Úloha VI.P ... energie bouřky — 10 bodů

Odhadněte, jakou energii s sebou nese velká červená skvrna na Jupiteru. Zamyslete se nad různými druhy energie (kinetickou, potenciální, chemickou atd.) a popište, jaké všechny parametry by mohly tuto energii ovlivnit a jak se může hladina energie vyvíjet v čase.

Karel přemýšlel nad planetárním počasím.

Ve vašich řešeních této úlohy se vyskytlo mnoho zajímavých úvah, proto jsem se rozhodla nezveřejňovat jedno nejlepší řešení, ale z jednotlivých řešení vybrat diskuse jednotlivých druhů energie doplněné dalšími komentáři.

Odhad hmotnosti skvrny

Odhad hmotnosti je jedním z klíčových parametrů celého modelu, na kterém závisí, jaké výsledné hodnoty energie budeme dosahovat. Jedním z nejjednodušších přístupů je model rudé skvrny jako válce s podstavou elipsy o poloosách ($2a = 16\,000\,\mathrm{km}$, $2b = 12\,000\,\mathrm{km}$) a výškou ($h = 300\,\mathrm{km}$) s konstantní hustotou $\rho = 0{,}16\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$,[1] což dává hmotnost

$$m = V\rho = \pi abh\rho = \pi \cdot 8 \cdot 10^6\,\mathrm{m} \cdot 6 \cdot 10^6\,\mathrm{m} \cdot 3 \cdot 10^5\,\mathrm{m} \cdot 0{,}16\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}} \approx 7{,}2 \cdot 10^{18}\,\mathrm{kg}\,.$$

Problém tohoto přístupu je, že pro celý objem skvrny uvažuje stejnou hustotu, která je tabelovaná pro tlak 1 bar – v hlubších hladinách je však tlak výrazně vyšší, což odpovídá i vyšší hustotě.

Využití ideálního plynu (Kosma Šatánek, upraveno) Aproximovat plyn v této části ideálním plynem je zřejmě špatně z několika důvodů, nejen protože se zde nachází mraky, ale také z důvodu, že složení atmosféry zahrnuje též krystalky (např. amoniak) – přesto tak ale pro jednoduchost učiním.

Pro hustotu plynu musí platit

$$\rho = \frac{nM}{V}\,,$$
$$pV = nRT\,,$$
$$\rho = \frac{pM}{RT}\,,$$

kde M je molární hmotnost plynu. Uvažujme adiabatickou závislost (která zde existuje) (*pozn. organizátorů:* adiabatický model je nejjednodušší běžně používaný model, který uvažuje, že vertikální pohyby v atmosféře jsou dostatečně rychlé, aby neprobíhala tepelná výměna)

$$T^\kappa p^{1-\kappa} = \mathrm{konst}\,,$$
$$T = T_0 \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}\,,$$

kde $T_0 = 163\,\mathrm{K}$, p_0 odpovídá stavu na hladině $1\,\mathrm{bar}$.[2] Potom pro hustotu dostáváme vztah

$$\rho = \frac{pM}{RT_0 \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}} = \frac{p^{\frac{1}{\kappa}} M}{RT_0 p_0^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}}\,.$$

[1] https://en.wikipedia.org/wiki/Great_Red_Spot

[2] Facts about Jupiter. (n.d.). https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Juice/Facts_about_Jupiter

Pro molární hmotnost plynu pak platí

$$M = M_{\mathrm{H_2}} x_{\mathrm{H_2}} + M_{\mathrm{He}} x_{\mathrm{He}} + M_{\mathrm{CH_4}} x_{\mathrm{CH_4}}\,,$$

kde x_i je molární podíl i-té složky v plynu.
(Konec řešení Kosmy Šatánka)

Máme tedy odvozený vzorec pro hustotu atmosféry Jupiteru v libovolném tlaku. Velká rudá skvrna sahá do hloubek až 100 barů; horní hranici můžeme uvažovat pro tlaky 0,1 barů. Můžeme pak zvolit reprezentativní tlak ve střední části bouře, nebo přesněji integrovat přes celou výšku skvrny – my zvolíme hodnotu $p = 22\,\mathrm{bar}$. Dostaneme pak hmotnost

