Úloha V.P ... teplý asteroid

10 bodů; (chybí statistiky)

Vymyslete co nejvíce fyzikálních důvodů, proč by asteroid mohl mít vyšší teplotu než okolí.

Karel přemýšlel o Fermiho paradoxu.

Nejprve se musíme zamyslet nad tím, co budeme považovat za teplotu okolí asteroidu. Představme si absolutně černou, dokonale vodivou kouli, nacházející se v konstantní vzdálenosti r od Slunce. Energie záření, kterou tato koule přijme od Slunce za jednotku času, je rovna

$$P_1 = \frac{L}{4\pi r^2} S = \frac{L}{4\pi r^2} \pi R^2 \,,$$

kde $L = 3{,}86 \cdot 10^{26}\,\mathrm{W}$ je zářivý výkon Slunce, S je plocha, na kterou dopadá světlo, a R poloměr koule. Předpokládejme, že koule má teplotu T_0. Podle Stefan-Boltzmannova zákona bude koule vyzařovat energii s výkonem

$$P_0 = \sigma S T_0^4 \,,$$

kde σ je známá konstanta. Za dostatečně dlouhý čas se teplota koule ustálí na rovnovážné hodnotě, která odpovídá situaci, kdy bude stejná hodnota výkonu přijatého v dané vzdálenosti od Slunce a výkonu vyzářeného. Tato teplota je dána vztahem

$$T = \left(\frac{P_1}{4\pi R^2 \sigma}\right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{L}{16\pi\sigma r^2}\right)^{\frac{1}{4}} \,.$$

Právě tuto teplotu dále považujme za teplotu okolí. Kvůli čemu by mohl asteroid mít nějakou jinou? V první řadě jsme při předchozím výpočtu předpokládali, že koule pohltí všechno přicházející záření. U asteroidu tomu tak nebude - teplota bude záležet na odrazivosti povrchu, tzv. albedu A. Výkon přijatý asteroidem tak bude

$$P_2 = P_1 \left(1 - A\right) \,,$$

a teplota (spočítaná analogicky jako v předchozím případě)

$$T = \left(\frac{P_1\left(1 - A\right)}{4\pi R^2 \sigma}\right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{L\left(1 - A\right)}{16\pi\sigma r^2}\right)^{\frac{1}{4}} \,.$$

Pro představu o velikosti vlivu tohoto efektu můžeme vypočítat teplotu asteroidu ve vzdálenosti $r = 1\,\mathrm{au}$. Typický rozměr asteroidu je cca $R = 0{,}5\,\mathrm{km}$ a albedo $A = 0{,}1$. Po dosazení vychází $T = 271\,\mathrm{K}$, pro dokonale vodivou, absolutně černou kouli o stejných parametrech by to bylo $278\,\mathrm{K}$. Pro skutečný asteroid je navíc situace ještě složitější. Jednak nemá albedo úplně stejné na všech místech povrchu, a také se nejedná o dokonale kulaté těleso. Velkou roli hrají nerovnosti, které způsobují teplotní rozdíly (ve stínu je teplota menší než na sluníčku).

V předchozích úvahách jsme počítali s nekonečně vodivým asteroidem. V případě asteroidu s konečnou vodivostí bychom museli řešit rovnici vedení tepla. Pokud se omezíme pouze na její jednorozměrný případ, kdy zkoumáme pouze změny teploty podél jedné přímky v asteroidu, má tvar

$$\chi \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} = \frac{\partial T}{\partial t} \,,$$

kde t je čas, x vzdálenost a χ označuje tepelnou difuzivitu materiálu. Rovnice v podstatě říká, že tepelná energie v objemu V se musí zvýšit o tolik energie, kolik přes povrch přiteče. Pro řešení potřebujeme ještě hraniční podmínku na povrchu

