

## Úvod

*Meteoroid* je malé teleso (s typickými rozmermi menšími ako 1 m) pochádzajúce z kométy alebo asteroidu. Meteoroid, ktorý dopadne na zem, sa nazýva *meteorit*.

V noci 17. januára 2009 zazrelo veľa ľudí pri Baltickom mori žiariacu stopu ohnivého telesa meteoroidu, ktorý vstúpil do atmosféry Zeme. Vo Švédsku zaznamenala sledovacia kamera videozáznam udalosti, pozri obr. 1.1 (a). Pomocou tohto záznamu a pozorovania očitých svedkov sa podarilo zúžiť oblasť dopadu a o šesť týždňov sa podarilo nájsť meteorit s hmotnosťou 0,025 kg v blízkosti mesta Maribo v južnom Dánsku. Merania uskutočnené na meteorite, ktorý dostal názov Maribo, a skúmanie jeho trajektórie na oblohe priniesli zaujímavé výsledky. Jeho rýchlosť pri vstupe do atmosféry bola mimoriadne vysoká. Jeho vek  $4,567 \times 10^9$  roka ukázal, že sa vytvoril krátko po vzniku slnečnej sústavy. Meteorit Maribo je pravdepodobne úlomok kométy Encke.

## Rýchlosť Maribo

Ohnivé teleso sa pohybovalo západne, presne  $285^\circ$  voči severnému smeru, k miestu, kde sa potom meteorit našiel, pozri obrázok 1.1. Meteorit sa našiel vo vzdialenosti 195 km od sledovacej kamery v smere pod uhlom  $230^\circ$  voči severnému smeru.

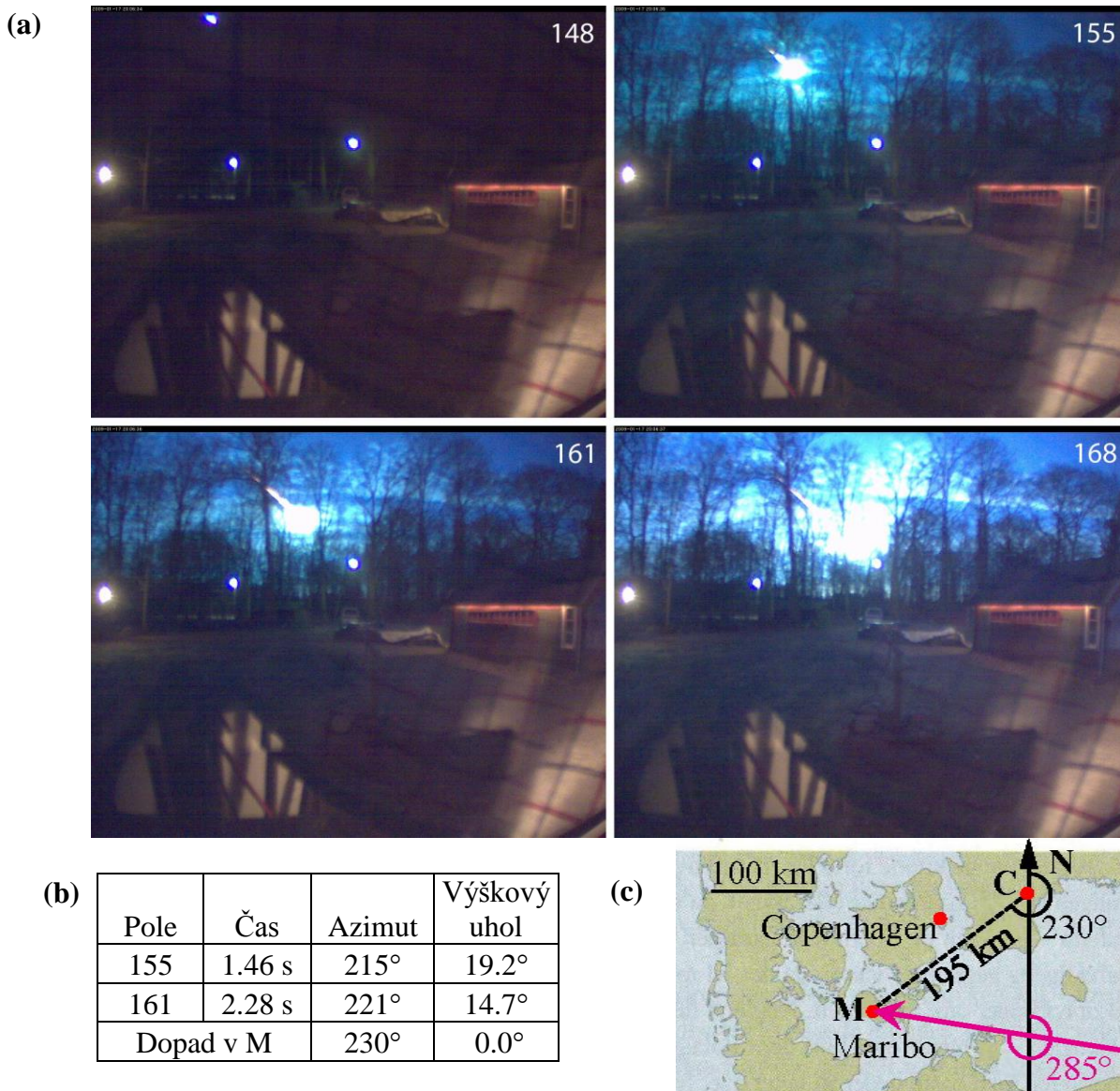
1.1	Pomocou údajov a informácií z obr. 1.1 vypočítajte priemernú rýchlosť Maribo v časovom intervale medzi políčkami 155 a 161. Zakrivenie povrchu Zeme a pôsobenie gravitačných síl na meteoroid možno zanedbať.	1.3
-----	---	-----

