo

Ohnivá koule se pohybovala západním směrem, směřujíc pod úhlem 285° vzhledem k severu směrem k místu, kde byl meteorit následně nalezen, jak je načrtnuto na Obr. 1.1. Meteorit byl nalezen 195 km od bezpečnostní kamery ve směru 230° vzhledem k severu.

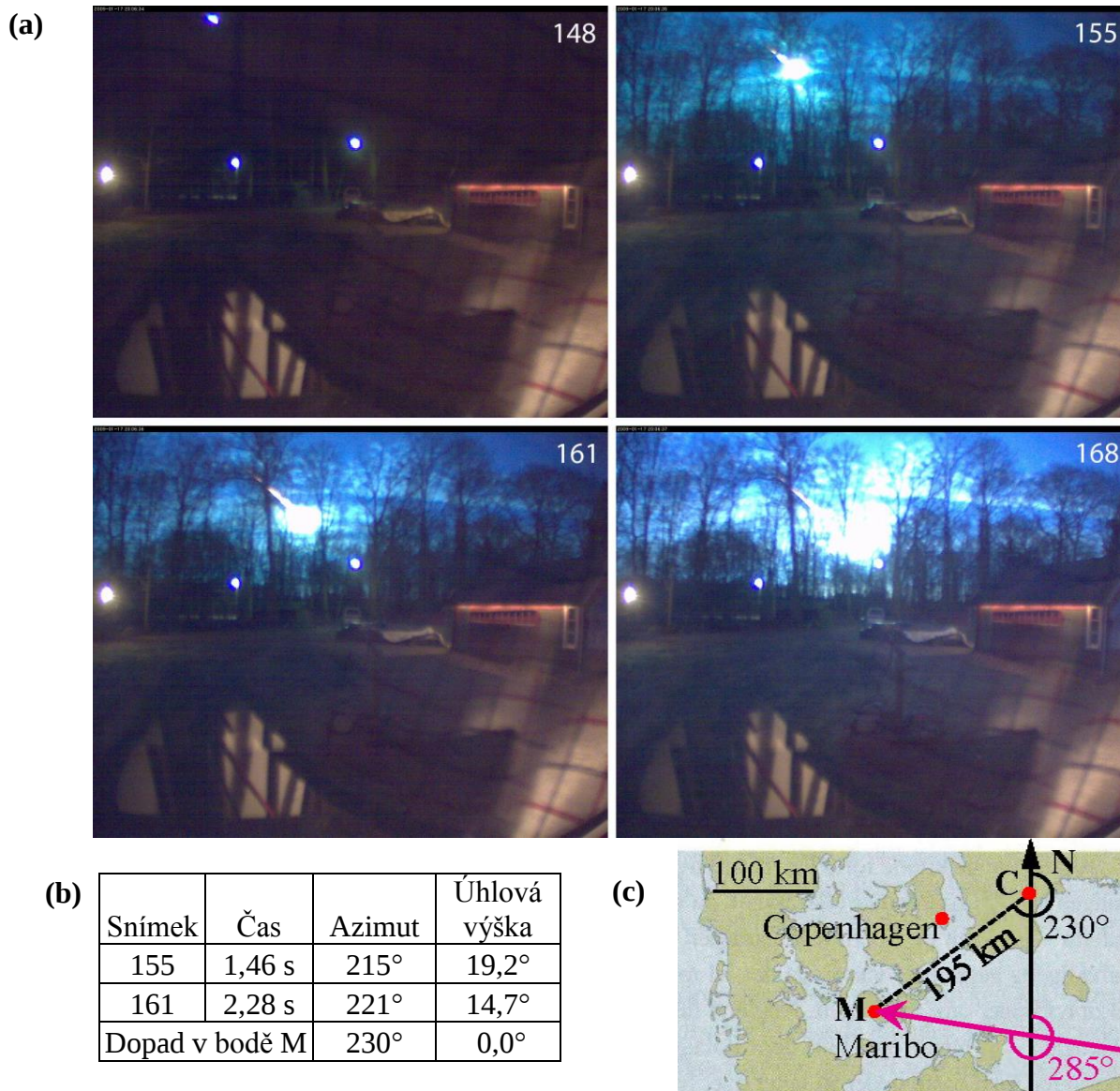
1.1	Použijte tyto informace a data na Obr. 1.1 k vypočtení průměrné rychlosti meteoritu Maribo v časovém intervalu mezi snímky 155 a 161. Zanedbejte zakřivení Země a gravitační působení na meteoroid.	1,3
-----	---	-----

Roztavení při průchodu atmosférou?

Odpor vzduchu působící na meteoroid, který se pohybuje ve vyšších vrstvách atmosféry, závisí komplikovaným způsobem na tvaru a rychlosti meteoroidu a na teplotě a hustotě atmosféry. Jako rozumnou aproximaci lze použít odporovou sílu F , která je ve vyšších vrstvách atmosféry dána vztahem $F = k\rho_{\text{atm}}Av^2$, kde k je konstanta, ρ_{atm} hustota atmosféry, A obsah průřezu meteoritu kolmého na směr pohybu a v jeho rychlost.

