

Úloha II.P ... planetární atmosféra

10 bodů; (chybí statistiky)

Jaké parametry musí mít planeta, aby si udržela atmosféru srovnatelnou se Zemí? Jaké podmínky jsou nutné, aby takovou atmosféru získala?

Karel si vzpomněl na úlohu.

Za existenciu zemskej atmosféry vďačíme rôznym fyzikálnym procesom. Ďalšie sú zodpovedné za jej ochranu. Ako však uvidíme, okrem fyzikálnych procesov sú dôležité aj tie chemické a biologické. Pred začiatkom diskusie o týchto procesoch si však musíme ujasniť náš pohľad na interpretáciu otázky zo zadania - čo znamená, že atmosféra planéty je porovnateľná s atmosférou Zeme? Uvažujme, že nás zaujíma možnosť obývateľnosti takéhoto telesa, teda chceme planétu s atmosférou s nasledovnými vlastnosťami:

- atmosférický tlak okolo $p_a \approx 100$ kPa,
- rovnovážna povrchová teplota $T \approx 300$ K,
- chemické zloženie s obsahom dusíka a kyslíka – v prvom priblížení dané strednou molekulovou hmotnosťou okolo $M_m \approx 15$ g/mol.

Tieto podmienky zaručia, že aj navonok bude mať atmosféra podobnú hrúbku.

Tepelná evaporácia

Prvým procesom, na ktorý sa pozrieme je tepelný pohyb častíc. Rýchlosť častíc hmotnosti m v termodynamickej rovnováhe pri teplote T je daná Maxwelowym rozdelením rýchlostí

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi k T}\right)^{\frac{3}{2}} 4\pi v^2 e^{-\frac{mv^2}{kT}},$$

ktoré vyjadruje, aký zlomok častíc sa pohybuje rýchlosťou v , presnejšie pre malý interval rýchlostí šírky dv máme časť $dn = f(v) dv$ častíc. Charakteristickým znakom tohto rozdelenia je, že aj pre ľubovoľne veľké rýchlosti nájdeme nejaké častice, ktoré ich dosahujú. Ak má častica rýchlosť väčšiu ako únikovú rýchlosť z povrchu a na jej ceste sa s nijakou inou nezrazí, z atmosféry nenávratne unikne. Pre únikovú rýchlosť platí

$$v_u = \sqrt{\frac{2GM}{R}},$$

kde M je hmotnosť planéty, R je jej polomer a G je gravitačná konštanta. Majme atmosféru hmotnosti M_{atm} , ktorá má pri povrchu tlak p a teplotu T , ktorá je v nej pomerne nemená s výškou. Charakteristickú výšku H takejto atmosféry môžeme odhadnúť zo vzťahu pre hydrostatický tlak a stavovej rovnice pre ideálny plyn

$$p = \rho H g = H \frac{p M_m}{R_g T} \frac{GM}{R^2}, \quad H = \frac{R^2}{GM} \frac{R_g T}{M_m},$$

kde R_g je molárna plynová konštanta a M_m stredná molárna hmotnosť plynu. Ak sa teda pozeráme na vrstvu atmosféry, kde začínajú byť častice dostatočne riedke, máme pre hmotnostný odtok častíc

$$\frac{\Delta M_{\text{atm}}}{\Delta t} \approx M_{\text{atm}} n(v > v_u) \frac{v}{H} \approx M_{\text{atm}} \frac{v}{H} \left(\frac{m}{2\pi k T}\right)^{\frac{3}{2}} 4\pi \int_{v_u}^{\infty} v^2 e^{-\frac{mv^2}{kT}},$$

Nás zaujímajú hlavne veľmi rýchle častice, pre Zem je totiž bežná rýchlosť častice atmosféry niekoľko stoviek $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, zatiaľ čo úniková rýchlosť je okolo desať $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, tj. $mv_{\text{u}}^2 \gg kT$. Navyše v tomto prípade dominuje exponenciálny útlm, môžeme teda odhadnúť v^2 pred exponenciálou ako vv_{u}

$$\begin{aligned} \frac{\Delta M_{\text{atm}}}{\Delta t} &\approx M_{\text{atm}} n(v > v_{\text{u}}) \frac{v}{H} \approx \\ &\approx \frac{M_{\text{atm}} v_{\text{u}}}{H} \left(\frac{m}{2\pi k T} \right)^{\frac{3}{2}} 4\pi \int_{v_{\text{u}}}^{\infty} v v_{\text{u}} e^{-\frac{mv^2}{kT}} \approx \\ &\approx \frac{M_{\text{atm}} v_{\text{u}}}{H} \left(\frac{m}{2\pi k T} \right)^{\frac{3}{2}} 2\pi v_{\text{u}} \frac{k T}{m} e^{-\frac{mv_{\text{u}}^2}{kT}}. \end{aligned}$$