$$m = \pi abh\rho = \pi abh \frac{pM}{RT_0 \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}} = \pi abh \frac{p^{\frac{1}{\kappa}} \left(M_{\mathrm{H_2}} x_{\mathrm{H_2}} + M_{\mathrm{He}} x_{\mathrm{He}} + M_{\mathrm{CH_4}} x_{\mathrm{CH_4}}\right)}{RT_0 {p_0}^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}}\,,$$

$$m = \pi \cdot 1{,}44 \cdot 10^{19}\,\mathrm{m^3} \cdot \frac{(22 \cdot 10^5\,\mathrm{Pa})^{\frac{1}{1.4}} \left(2\,\mathrm{g{\cdot}mol^{-1}} \cdot 0.86 + 4\,\mathrm{g{\cdot}mol^{-1}} \cdot 0.136 + 16\,\mathrm{g{\cdot}mol^{-1}} \cdot 0.0018\right)}{8{,}31\,\mathrm{J{\cdot}K^{-1}{\cdot}mol^{-1}} \cdot 163\,\mathrm{K} \cdot (1 \cdot 10^5\,\mathrm{Pa})^{\frac{1-1.4}{1.4}}}\,,$$

$$m \approx 5{,}5 \cdot 10^{19}\,\mathrm{kg}\,.$$

Dostali jsme přibližně o řád vyšší hmotnost než v předchozím případě.

Na závěr si zde ještě ukážeme výsledek, jaký bychom dostali integrací. K tomu budeme potřebovat výše uvedenou závislost hustoty na tlaku a závislost tlaku na výšce. Tu dostaneme jednoduše úvahou, že přírůstek tlaku dp v nekonečně tenké vrstvě o tloušťce dh je rovný

$$\mathrm{d}p = \frac{\mathrm{d}mg}{S} = \frac{\rho(h) gS\ \mathrm{d}h}{S} = \rho(h) g\,\mathrm{d}h\,.$$

Integrace je složitá, provedeme ji tedy numericky, například v tabulkovém kalkulátoru. Při použití tíhového zrychlení $g = 24{,}79\,\mathrm{m{\cdot}s^{-2}}$ a kroku 1 km od tlaku 1 bar do hloubky 300 km dostaneme hmotnost $m = 1{,}3 \cdot 10^{20}\,\mathrm{kg}$, což je více než dvojnásobek předchozí hodnoty. Vidíme tedy, že použití povrchové hustoty je velmi silným podhodnocením hmotnosti.

Přesnější odhad by šel získat uvážením přesnějšího složení atmosféry nebo proměnného tíhového zrychlení. Nárůst hmotnosti s hloubkou je velmi rychlý, tedy odhad hmotnosti silně závisí na odhadu hloubky – pokud bychom jako dolní hranici použili tlak 100 barů, který se nachází v hloubce kolem 230 km, dostali bychom pro hmotnost odhad $6{,}1 \cdot 10^{19}\,\mathrm{kg}$, který je asi poloviční oproti předchozímu výsledku. Kvůli neznámé hloubce, porušení adiabatického principu a ideálnosti plynu ve velkých tlacích nemá nicméně smysl se pokoušet o další zpřesňování.

Kinetická energie

Prvním druhem energie, který zmiňovali všichni řešitelé, je kinetická energie. Sešlo se několik různých přístupů odhadu energie rotujícího válce, ze kterých uvádíme řešení Daniela Švece a řešení Michaely Dudákové pomocí rotace vnějšího pláště. Dále se vyskytla zajímavá aproximace kinetické energie pohybu celé bouřky vzhledem k okolním oblakům od Kosmy Šatánka.

Rotující válec (Daniel Švec) Můžeme předpokládat, že kromě energie plynoucí z pohybu molekul vzniká i určitá energie momentem setrvačnosti, který rotující mrak získal. Zde si poněkud nepřesně dovolíme užít vzorec pro moment setrvačnosti válce, pro jehož poloměr z rovnosti obsahu kruhu a elipsy platí $\lambda = \sqrt{ab}$.