Použijeme následující zjednodušující předpoklady pro analýzu meteoroidu: Objekt vstupující do atmosféry byla koule o hmotnosti $m_M = 30$ kg, poloměru $R_M = 0,13$ m, teplotě $T_0 = 200$ K, a rychlosti $v_M = 2,91 \cdot 10^4$ m/s. Hustota atmosféry je konstantní (její hodnota je rovna hustotě atmosféry ve 40 km nad povrchem Země), $\rho_{\text{atm}} = 4,1 \cdot 10^{-3}$ kg/m³, a součinitel odporu je $k = 0,60$.

1.2a	Určete, za jak dlouho po vstupu do atmosféry se zmenší rychlost meteoroidu o 10 % z v_M na $0,90 v_M$. Zanedbejte gravitační sílu. Předpokládejte, že hmotnost a kulový tvar zůstávají zachovány.	0,7
1.2b	Vypočtete, kolikrát je kinetická energie meteoroidu vstupujícího do atmosféry E_{kin} větší, než energie E_{melt} potřebná pro jeho úplné roztavení. Potřebné konstanty naleznete v tabulce na listu dat.	0,3



Obrázek 1.1 (a) Azimut je úhlový směr měřený v horizontální rovině po směru hodinových ručiček od severního směru. Úhlová výška je úhel, pod kterým je objekt vidět nad horizontem. Série snímků zaznamenaná bezpečnostní kamerou ve Švédsku, která ukazuje pohyb meteoritu Maribo jako ohnivá koule atmosférou směrem k povrchu Země. (b) Data ze dvou snímků ukazující čas, směr (azimut) ve stupních, jak je viděn kamerou (C) a úhlovou výšku nad horizontem ve stupních. (c) Náčrtek směru cesty meteoritu Maribo (purpurová šipka (magenta)) vzhledem k severu (N) a místu dopadu (M) v Dánsku, jak byla viděna kamerou (C).

Zahřívání meteoritu Maribo při jeho průchodu atmosférou

Když kamenný meteorit Maribo vstoupil do atmosféry nadzvukovou rychlostí, jevil se jako ohnivá koule, jelikož rozzářil vzduch, který ho obklopoval. I přesto byla rozžhavená pouze vnější vrstva meteoritu Maribo. Předpokládejte, že meteorit Maribo je homogenní koule s hustotou ρ_{sm} , měrnou tepelnou kapacitou c_{sm} , a tepelnou vodivostí k_{sm} (podívejte se do tabulky fyzikálních konstant pro konkrétní hodnoty). Při vstupu do atmosféry měl teplotu $T_0 = 200$ K. Během průchodu atmosférou

měla díky odporu vzduchu jeho povrchová teplota konstantní hodnotu $T_s = 1000 \text{ K}$, což vedlo k postupnému zahřívání jeho vnitřku.

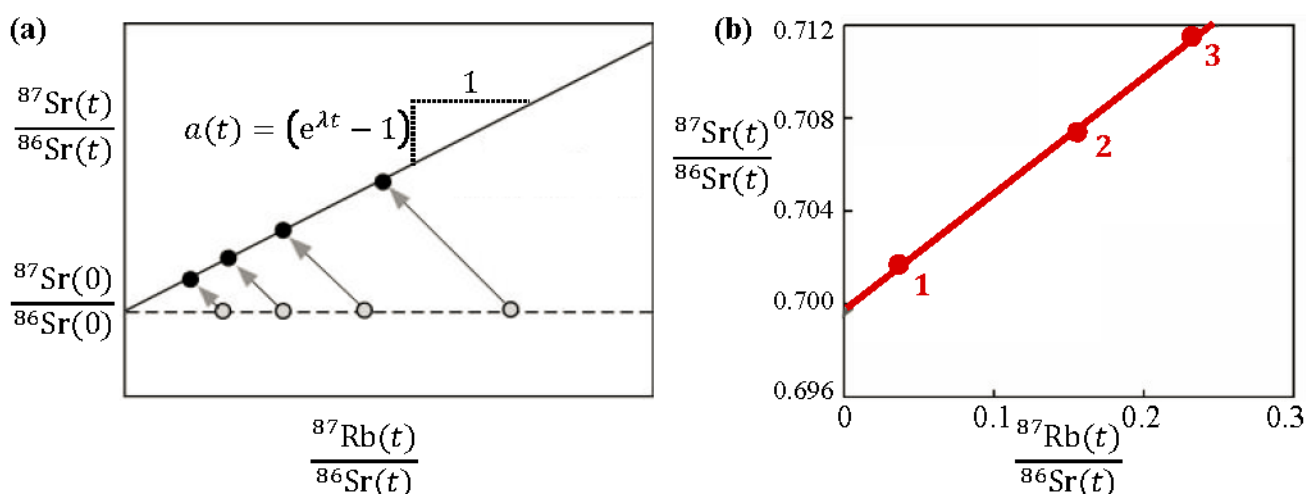
Během průchodu atmosférou se za čas t zahřála vnější vrstva meteoritu Maribo o tloušťku x na teplotu značně větší než T_0 . Tato tloušťka může být odhadnuta pomocí rozměrové analýzy jako součin mocnin termodynamických parametrů: $x \approx t^\alpha \rho_{\text{sm}}^\beta c_{\text{sm}}^\gamma k_{\text{sm}}^\delta$.