Z tohto vzťahu vidíme, že ľahké častice z atmosféry unikajú ako prvé. Predstavme si, že uvažujeme stav atmosféry po uplynutí času na škále niekoľko miliárd rokov $\Delta t = 10^{17}$ s. Za tento čas chceme udržať atmosféru z dusíka, ale chceme sa zbaviť celej atmosféry z vodíku a hélia. Preto dosadíme do predošlého vzťahu $\Delta M_{\text{atm}} = M_{\text{atm}}$ a $m \approx 10m_{\text{u}}$, kde m_{u} je atómová hmotnostná jednotka

$$\frac{v_{\text{u}}^2}{H} \left(\frac{m}{2\pi k T} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{mv_{\text{u}}^2}{kT}} = \frac{1}{\Delta t} \approx 10^{-17} \text{ s}^{-1}.$$

Výrazu opäť dominuje člen s exponenciálou, preto dosadíme do členov pred ňou hodnoty pre Zem ako vhodný rádový odhad. Takto dostaneme hodnotu asi 3s^{-1} . Potrebujeme teda, aby exponenciála dosahovala 10^{-17} a argument exponenciály asi $-18 \cdot \ln 10 \approx -39$. Ak chceme rozumnú povrchovú teplotu (300 K) dostaneme hodnotu pre únikovú rýchlosť $v_{\text{u}} = \sqrt{40kT/m} \approx \approx 3,1 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, pričom ide o odhad minimálnej hodnoty únikovej rýchlosti potrebnej na zachovanie atmosféry s obsahom ťažších prvkov. Vidíme, že Zem, Mars a Venuša toto spĺňajú, ale Mesiak už nie. Ak za hmotnosť dosadíme zo vzťahu pre hustotu (pre $\rho = 5 \text{ g}/\text{cm}^3$) dostaneme podmienku pre minimálny polomer

$$R > \frac{v_{\text{u}}}{\sqrt{\frac{8G\rho\pi}{3}}} \approx 1900 \text{ km}.$$

Dodajme ďalej, že na udržateľnosť atmosféry môže mať vplyv aj rýchla rotácia telesa - pri rotačnej perióde 1 hodina by Zem na rovníku rotovala únikovou rýchlosťou. Ďalším možným vplyvom je gravitačné pôsobenie ďalšieho telesa, či už pri náhodnom blízkom priblížení, kedy sa atmosféra môže „preliať“ medzi telesami a aj do okolitého priestoru, či slapovým pôsobením v prípade satelitu, resp. naopak pre satelit pôsobenie materskej planéty.

Vplyv hviezd

Pre zachovanie príjemnej teploty na povrchu je nutné nachádzať sa v správnej vzdialenosti od materskej hviezd v tzv. obývateľnej zóne. Tejto otázke sa nebudeme úplne venovať, odkazujeme však na¹. Zamerajme sa však na nepriaznivé vplyvy, ktorými na atmosféru hviezda pôsobí. Jedným z nich je fotodisociácia molekúl. V atmosfére dokážu dosť energetické (spravidla ultrafialové) fotóny rozštiepiť molekuly na atómy, z ktorých sú zložené. Toto zníži hmotnosť

¹<https://www.astro.princeton.edu/~strauss/FRS113/writeup3/>,
Circumstellar_habitable_zone

<https://en.wikipedia.org/wiki/>

částic a uvolní množstvo energie, a teda spôsobí, že ich rýchlosti v rovnováhe budú vyššie a jednoduchšie uniknú z gravitačného poľa Zeme.

Oveľa nebezpečnejšie sú však najenergetickejšie častice, ktoré na planétu od hviezdy prúdia - častice hviezdneho vetra. Tieto častice, prevažne protóny, prúdia k Zemi bežne rýchlosťami okolo $300 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Ak by sa tieto častice dostali k časticiam v atmosfére, zrážkami by ich urýchlili na nadúnikové rýchlosti. Toto je proces, pomocou ktorého prišiel o atmosféru napríklad Mars. Zabrániť tejto erózii musí prítomnosť magnetického poľa planéty. Odhad potrebnej veľkosti magnetického poľa môžeme dostať zo vzťahu pre pohyb nabitých častíc v magnetickom poli. Protóny sa v zemskom magnetickom poli budú pohybovať po špirálových trajektóriách (šrúbovnicách) navinutých na siločiaru magnetického poľa, pričom polomer špirál je daný známym vzťahom pre Larmorov polomer. Upravíme ho do tvaru pre veľkosť magnetickej indukcie