## Prechod atmosférou a topenie sa?

Trenie medzi vzduchom a meteoroidom, ktorý sa pohybuje v horných vrstvách atmosféry, závisí zložitým spôsobom od tvaru a rýchlosti meteoroidu ako aj od teploty a hustoty atmosféry. Ako rozumnú možno uvažovať aproximáciu sily  $F$  trenia v hornej vrstve atmosféry vzťahom  $F = k \rho_{\text{atm}} A v^2$ , kde  $k$  je konštanta,  $\rho_{\text{atm}}$  hustota atmosféry,  $A$  obsah priečného prierezu telesa a  $v$  jeho rýchlosť.

Na analýzu meteoroidu sa použili nasledujúce zjednodušenia: Teleso vstupujúce do atmosféry malo tvar gule s hmotnosťou  $m_M = 30$  kg, polomerom  $R_M = 0,13$  m, teplotou  $T_0 = 200$  K a malo rýchlosť  $v_M = 2,91 \times 10^4$  m/s. Hustota atmosféry bola konštantná (hodnota vo výške 40 km nad povrchom Zeme)  $\rho_{\text{atm}} = 4,1 \times 10^{-3}$  kg/m<sup>3</sup> a koeficient trenia  $k = 0,60$ .

1.2a	Určte čas od vniknutia do atmosféry, za ktorý poklesne rýchlosť asteroidu o 10 % z hodnoty rýchlosti $v_M$ na hodnotu $0,90 v_M$ .	0.7
1.2b	Vypočítajte, koľkokrát je kinetická energia $E_{\text{kin}}$ meteoroidu pri vstupe do atmosféry väčšia ako energia $E_{\text{melt}}$ potrebná na jeho úplné roztopenie (pozrite tabuľku Data sheet).	0.3



**Obrázok 1.1** (a) Vybrané polia videozáznamu sledovacej kamery vo Švédsku, ukazujúce prelet ohnivého telesa Maribo atmosférou. (b) Dáta prislúchajúce jednotlivým poliam záznamu ukazujúce čas, vodorovný smer (azimut) v stupňoch a výškový uhol nad horizontom v stupňoch. (c) Nákres trajektórie (fialová šípka) Maribo voči smeru na sever (N) a miestu dopadu (M) v Dánsku ako bola zaznamenaná kamerou (C).