1.3a	Určete hodnoty čtyř mocnin α , β , γ , a δ pomocí rozměrové analýzy.	0,6
1.3b	Vypočtete tloušťku x po pádu trvajícím $t = 5 \text{ s}$, a určete poměr x/R_M .	0,4

Stáří meteoritu

Chemické vlastnosti radioaktivních prvků mohou být různé, proto při krystalizaci minerálů v daném meteoritu budou mít některé minerály velký obsah určitého radioaktivního prvku a jiné jeho obsah nízký. Tento rozdíl může být použit pro určení stáří meteoritu radiometrickým datováním jeho radioaktivních minerálů.

Jako konkrétní příklad jsme studovali izotop ^{87}Rb (atomové číslo 37), který se rozpadá na stabilní izotop ^{87}Sr (atomové číslo 38) s poločasem rozpadu $T_{1/2} = 4,9 \cdot 10^{10} \text{ let}$, v porovnání s jiným stabilním izotopem ^{86}Sr . V momentě krystalizace byl poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ stejný pro všechny minerály, zatímco poměr $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ byl odlišný. V průběhu času klesá z důvodu radioaktivního rozpadu množství ^{87}Rb a v důsledku tak roste množství ^{87}Sr . Výsledkem bude, že poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ bude dnes jiný než v momentě krystalizace. Na Obr. 1.2(a) příslušejí body na vodorovné přímce poměru $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ v různých minerálech v momentě, kdy zkrystalizovaly.



Obrázek 1.2 (a) Poměr $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ v různých minerálech v momentě krystalizace v čase $t = 0$ (prázdná kolečka) a v současnosti (plná kolečka). **(b)** Izochronní přímka pro tři různé vzorky minerálů odebrané z meteoritu v současnosti.

1.4a	Napište rovnici radioaktivního rozpadu pro přeměnu $^{87}_{37}\text{Rb}$ na $^{87}_{38}\text{Sr}$.	0,3
1.4b	Ukažte, že závislost poměru $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na poměru $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (oba v současnosti) pro různé minerály ze stejného meteoritu tvoří přímku, tzv. izochronní přímku, se sklonem $a(t) = (e^{\lambda t} - 1)$. Zde t značí čas od počátku formování minerálů, zatímco λ je rozpadová konstanta nepřímo úměrná poločasu rozpadu $T_{1/2}$.	0,7

1.4c	Určete stáří meteoritu τ_M pomocí izochronní přímky na Obr. 1.2(b).	0,4
------	--	-----

Enckeova kometa, z které meteorit Maribo může pocházet

Na své oběžné dráze kolem Slunce je minimální respektive maximální vzdálenost mezi Enckeovou kometou a Sluncem $a_{\min} = 4,95 \cdot 10^{10}$ m respektive $a_{\max} = 6,16 \cdot 10^{11}$ m.

1.5	Vypočtete dobu oběhu t_{Encke} Enckeovy komety.	0,6
-----	--	-----

Následky dopadu asteroidu na Zemi

Před 65 miliony lety byla Země zasažena obrovským asteroidem o hustotě $\rho_{\text{ast}} = 3,0 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, poloměru $R_{\text{ast}} = 5,0 \text{ km}$, dopadovou rychlostí $v_{\text{ast}} = 2,5 \cdot 10^4 \text{ m/s}$. Tento dopad vyústil ve vyhlazení většiny života na Zemi a k vytvoření ohromného Chicxulubského kráteru. Předpokládejme, že by dnes stejný asteroid zasáhl Zemi dokonale nepružnou srážkou a použijte fakt, že moment setrvačnosti Země je roven 0,83 násobku momentu setrvačnosti homogenní koule o stejné hmotnosti a poloměru. Moment setrvačnosti homogenní koule o hmotnosti M a poloměru R je $\frac{2}{5}MR^2$. Neberte v úvahu žádné změny v oběžné dráze Země.

1.6a	Nechť asteroid zasáhne severní pól. Nalezněte maximální změnu úhlového odchýlení zemské osy po dopadu.	0,7
1.6b	Nechť asteroid zasáhne rovník v radiálním směru. Nalezněte změnu $\Delta\tau_{\text{vrt}}$ doby jednoho otočení Země po dopadu.	0,7
1.6c	Nechť asteroid zasáhne rovník v tečném směru v rovině rovníku. Nalezněte změnu $\Delta\tau_{\text{tan}}$ doby jednoho otočení Země po dopadu.	0,7

Maximální rychlost dopadu

Uvažte nebeské těleso, gravitačně vázané ve sluneční soustavě, které dopadne na povrch Země rychlostí v_{imp} . Na počátku děje neberte v úvahu gravitační pole Země působící na těleso. Neberte v úvahu tření v atmosféře, působení dalších nebeských těles a rotaci Země.

1.7	Vypočtete $v_{\text{imp}}^{\max}$, největší možnou hodnotu v_{imp} .	1,6
-----	--	-----