

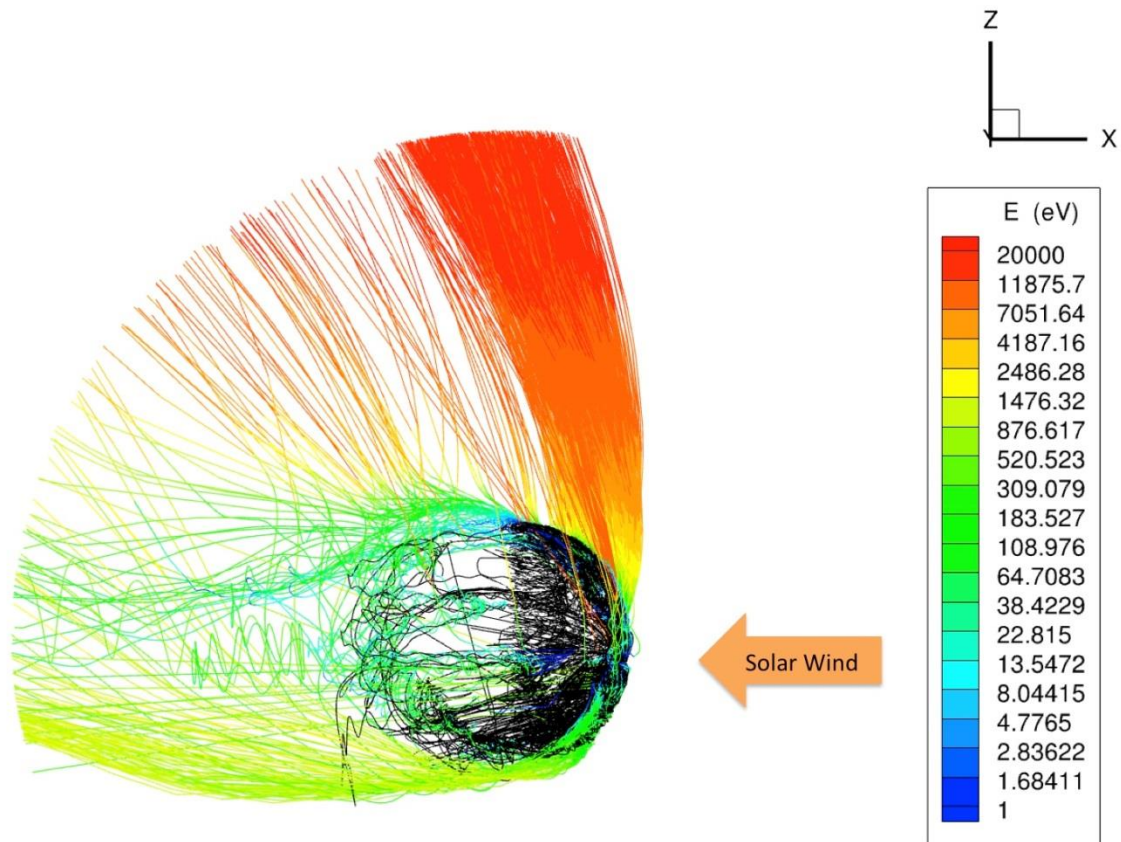
Proč Mars ztrácí atmosféru?

Jan Veselý, Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, p. o.

vesely@planetarium.cz

květen 2018

Dílna vychází z fyzikálního semináře pro středoškolské studenty. Má za cíl ukázat, že špičkový současný výzkum lze popsat a do jisté hloubky pochopit i prostředky středoškolské fyziky. Pracujeme s pojmy: tlak, teplota, skupenství, fázový diagram vody, trojný bod, gravitační zákon, úniková rychlost, kinetická a potenciální energie, vnitřní energie plynu, molární hmotnost, Boltzmannova konstanta, Avogadrova konstanta, střední kvadratická rychlost, magnetické pole, ionizace, sluneční vítr.



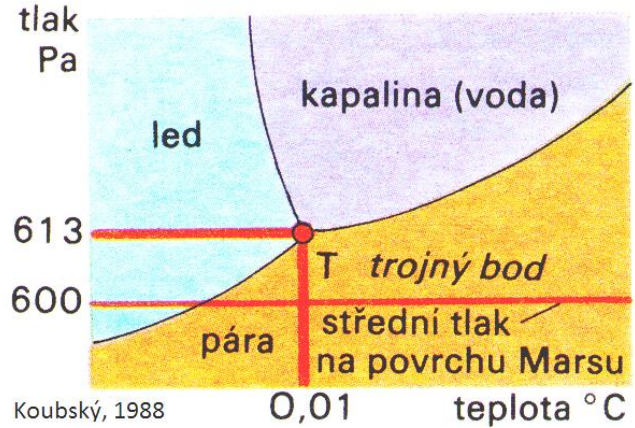
Courtesy X. Fang, University of Colorado, and the MAVEN science team

1. Pokus – var vody za sníženého tlaku

Stavový diagram vody, trojný bod => nepřítomnost kapalné vody na povrchu planety => předpoklad vyššího tlaku, potažmo hustoty atmosféry v minulosti.