Kromě již známých či odvozených vztahů rovněž vyjdeme z údaje, že rotační perioda Velké rudé skvrny činí 6 dní – aby nedocházelo k její záměně s termodynamickou teplotou, označíme ji T_f, jelikož slouží k popisu frekvence. Dále víme, že musí platit

$$E = \frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2}\frac{1}{2}m\lambda^2 4\pi^2 f^2 = \frac{m\lambda^2\pi^2}{T_f^2} = \frac{\pi^2 ab}{T_f^2}m\,.$$

(Konec řešení Daniela Švece)

Když do tohoto vzorce dosadíme číselně, dostaneme

$$E = \frac{\pi^2 \cdot 8\,000\,\mathrm{km} \cdot 6\,000\,\mathrm{km}}{(6 \cdot 24 \cdot 3600\,\mathrm{s})^2} \cdot 1{,}3 \cdot 10^{20}\,\mathrm{kg} \approx 2{,}3 \cdot 10^{23}\,\mathrm{J}\,.$$

Pohyb ve vnější slupce válce (Michaela Dudáková, upraveno) Skvrnu aproximuji jako elipsu.[3] Hlavní osa této elipsy bude měřit cca 16 000 km. S touto informací mohu vydedukovat délku její druhé osy

$$\begin{aligned}\frac{7}{10} &= \frac{x}{16\,000\,\mathrm{km}}\\ x &= 11\,200\,\mathrm{km}\end{aligned}$$

Odhadovaná hloubka bouře je mezi 240 km a 500 km, využiji tedy průměrnou hodnotu 370 km. Za naivní představy, že bouře má tvar eliptického válce, mohu spočítat její objem:

$$V_1 = Sh = \pi a_1 b_1 h = 52 \cdot 10^9\,\mathrm{km}^3 = 52{,}0 \cdot 10^{18}\,\mathrm{m}^3$$

Jenomže v prostředku skvrny se plyny prakticky nehýbají. Pro zjištění kinetické energie pouze pohybující se části budu muset zjistit objem střední části a odečíst jej. Z obrázku 1 zobrazujícího velikosti rychlostí zjistím podle poměrů rozměr osy menší nehybné elipsy a ze škály rychlosti zjistím střední rychlost pohybující se části.

Dle zjištěných os bude objem nehybné části:

$$V_2 = Sh = \pi a_2 b_2 h = 8{,}3 \cdot 10^9\,\mathrm{km}^3 = 8{,}3 \cdot 10^{18}\,\mathrm{m}^3\,.$$

Výsledný objem pohybující se části tedy bude

$$V = V_1 - V_2 = 43{,}7 \cdot 10^{18}\,\mathrm{m}^3\,.$$

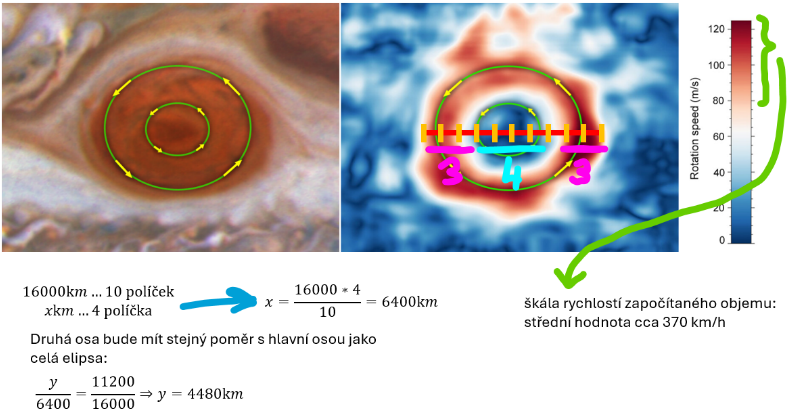
Střední hustota Jupiteru je $1\,326\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$, ale hustota plynů, jenž jsou blízko povrchu bude nižší. Hustota na povrchu se uvádí přibližně $0{,}16\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$, přičemž střední hodnota hustoty skvrny, která má uvažovanou hloubku 370 km bude trochu vyšší. Budu počítat s hodnotou $\rho = 0{,}30\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$. Tím mohu spočítat hmotnost:

$$m = \rho V = 1{,}3 \cdot 10^{19}\,\mathrm{kg}\,.$$

Se známou hmotností celé soustavy mohu vypočítat její kinetickou energii, když vím, že střední rychlost jejích prvků je okolo $370\,\mathrm{km{\cdot}h^{-1}}$:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 1{,}3 \cdot 10^{19}\,\mathrm{kg} \cdot (102{,}8\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}})^2 = 6{,}9 \cdot 10^{22}\,\mathrm{J}\,.$$

[3] Přesněji se jedná o eliptický válec.



Obrázek 1: Výpočet rozměru osy a střední rychlosti

(Konec řešení Michaely Dudákové)

Pro konzistenci dodejme, že s využitím hloubky skvrny 300 km a postupnou integrací hustot by tímto přístupem vyšla hmotnost pohybující se části $1{,}0 \cdot 10^{20}$ kg a energie $5{,}6 \cdot 10^{23}$ J, tedy stejného řádu jako v předchozím postupu.