### Zohrievanie Maribo v priebehu prechodu atmosférou

Keď kamenný meteoroid Maribo vstúpil do atmosféry nadzvukovou rýchlosťou, javil sa ako ohnivá guľa v dôsledku žiarenia okolitého vzduchu. Pritom sa zohrievala iba povrchová vrstva Maribo. Predpokladajte, že Maribo je homogénna guľa s hustotou  $\rho_{sm}$ , mernou tepelnou kapacitou  $c_{sm}$  a tepelnou konduktivitou  $k_{sm}$  (hodnoty pozrite v tabuľke hodnôt). Ďalej, teleso vstúpilo do atmosféry s teplotou 200 K, ale počas prechodu atmosférou bola jeho povrchová teplota konštantná a rovná  $T_s = 1\,000\text{ K}$  v dôsledku trenia o vzduch, čo spôsobilo postupné zohrievanie vnútrajšku telesa.

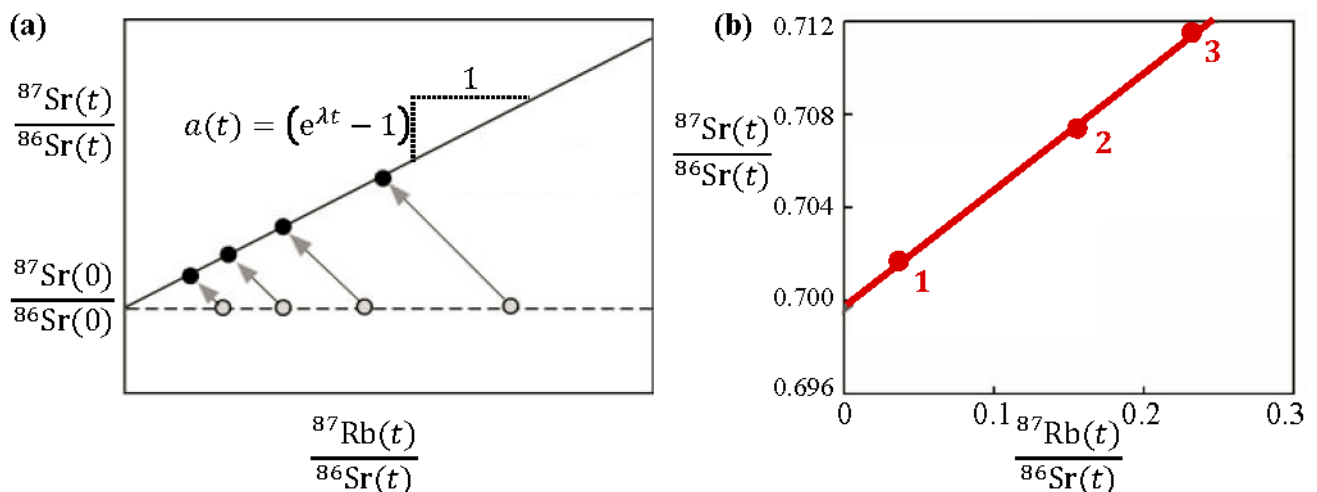
V priebehu času  $t$  po vstupe do atmosféry sa vonkajšia vrstva Maribo s hrúbkou  $x$  zohrial na teplotu podstatne vyššiu ako  $T_0$ . Túto hrúbku možno odhadnúť pomocou rozmerovej analýzy výrazu pozostávajúceho zo súčinu mocnín termodynamických parametrov:  $x \approx t^\alpha \rho_{sm}^\beta c_{sm}^\gamma k_{sm}^\delta$ .

1.3a	Pomocou rozmerovej (jednotkovej) analýzy určte hodnoty exponentov $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ a $\delta$ .	0.6
1.3b	Určte hrúbku $x$ po uplynutí času $t = 5$ s a určte pomer $x/R_M$ .	0.4

## Vek meteoritu

Chemické vlastnosti rádioaktívnych izotopov a produktov ich premeny sú rôzne, takže v priebehu kryštalizácie minerálov v danom meteorite majú niektoré minerály vyšší obsah konkrétneho rádioaktívneho izotopu a nízky obsah produktov premeny a iné naopak.