$$B = \frac{mv}{qR_L} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ T},$$

kde sme za R_L dosadili pomerne arbitrárnu hodnotu desať polomerov Zeme – rozsah zemskej magnetosféry v smere k Slnku, v ktorom chceme, aby sa častica stihla „otočiť“. Jedná sa teda len o veľmi hrubý odhad minimálnej potrebnej hodnoty. Pre presnejší popis by sme museli uvažovať vplyv tlaku nabitých častíc na magnetické pole, čo je nad rámec tejto úlohy. Výsledkom takého pohľadu, keď porovnáme hustotu energie častíc a hustotu energie magnetického poľa je tzv. Chapmanova–Ferrarova vzdialenosť²

$$R_{C-F} = R \left(\frac{B^2}{\mu_0 \rho v^2} \right)^{\frac{1}{6}},$$

kde požadujeme, aby $R_{C-F} > R$ aj pri zásahoch výronmi hmoty z hviezdy.³ Dostávame teda podmienku $B > \sqrt{(\mu_0 \rho v^2)} \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ T}$, čo je o štyri rády silnejšie pole ako v prvom prípade (v predchádzajúcom prípade sme uvažovali pole homogénne, to však smerom od povrchu klesá s tretou mocninou vzdialenosti), no stále o vyše dva rády slabšie ako zemské pole. Silná magnetosféra však dokáže zabrániť aj „odfúknutiu“ atmosféry po erupcii hmoty z povrchu hviezdy. Vysokoenergetické častice sa následne zachytia na špirálových trajektóriách pozdĺž magnetických siločiar. Niektoré z týchto častíc sa dokážu dostať do atmosféry, kde spôsobujú napr. polárnu žiaru alebo vo väčších vzdialenostiach od Zeme tzv. Van Allenove radiačné pásy. Z polárnych oblastí však môžu častice preda len uniknúť, keďže tu sú siločiaru najmä smerom k Zemi otvorené. Tento jav sa nazýva polárny vietor alebo plazmová fontána.

Magnetické dynamo

Naša planéta teda potrebuje toto pole nejak vygenerovať. Pri vzniku veľkých telies dochádza k pretaveniu pri zárodočných zrážkach a následnom nabaľovaní hmoty pri bombardovaní menšími telesami. Magnetické pole planéty teda nemôže byť poľom trvalých magnetov - materiál sa určite nachádzal nad jeho Curieho teplotou - ale musí vzniknúť procesom magnetického dynamo v tekutom vodivom jadre planéty. Pre planéty podobné Zemi jadro tvoria roztavené kovy ako nikel a železo. Planéta si toto jadro musí udržať tekuté po dostatočne dlhý čas (po stuhnutí

²http://sun.stanford.edu/~sasha/PHYS780/SOLAR_PHYSICS/L23/Lecture_23_PHYS780.pdf

³ ρ , v sú parametre plazmy nalietajúcej na magnetické pole, pre Zem dosahujú maximálne asi $1000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ a $m_p \cdot 100 \text{ cm}^{-3}$. Aktuálne hodnoty si môžete pozrieť napríklad na <https://www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind>

jadra dôjde k strate atmosféry už pomerne rýchlo, tak ako v prípade Marsu), čo opäť kladie podmienky na veľkosť planéty. Tepelná kapacita totiž rastie ako tretia mocnina polomeru, zatiaľ čo energia vedená k povrchu a vyžarovaná povrchom rastú s druhou mocninou. Ak využijeme rovnicu vedenia tepla dostaneme

$$Mc \frac{\Delta T}{\Delta t} \approx -k \frac{T}{R} 4\pi R^2,$$

kde c je merná tepelná kapacita, k tepelná vodivosť a T teplota planéty. Ak predpokladáme exponenciálne chladnutie podľa $T = T_0 \exp(-t/\tau)$ máme

$$\tau = \frac{Mc}{k4\pi R} \approx \frac{c\rho R^2}{3k}.$$

Ak by sme dosadili hodnoty pre železo, dostaneme pre $\tau = 10^9$ rokov polomer $R = 1\,500$ km. Jedná sa, samozrejme, o hrubý odhad, keďže sa toto teplo musí ešte dostať k povrchu cez menej vodivé silikátové vrstvy (zemská kôra) a vyžiariť z povrchu, na ktorý navyše teplo dodáva Slnko. Ďalším procesom, ktorý dokáže udržať vnútro planéty tekuté je slapové pôsobenie, ako v prípade Merkúra (pôsobenie Slnka), či Io (mesiac Jupitera).