Kmity celé skvrny (Kosma Šatánek) Mimo rotaci dochází také k posunu samotné skvrny. Dochází dokonce k několika, z nichž mnohé mají velmi dlouhé periody. Pro jednoduchost se ale zabývejme nejčastějším pohybem, a to oscilací každých 90 dnů o 1° délky. Opět proveďme naprosté zjednodušení, jako jsem dosud prováděl. Nepozorovali jsme snížení intenzity, a proto předpokládáme jednoduchý harmonický oscilátor, pro jehož energii platí

$$E_p = \frac{1}{2} k x^2 \,.$$

Předpokládejme, že samotná oscilace probíhá na $\varphi = (1/2)^\circ$, a tedy s poloměrem Jupiteru $69{,}911 \cdot 10^3$ km pro x platí

$$x = \frac{2\pi}{\varphi} r \backsim \frac{\varphi \frac{\pi}{180}}{2\pi} \cdot 69{,}911 \cdot 10^3\,\mathrm{km} \backsim 97{,}1\,\mathrm{km}\,.$$

Pokud opět budu předpokládat hustotu ρ a objem V

$$m = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 h \frac{p^{\frac{1}{\kappa}} \left(M_{\mathrm{H}_2} x_{\mathrm{H}_2} + M_{\mathrm{He}} x_{\mathrm{He}} + M_{\mathrm{CH}_4} x_{\mathrm{CH}_4}\right)}{R T_0 p^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}}\,,$$

kde $p = 22$ bar. Pro periodu jednoduchého harmonického oscilátoru platí

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}\,,$$

z toho pro k „tuhost pohybu“

$$k = 4\pi^2 \frac{m}{T^2}\,,$$

a tedy

$$E_p = 2\pi^2 \frac{m}{t^2} x^2 = 2\pi^2 \frac{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 h \frac{p^{\frac{1}{\kappa}} (M_{\mathrm{H}_2} x_{\mathrm{H}_2} + M_{\mathrm{He}} x_{\mathrm{He}} + M_{\mathrm{CH}_4} x_{\mathrm{CH}_4})}{R T_0 p^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}}}{t^2} x^2\,,$$

odkud dosazením dostaneme

$$E_p = 2\pi^3 \frac{\left(\frac{16\cdot 10^6}{2}\right)^2 330\cdot 10^3 \frac{(22\cdot 10^5)^{\frac{1}{1,4}} (2.016\cdot 0.86 + 4\cdot 0.136 + 16\cdot 180{,}00)}{8.31\cdot 163\cdot (10^5)^{\frac{1-1.4}{.14}}}}{(90\cdot 24\cdot 3600)^2} (970.1\cdot 10^3)^2 \backsim 3\cdot 10^{17}\,\mathrm{J}\,.$$

Toto je však opět pouze přibližné, a dost možná neodpovídá ani v řádu reálné hodnotě.

Potenciální energie

Další velmi často uváděnou energií, avšak s problematickou interpretací, byla potenciální energie. U Jupiteru se totiž musíme velmi dobře zamyslet nad tím, kde bereme nulovou hladinu. Vzhledem k tomu, že Jupiter nemá pevný povrch, nemůžeme použít ten a ani hladina o tlaku 1 bar běžně používaná jako referenční není příliš vhodná. Dalšími nápady byly střed planety nebo spodní hranice bouře, které taktéž nejsou vhodné. Musíme se totiž zamyslet, k čemu chceme energii bouře vyjádřit. Nejpřirozenější je porovnávat se situací, kdy existuje Jupiter bez Velké rudé skvrny. V oblasti Velké rudé skvrny by však i tak byl plyn, tedy použití referenční hladiny na dně skvrny by jejím odebráním udělalo v planetě „díru“. Smysluplným přiblížením je úvaha, že hmota obsažená v rudé skvrně je vyzvednutá o 8 km nad okolím, což je přibližně výška, o kterou jsou oblaky v oblasti skvrny výše než v okolí, případně započtení energie pouze tohoto „přebytku“. Další zajímavý přístup je položení nulové hladiny v nekonečnu, jako je běžné u radiálního gravitačního pole. Tento přístup zvolil například Martin Kudrna včetně správné interpretace.