Ako osobitný príklad pozrieme izotop  $^{87}\text{Rb}$  (prvok s at. číslom 37), ktorý sa mení na stabilný izotop  $^{87}\text{Sr}$  (prvok s at. číslom 38) s polčasom premeny  $T_{1/2} = 4,9 \times 10^{10}$  roka, relatívne voči stabilnému izotopu  $^{86}\text{Sr}$ . V čase kryštalizácie bol pomer  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  rovnaký vo všetkých mineráloch, ale pomer  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  sa líšil. V priebehu času podiel  $^{87}\text{Rb}$  klesal v dôsledku premeny, čím sa následne zvyšoval obsah  $^{87}\text{Sr}$ . Následkom toho je dnešný pomer  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  odlišný. Na obr. 1.2 (a) udávajú body na vodorovnej čiare pomer  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  v rôznych materiáloch v čase, keď skryštalizovali.



**Obrázok 1.2** (a) Pomer  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  v rôznych mineráloch a v čase  $t = 0$  ich kryštalizácie (prázdne krúžky) a v súčasnosti (plné krúžky). (b) Izochronická (rovnaký čas) priamka pre tri rôzne vzorky minerálov získaných z meteoritu v súčasnosti.

1.4a	Napíšte rovnicu premeny $^{87}_{37}\text{Rb}$ na $^{87}_{38}\text{Sr}$ .	0.3
1.4b	Ukážte, že graf súčasného pomeru $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ako funkcie súčasného pomeru $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ v rôznych vzorkách minerálov z toho istého meteoritu predstavuje tzv. izochrónnu priamku, so smernicou $a(t) = (e^{\lambda t} - 1)$ , kde $t$ je čas od vzniku minerálov a $\lambda$ koeficient premeny nepriamo úmerný polčasu premeny $T_{1/2}$ .	0.7
1.4c	Určte vek $\tau_M$ meteoritu s použitím izochrónnej priamky na obr. 1.2(b).	0.4

## Kométa Encke, z ktorej môže Maribo pochádzať

Na orbite okolo Slnka dosahuje vzdialenosť medzi kométou Encke a Slnkom minimálnu a maximálnu vzdialenosť  $a_{\min} = 4,95 \times 10^{10}$  m a  $a_{\max} = 6,16 \times 10^{11}$  m.

1.5	Určte periódu $t_{\text{Encke}}$ orbitálneho pohybu kométy Encke.	0.6
-----	---	-----

## Následky dopadu asteroidu na Zem

Pred 65 miliónmi rokov zasiahol Zem obrovský asteroid s hustotou  $\rho_{\text{ast}} = 3,0 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , polomerom  $R_{\text{ast}} = 5,0$  km a konečnou rýchlosťou  $v_{\text{ast}} = 2,5 \times 10^4$  m/s. Tento dopad spôsobil zánik väčšiny života na Zemi a vytvorenie obrovského kráteru Chicxulub Crater. Predpokladajme, že rovnaký asteroid zasiahne Zem dnes, pričom zrážka je dokonale nepružná, a že moment zotrvačnosti Zeme je 0,83 násobkom momentu zotrvačnosti homogénnej gule s rovnakou hmotnosťou a rovnakým polomerom. Moment zotrvačnosti homogénnej gule s hmotnosťou  $M$  a polomerom  $R$  je  $(2/5)MR^2$ . Zanedbajte zmeny orbitálnej trajektórie Zeme.

1.6a	Nech zasiahne asteroid severný pól. Určte maximálne možné uhlové vychýlenie smeru zemskej osi v dôsledku dopadu.	0.7
1.6b	Nech asteroid dopadne kolmo na rovník v radiálnom smere. Určte maximálnu zmenu $\Delta\tau_{\text{vrt}}$ periódy rotácie Zeme v dôsledku dopadu.	0.7
1.6c	Nech asteroid dopadne na rovník vo vodorovnom (tangenciálnom) smere. Určte maximálnu možnú zmenu $\Delta\tau_{\text{tan}}$ periódy rotácie Zeme v dôsledku dopadu.	0.7

## Minimálna a maximálna rýchlosť dopadu

Uvažujte nebeské teleso gravitačne viazané v slnečnej sústave, ktoré dopadne na povrch Zeme rýchlosťou  $v_{\text{imp}}$ . Na začiatku vplyv gravitácie Zeme neuvažujte. Neuvažujte trenie v atmosfére, vplyv ďalších nebeských telies a rotácie Zeme.

1.7	Určte $v_{\text{imp}}^{\max}$ , najväčšiu možnú hodnotu rýchlosti $v_{\text{imp}}$ .	1.6
-----	--	-----