Mars pravděpodobně ztrácí atmosféru.

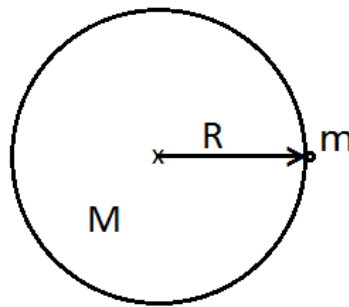
Hypotéza: nízká gravitace, díky níž molekuly atmosféry opouštějí (podobně, jako je tomu na Měsíci).



2. Úniková rychlost

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

$$E_p = - m a_g R$$



$$F = G \frac{m M}{R^2}$$

$$m a_g = G \frac{m M}{R^2}$$

$$a_g = G \frac{M}{R^2}$$

úniková (2. kosmická) rychlost:

$$E_k + E_p = 0 \Rightarrow \frac{1}{2} m v_{II}^2 - m a_g R = 0 \Rightarrow v_{II}^2 = 2 a_g R$$

Gravitační konstanta: $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

$$v_{II}^2 = 2 G \frac{M}{R^2} R$$

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2 G M}{R}}$$

Hmotnost Země: $M_Z = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Poloměr Země: $R_Z = 6,38 \cdot 10^3 \text{ km}$

$$v_{IIZ} = \sqrt{2 \cdot 6,67 \cdot 5,97 \cdot 10^{13} / (6,38 \cdot 10^6)} = \sqrt{124,8 \cdot 10^6} = 11,2 \cdot 10^3 \text{ (m s}^{-1}\text{)}$$

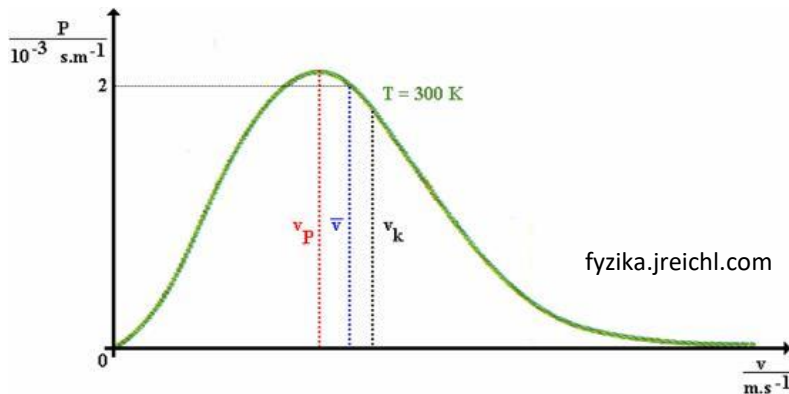
Hmotnost Marsu: $M_M = 6,42 \cdot 10^{23} \text{ kg}$

Poloměr Marsu: $R_M = 3,40 \cdot 10^3 \text{ km}$

$$v_{IIM} = \sqrt{2 \cdot 6,67 \cdot 6,42 \cdot 10^{12} / (3,4 \cdot 10^6)} = \sqrt{25,2 \cdot 10^6} = \underline{5,0 \cdot 10^3 \text{ (m s}^{-1}\text{)}}$$

3. Rychlost pohybu molekul v atmosféře

Kinetická energie molekul je charakterizována střední kvadratickou rychlostí:



$$\frac{1}{2} m v_k^2 = \frac{3}{2} k T$$

$$v_k^2 = \frac{3 k T}{m}$$

$$v_k = \sqrt{\frac{3 k T}{m}}$$

Boltzmannova konstanta: $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

4. Atmosféra Marsu CO_2 (95,3%), N (2,7%), Ar (1,6%), O_2 (0,15%) ...

$$M_{\text{mol}}(\text{C}) = 12 \text{ g mol}^{-1} + 2 \times M_{\text{mol}}(\text{O}) = 16 \text{ g mol}^{-1} \Rightarrow M_{\text{mol}}(\text{CO}_2) = 44 \text{ g mol}^{-1}$$

Hmotnost jedné molekuly CO_2 ? Avogadrova konstanta $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Nejvyšší teploty na Marsu (MGS): $T \sim 293 \text{ K}$