Vyzvednutí (Kosma Šatánek, upraveno) Zvolme si nulovou hladinu potenciální energie na „povrchu“ mraků, a za potenciální energii víru považujme pouze kladný příspěvek, který je nad touto nulovou hladinou…

Víme, že se tato část víru nachází $h_0 = 8\,\mathrm{km}$ nad amoniakovými mraky.[4] Uvažujme, že se zde tlak plynu na této vzdálenosti podstatně nezmění, a tedy zůstane na tlaku $p = 0{,}6\,\mathrm{bar}$ (takto se stále udržím v přesnosti na řád, a to je vzhledem k ostatním aproximacím dostatečné).[5] Poté pro potenciální energii dostáváme

$$E_p = mgh\,,$$
$$E_p = S h_0 \rho g h\,,$$
$$E_p = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 g \frac{p^{\frac{1}{\kappa}} M}{R T_0 p_0^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}} h h_0\,,$$

[4] `https://en.wikipedia.org/wiki/Great_Red_Spot`

[5] Výpočet hustoty uvedený v části *Využití ideálního plynu.*

kde $g = 24{,}8\,\mathrm{m\cdot s^{-2}}$ značí gravitační zrychlení.[6] Pro molární hmotnost plynu platí

$$M = M_\mathrm{H} x_\mathrm{H} + M_\mathrm{He} x_\mathrm{He} + M_{\mathrm{CH}_4} x_{\mathrm{CH}_4}\,,$$

kde x_i je molární podíl i-té složky v plynu. A tedy číselně pro $\kappa = 1,4$ a pro polohu těžiště válce $h = h_0/2$

$$E_p = \frac{1}{2}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 g \frac{p^{\frac{1}{\kappa}}\left(M_\mathrm{H} x_\mathrm{H} + M_\mathrm{He} x_\mathrm{He} + M_{\mathrm{CH}_4} x_{\mathrm{CH}_4}\right)}{R T_0 p_0^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}} h_0^2\,,$$

$$E_p = \pi\left(\frac{16\,000\,\mathrm{km}}{2}\right)^2 24{,}8\,\mathrm{m\cdot s^{-2}} \frac{0{,}6\cdot 10^5\,\mathrm{Pa}^{\frac{1}{1.4}}\left(M_\mathrm{H} x_\mathrm{H} + M_\mathrm{He} x_\mathrm{He} + M_{\mathrm{CH}_4} x_{\mathrm{CH}_4}\right)}{8{,}31\,\mathrm{J\cdot K^{-1}\cdot mol^{-1}}\cdot 163\,\mathrm{K}\cdot(0{,}6\cdot 10^5\,\mathrm{Pa})^{\frac{1-1.4}{1.4}}} (8\,000\,\mathrm{m})^2\,,$$

$$E_p \approx 1{,}9\cdot 10^{22}\,\mathrm{J}\,.$$

Je zřejmé, že tato hodnota je pouze přibližná, ale domnívám se, že může mít přesnost i na řád.

Energie vzhledem k nekonečnu (Martin Kudrna) Potenciální energie je docela nejasný pojem, můžeme ji odhadnout jako potenciální energii v poli Jupitera o hmotnosti $1{,}9\cdot 10^{27}$ kg a poloměru $70\cdot 10^6$ m, potenciální energie je tedy řádu -10^{29} J.

Celková energie vyjde záporná, bouřka je tedy vázaná k Jupiteru (což dává smysl a očekával jsem to). Současně jsou kladné příspěvky zanedbatelné vůči záporným, tedy je vázaná velmi pevně (tedy nemůže odletět tisíce kilometrů a pak se zastavit).

Vnitřní (tepelná) energie

Vnitřní energie je dalším běžně zmiňovaným typem energie. Podobně jako u potenciální energie, i zde je důležité, jakou referenční hodnotu vezmeme. Pokud bychom totiž počítali s absolutní teplotou, dostali bychom nárůst energie oproti absenci plynu/jeho nulové teplotě, což není realistická situace. Lepší výsledky tedy dostaneme, pokud budeme do vzorce dosazovat pouze rozdíl teploty Velké rudé skvrny oproti okolí. Někteří se snažili započítat i energii danou zvýšeným tlakem, která je však s vnitřní energií ekvivalentní dle stavové rovnice ideálního plynu.