Vznik atmosfér

Pre pochopenie vzniku atmosfér planét, ako aj tej zemskej, si musíme najprv priblížiť vznik planét samotných. Planéty vznikajú z plynoprachového akréčneho disku, ktorý tvorí pozostatok po vzniku centrálnej hviezdy. V závislosti od vzdialenosti od hviezdy z plynu postupne kondenzujú častičky – v smere od hviezdy najprv kovy, neskôr silikáty, vodný ľad a vo veľkej vzdialenosti aj ľad metánu, či amoniaku. Tieto častice sa následne zrážkami naakumulovali do tzv. planetizimál veľkosti asteroidov. Tieto sa ďalej zrážali a aj s pomocou vlastnej gravitácie tvorili protoplanéty. Tu nastáva pre nás dôležitý okamih – ak takáto planetezimála získala hmotnosť väčšiu ako asi desať hmotností Zeme, získala schopnosť na seba nabaľovať plyn z okolitej hmloviny vlastnou gravitáciou, čo jej hmotnosť ďalej zvýšilo. Týmto procesom vznikli atmosféry plyných planét, ktoré tvoria väčšinu ich hmotnosti.⁴ Ak chceme získať Zemi podobnú atmosféru, musí mať teda naša protoplanéta polomer asi do

$$R < R_z \left(\frac{10M_z}{M_z} \right)^{1/3} \approx 14\,000 \text{ km},$$

ak predpokladáme, že hustoty oboch telies sú rovnaké. Pre vývoj (proto)planét je dôležitá aj ich migrácia v sústave po ich vzniku. Vzájomným gravitačným pôsobením viacerých planét sa môžu výsledné orbity výrazne líšiť od tých, na ktorých planéty vznikli, niektoré planéty môžu dokonca spadnúť na materskú hviezdu alebo úplne uniknúť zo sústavy.

Vývoj atmosféry zemskeho typu tak obvykle začína na telese roztavenom zrážkami, ktorého prvotnú atmosféru tvoria roztavené minerály a sopečné plyny ako metán. Neskoršími zrážkami s menšími telesami, však na Zem zo vzdialenejších končín prišla voda, ktorá ako vodná para prispela do zloženia atmosféry. Postupným chladnutím povrch stuhne a neskôr sa z atmosféry môže vyzrážať vodný oceán. Aj vplyvom vulkanickej činnosti je táto „druhá“ atmosféra zložená z oxidu uhličitého a dusíku, ako napríklad na Venuši. Časť oxidu uhličitého sa dokáže rozpustiť

⁴Pre záujemcov je tento proces popísaný vo vedeckých článkoch <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019103586901223>, či <https://academic.oup.com/mnras/article/405/2/1227/1184435>.

v oceánech a následne uložit v uhličitanech, a teda sa eliminovať z atmosféry. Pre zemskú atmosféru však bol významný iný jav, ktorý má od astronómie, či geofyziky pomerne ďaleko – vznik života. Prvé fotosyntetizujúce organizmy – cyanobaktérie – dokázali z oxidu uhličitého vyrobiť kyslík, ktorým obohatili atmosféru. Kyslík môže vzniknúť aj vysoko v atmosfére fotodisociáciou vodnej pary, no tento proces je príliš pomalý v porovnaní s kyslíkom potrebným na oxidáciu minerálov na povrchu. Týmto prvým organizmom teda vďačíme za dnešnú podobu zemskej atmosféry, v ktorej dokážeme žiť aj my – ľudia.

Zhrnutie

Planéta musí byť dost veľká na to, aby si atmosféru udržala. V dôsledku tepelného pohybu molekúl telesá s polomerom menším ako niekoľko málo tisíc kilometrov o atmosféru na škálach miliárd rokov prídu. Ďalej je potrebné, aby takáto planéta disponovala magnetickým poľom tieniacim tok častíc od materskej hviezdy. Nakoniec planéta nemôže byť príliš veľká, inak by počas vzniku začala nabaľovať plyn z okolitej hmloviny a premenila sa na plynného obra. Pre polomer planéty tak máme odhad $1\,500\text{ km} < R < 14\,000\text{ km}$. Ak sa zaujímate o atmosféru s obsahom kyslíka, na planéte by sa navyše musel vyvinúť život.

Jozef Lipták

liptak.j@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.