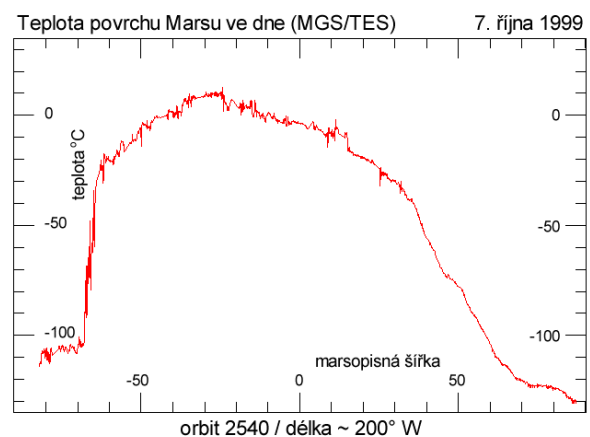
$$v_{\text{KCO}_2} = \sqrt{3 \cdot 6,02 \cdot 1,38 \cdot 293 / 44 \cdot 10^{-3}}$$

$$m = \frac{M_{\text{mol}}}{N_A}$$

$$v_k = \sqrt{\frac{3 N_A k T}{M_{\text{mol}}}}$$

$$v_{\text{KCO}_2} = \sqrt{16,6 \cdot 10^4} = \underline{4,1 \cdot 10^2 \text{ m s}^{-1}}$$

Střední kvadratická rychlost molekul CO_2 v atmosféře Marsu je o řád nižší než úniková!!!



5. Hypotéza je nesprávná – musíme hledat jiné vysvětlení než prosté překročení únikové rychlosti molekulami CO_2 .

Absence silného magnetického pole. Sluneční UV záření ionizuje molekuly, sluneční vítr je pak odnáší (což je předmětem současného vědeckého výzkumu kosmickými sondami – Mars Express, MAVEN, TGO). Prezentace obrázků a videí (viz. odkazy).

6. Poznámky a diskuse

Ekvipartiční teorém – podle ekvipartičního teorému připadá na jeden stupeň volnosti (i) podíl na vnitřní energii $E = \frac{1}{2} k T$, tedy $E_i = i/2 k T$

- CO_2 je tříatomová molekula $\Rightarrow i = 6$ (posun v xyz, rotace podle xyz)
- pak je vnitřní energie $E_i = 3 k T$

Jenže: v této úloze neposuzujeme vnitřní energii, ale porovnáváme střední kvadratickou rychlost pohybu molekul CO_2 s únikovou rychlostí. Počítáme tedy jen posuvný pohyb ve třech osách, rotaci molekul neuvažujeme, proto $E_i = 3/2 k T$

Proč ale neztrácí atmosféru Venuše? Gravitace zřejmě hraje roli. Vyšší gravitace Venuše stačí k zabránění odnosu atmosféry slunečním větrem (Ramstad, R. et al. 2017, doi:10.1002/2017JA024306).

Univerzální plynová konstanta $R = N_A \cdot k$ – z didaktických důvodů je lepší výše uvedený postup bez použití R , protože ačkoli jsme vyšli ze statistického rozdělení rychlostí a energií, přece jen diskutujeme rychlost pohybu jednotlivých molekul, nikoli stavové veličiny.

7. Užitečné odkazy

- http://www.labo.cz/mft/mol_vahy.htm
- http://www.ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/2_Molekulova_fyzika_a_termika/3_Plynne_skupenstvi_kruhovy_dej/2302_Stredni_kvadraticka_rychlost.pdf
- <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/594-stredni-kvadraticka-rychlost>
- http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS
- <http://oppa.ssps.cz/index.php/vidfyz/mechanika/214>
- <http://mars.jpl.nasa.gov>
- <http://www.nasa.gov/maven>
 - <http://lasp.colorado.edu/home/maven/science/released-results/>
 - <http://science.sciencemag.org/content/350/6261>
 - <https://youtu.be/BJR8jhZFyeg>
 - <https://youtu.be/gX5JCYBZpcg>
- <http://www.isro.gov.in/pslv-c25-mars-orbiter-mission>
- <http://exploration.esa.int/mars/46475-trace-gas-orbiter/>
- <https://doi.org/10.1002/2017JA024306>

8. Závěr

Dílnu lze realizovat ve vyšších ročnících například v rámci fyzikálního semináře, fyzikálního kroužku, není určena do standardní výuky. Dílna integruje poznatky ze dvou různých témat, která jsou ve fyzice probírána v různých ročnících. Učí studenty vyslovit a ověřovat hypotézu, která může být i nesprávná. Prostřednictvím tématu týkajícího se současného kosmického výzkumu má dílna motivační potenciál.