Tepelná energie (Matej Karpáč) Pri výpočte tepelnej energie budeme uvažovať, že škvrna je z 90 % tvorená vodíkom a 10 % héliom. Látkové množstvo vodíka, resp. hélia tak bude $n(\mathrm{H}) = 0{,}9m/M_\mathrm{m}(\mathrm{H})$, $n(\mathrm{He}) = 0{,}1m/M_\mathrm{m}(\mathrm{He})$, kde $M_\mathrm{m}(\mathrm{H}) = 1\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$ a $M_\mathrm{m}(\mathrm{He}) = 4\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$. Teplota Veľkej červenej škvrny rastie s hĺbkou, celkovo však dosahuje hodnôt zhruba 100 K až 400 K, pri výpočtoch vezmeme teplotu $T = 250\,\mathrm{K}$. Vodík tvorí dvojatómové molekuly, zatiaľ čo hélium ostáva v nezlúčenom stave. Tepelnú energiu Veľkej červenej škvrny sa pokúsime určiť ako:

$$U = \frac{5}{2} n(\mathrm{H}) RT + \frac{3}{2} n(\mathrm{He}) RT = \left(\frac{5}{2}\frac{0.9}{M_m(\mathrm{H})} + \frac{3}{2}\frac{0.1}{M_m(\mathrm{He})}\right) mRT \approx 1{,}46\cdot 10^{25}\,\mathrm{J}\,.$$

[6] Wikipedia contributors. (2025, May 1). Jupiter. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Jupiter

Chemická energie

Odhad chemické energie byl jedním z nejproblematičtějších. Většina řešitelů uvažovala především nestabilní molekuly na horní hranici atmosféry, objevily se ale i nápady s využitím spalného tepla. Tento přístup naráží především na absenci kyslíku v atmosféře Jupiteru, což pro nás dělá tento způsob zisku energie nedostupný. Jako příklad zde uvádíme řešení Aleny Mouchové zabývající se fotochemickou reakcí metanu. I když nám odhad počtu molekul přijde o pár řádů podhodnocený, výsledek je stále o několik řádů nižší než ostatní druhy energie. Dalším problémem odhadů tohoto druhu energie opět je, že by dané chemické látky byly v atmosféře v nějakém množství přítomny i bez Velké rudé skvrny, tedy správně bychom museli opět počítat rozdíl koncentrací s bouří a bez ní.

Fotochemické reakce (Alena Mouchová, upraveno) Chemická energie je energie uložená v chemických vazbách mezi atomy a molekulami. V případě atmosféry této skvrny je chemická energie spíše spojena s danými fotochemickými procesy, tedy s reakcemi mezi molekulami vodíku, helia, methanu a amoniaku (prvky, které jsou nejvíce zastoupeny v atmosféře), než s běžnými spalovacími procesy. Zdrojem energie pro takovou fotochemickou reakci může být Sluneční záření, které může ionizovat a excitovat molekuly v atmosféře, což vede k uvolnění velmi malého množství energie ve formě tepla (což je oproti řádům ve kterých počítáme výše zanedbatelné). Potom tu máme reakce mezi chemickými sloučeninami, tedy mezi methanem, amoniakem a vodikem, které mohou uvolnit určitou energii, která však obvykle taky nemá významný vliv na celkový energetický rozpočet bouře.

Například si představme, že fotochemické reakce mezi methanem ($\mathrm{CH_4}$) a UV zářením uvolní energii přibližne 0,1 eV na molekulu. 1 eV je přibližně $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J.

Pokud bychom předpokládali, že v oblasti Velké červené skvrny se každou sekundu vytvoří 10^{20} molekul methanu, které podstoupí fotochemické reakce, můžeme spočítat energii uvolněnou za jednu sekundu

$$E_{\mathrm{ch}} = \text{počet molekul} \cdot \text{energie na molekulu}\,,$$
$$E_{\mathrm{ch}} = 10 \cdot 10^{20}\,\mathrm{s^{-1}} \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{J} = 16{,}02\,\mathrm{J{\cdot}s^{-1}}\,.$$

Toto je velmi malá energie, pouze $16\,\mathrm{J{\cdot}s^{-1}}$, což je zanedbatelný příspěvek k celkové energii bouře, která je v řádu 10^{21} J. Takže vidíme, že fotochemické procesy mohou generovat drobné množství energie, ale tento příspěvek je fakt velmi malý ve srovnání s kinetickou, potenciální a tepelnou energií skvrny. Z výpočtů vidíme, že chemická energie je v tomto případě zanedbatelná (pouze desítky joulů za sekundu), a tudíž ji můžeme v celkovém energetickém rozpočtu ignorovat.