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon\sigma T^4 = \left(1 - A\right) \varepsilon(t) \,,$$

kde ε je časově závislý tok záření vzhledem k místní normále (dále předpokládáme jeho harmonický průběh) a ε označuje infračervenou emisivitu. Cílem při řešení rovnice je najít teplotu jako funkci času a hloubky. My zde rovnici nebudeme řešit a uvedeme jen výsledek, podrobné řešení viz.[1] Zajímá nás hlavně závislost povrchové teploty na čase, pro niž dostaneme

$$T(0,t) = T_{\mathrm{eq}} + \frac{(1-A)\,\varepsilon_1}{4\varepsilon\sigma T_{\mathrm{eq}}^3}\frac{1}{1+2\Theta+2\Theta^2}e^{2\pi f t+\varphi_{\mathrm{th}}}\,,$$

kde f je frekvence otáčení asteroidu

$$\Theta = \frac{\sqrt{\pi f K C \rho}}{4\pi\varepsilon\sigma T_{\mathrm{eq}}^3}$$

je tepelný parametr a φ_{th}, pro které platí

$$\operatorname{tg}\varphi_{\mathrm{th}} = -\frac{\Theta}{1+\Theta}\,,$$

značí tepelné zpoždění. Tvar řešení odpovídá periodickým změnám, kdy vyšších teplot dosahuje přivrácená strana, odvrácená naopak nižších. Vůbec nejvyšší teploty dosáhne bod na asteroidu chvíli po jeho poledni. Rozdíl mezi teplotami obou stran bude tím menší, čím rychleji bude asteroid rotovat. Pro extrémní případ vázané rotace by byl tedy nejvyšší. Roli bude hrát také excentricita dráhy asteroidu, způsobující změny toku záření vzhledem k normále. V perihelu bude teplota samozřejmě nejvyšší. Vzhledem k tomu, že se vzdálenost tělesa od Slunce mění nejvíce právě v perihelu, lze kolem něj očekávat také největší změny teploty s časem.

Výše zmíněné efekty budou pravděpodobně zdaleka nejvýznamnější. Zamysleme se ale i nad dalšími:

- skleníkový efekt: V případě větších těles typu planet často hraje důležitou roli. Vzhledem k nízkým hmotnostem není však u asteroidů možné, aby si udržely atmosféru, proto tento jev můžeme vyloučit.
- částice slunečního větru: V současné době bude tento efekt opravdu zanedbatelný, v raných fázích vývoje sluneční soustavy byl však sluneční vítr mnohem silnější a teoreticky mohlo docházet k ohřevu při dopadu jeho částic a dále k indukčnímu ohřevu při průchodu nabitých částic elektricky vodivým materiálem planetek.[2]
- impakty: Teplo by mohlo vznikat také při vzájemných srážkách, pokud by se na něj přeměnila část kinetické energie těles. Srážky by však musely probíhat při relativně malých rychlostech, aby se asteroid nerozpadl.
- radioaktivní rozpad: Jako zdroj tepla by mohl posloužit nějaký rozpadající se radioaktivní prvek, obsažený v materiálu asteroidu.[3] Pro přibližný odhad teplotního rozdílu tímto způsosobeným uvažujme asteroid o poloměru $R = 1\,\mathrm{km}$, který je celý složený z radioaktivního U^{238}. Jeho aktivita je $A = 12{,}4\,\mathrm{Bq\cdot mg^{-1}}$. Objemový výkon P_V spočteme jako

$$P_V = A\rho E,$$

[1] `https://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/ashk/povetron-2008-06.pdf`
[2] `https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0019103589901875`
[3] `https://aasnova.org/2022/02/23/meteorites-reveal-radioactive-heating-in-asteroids`

kde $\rho = 19\,000\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$ je hustota a $E = 4{,}27\,\mathrm{MeV}$ energie uvolněná při jednom rozpadu. Celkový výkon tedy je

$$P = \frac{4}{3}\pi R^3 A\rho E .$$

Výslednou teplotu získáme jako

$$T = \left(\frac{P + P_1}{4\pi R^2 \sigma}\right)^{\frac{1}{4}} .$$

Číselně vychází 288 K, což je o 10 K víc než vyšlo pro neradioaktivní asteroid. Skutečné asteroidy navíc nejsou celé z uranu, proto tento efekt bude ve skutečnosti ještě mnohem menší.

- slapový ohřev

Konečně, velmi horký vzhledem ke vzdálenějšímu okolí se asteroid samozřejmě stane po vstupu do (například zemské) atmosféry, kde se vlivem tření zahřeje až na teplotu několika tisíc stupňů.

Radka Křížová
radka.krizova@fykos.cz