Další typy energie

Kromě výše uvedeného se objevily diskuse o dalších typech energie. Jako příklad pěkně provedené diskuse zde uvádím tu od Aleny Mouchové. Z dalších typů energie mě zaujala elektromagnetická energie blesku od Radima Švece. Blesky na Jupiteru sice v oblasti červené skvrny pozorovány nebyly, ale fyzikálně se jedná o moc pěknou úvahu.

Elektromagnetická energie blesků (Radim Švec) Poněvadž se v atmosféře Jupitera objevují zamrzlé krystalky amoniaku a vody nebo vodní pára, dá se předpokládat, že se zde vyskytuje i elektromagnetická energie projevující se aktivitou blesků. Jelikož blesk představuje elektrostatický výboj mezi nahromaděnými záporně nabitými ionty, jeho původ byl vysledován ve srážkách vodních částic, které si mezi sebou předávají elektrony a následně se separují. Samotný výboj může probíhat buď mezi oblaky nebo mezi atmosférou a povrchem, kdy lze vzhledem k rozměrům skvrny předvídat mnohem silnější reakce než na Zemi. Zde rozdíl ještě umocňuje záporný náboj molekul vody (kroupy) situovaných v dolní části oblaku a velký obsah vodíku, který případně může přecházet na kladné protony vlivem kosmické radiace. Jako referenční hodnotu si vyberu jev pozorovatelný na Zemi s předpokladem, že zde očekáváme zhruba 100krát větší hodnotu napětí a vzhledem k rozloze průběh sta blesků současně.

$$
\begin{aligned}
U &= 150\,\mathrm{GV} \\
I &= 30\,\mathrm{kA} \\
t &= 0{,}2\,\mathrm{s} \\
k &= 100 \\
E &= UQ = UIt \\
E' &= kE = kUIt \\
E' &= 10^2 \cdot 150 \cdot 10^9\,\mathrm{V} \cdot 30 \cdot 10^3\,\mathrm{A} \cdot 0{,}2\,\mathrm{s} = 9 \cdot 10^{16}\,\mathrm{J}
\end{aligned}
$$

U této formy energie je nutné si uvědomit její nestálost, neboť do značné míry závisí na srážkách a přenosu náboje mezi molekulami či ionty. Navíc model situace podkládají pouze odhadnuté hodnoty, které nelze jednoznačně podpořit pozorováním nebo vyhledanými informacemi.

Diskuse

Nejlépe definovaným a zároveň nejvýznamnějším příspěvkem k energii Velké rudé skvrny je kinetická energie rotace, která má hodnotu řádově $10^2 3\,\mathrm{J}$. Další významnou složkou je potenciální energie a tepelná energie, které jsou obě hůře definované vzhledem k rozdílu výšky respektive teploty oproti klidné atmosféře, avšak mohou dosahovat až řádově podobných hodnot. Energie kmitů skvrny, chemická energie i elektromagnetická energie blesků (které dosud v této oblasti nebyly detekovány) jsou oproti ostatním druhům energie zanedbatelné.

Diskuse (Alena Mouchová) Přestože jsem se snažila co nejlépe popsat různé formy energie spojené s Velkou červenou skvrnou Jupiteru, je potřeba si uvědomit, že jde o velmi hrubý odhad, který je založený na silném zjednodušení hodně složitého fyzikálního systému. Velikým zdrojem nepřesnosti je především geometrická aproximace skvrny jako válce, přičemž skutečný tvar a vnitřní struktura bouře je mnohem komplexnější a rozhodně ne válcovitý, od čehož se odvíjí vlastně i hmotnost, se kterou počítáme všechny druhy energie. Taktéž je použitá hustota atmosféry pouze průměrná a odhadnutá hodnota, která ve skutečnosti může velmi lišit v závislosti na výšce, teplotě nebo chemickém složení. Dále je nutné zmíniti, že jsem při výpočtech použila maximální rychlost větru, která se vyskytuje jen v určitých částech bouře (hlavně na jejím okraji), takže by průměrná kinetická energie ve skutečnosti byla nižší.

Podobně je i výpočet tepelné energie zatížen nejistotami. Konkrétně je odhadovaná tepelná kapacita atmosféry pouze orientační, protože skutečné složení plynů (zejména podíl molekul vodíku, helia a dalších látek by měl na hodnotu větší vliv). Také jsem počítala s jednoduchým tepelným rozdílem $10\,\mathrm{K}$, i když ve skutečnosti dochází k lokálním extrémům nebo výraznějším změnám souvisejících s různou výškou a může to být prostě v každé části jiné. V případě chemické energie jsem dokonce celý přínos pouze hrubě odhadla z fotochemických procesů, které se velmi těžko kvantifikují, jelikož neznáme přesné složení atmosféry a také intenzity dopadajícího slunečního záření. Navíc jsem úplně vynechala některé další potenciální složky, jako je např. latentní teplo spojené s kondenzací nebo sublimací látek, nebo magnetohydrodynamické jevy, které mohou být na Jupiteru významné.

Nakonec bych ještě řekla, že díky velkým aproximacím, reálně energie bude trochu nižší, jelikož jsem spíše data nadhodnocovala, také je nutno říci, že velikost skvrny se neustále mění (zmenšuje se zatím) a počítala jsem s daty z roku 2014, takže teď už to také bude jiné.

Celkově bych řekla, že výsledný energetický odhad má spíše obrazný charakter díky kterému si můžeme alespoň řádově představit velikosti tohoto zajímavého atmosférického jevu.

Vývoj energie v čase

Při diskusi vývoje energie se většina řešitelů shodla, že vzhledem k dosavadnímu trendu poklesu rozměrů skvrnu bude její energie spíš klesat.

Vývoj energie v čase (Damian Šatánek) V současné chvíli dochází k postupné změně tvaru skvrny z oválu na kruh, který by současnou rychlostí byl dokončen v roce 2040. Zároveň ale se rychlost bouře zvýšila. Ve 20. stol. byla blíže k $90\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ zatímco dnes již jsou maximální rychlosti blíže k $120\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, přesto ale ztrácí svou energii [7]. To může být způsobeno srážkami s dalšími bouřemi, které z krátkodobého časového horizontu bouři posilují, ale z dlouhodobého způsobují snížení stability. Také je možné, že v důsledku jiných efektů došlo ke snížení rychlosti zóny a pásu oproti času jejího vzniku a nyní pouze vyčerpává svoji energii a zánik je nevyhnutelný.[8] Zároveň jsme ale pozorovali, že v roce 2019 po srážce s anticyklónami došlo k odtržení velkých částí skvrny. Tehdy bylo spekulováno o možném zániku, ale nestalo se tak. Nedošlo ani ke ztrátě rychlosti či větrnosti. Pouze došlo k narušení 90 denní oscilace a vymizení barvy z relativně nepodstatné plochy. To může znamenat, že její síla a hloubka, které jsou obě mnohokrát větší než jiných anticyklón, umožní její přežití.[9] Lze tedy tvrdit, že jediným opravdovým nebezpečím pro skvrnu je „samozničení“. Pokud tedy bude pokračovat ve svém zmenšování a ztrácení energie, dost možná dojde k jejímu vymizení. Možná dojde k jejímu nahrazení Oválem BA, to je ale pouze spekulace. Pokud se tedy nic nezmění, bude energie skvrny pravděpodobně v budoucnu klesat.

Ale zároveň může dojít ke změně situace (jako muselo již dojít pouze v opačném směru) a skvrna opět zesílí. Nebo pohltí další anticyklóny a získá dodatečnou energii, kterou si tentokrát dokáže udržet. Bohužel ale rozhodnout, zda k něčemu takovému dojde, není dle mého názoru možné.

Podobně se vědecká obec dělí na tábor, který už 10 let predikuje zánik, a na tábor, který argumentuje pro dalších 100 let slávy skvrny.

[7] Ingersoll, A. P., Dowling, T. E., Gierasch, P. J., Orton, G. S., Read, P. L., Sanchez-Lavega, A., Showman, A. P., Simon-Miller, A. A., & Vasavad, A. R. (n.d.). Dynamics of Jupiter's Atmosphere. In `https://lasp.colorado.edu/mop/files/2015/08/jupiter_ch6-1.pdf`

[8] Bjoraker, G. L., Wong, M. H., De Pater, I., & Ad´amkovics, M. (2015). ´ JUPITER'S DEEP CLOUD STRUCTURE REVEALED USING KECK OBSERVATIONS OF SPECTRALLY RESOLVED LINE SHAPES. The Astrophysical Journal, 810(2), 122. `https://doi.org/10.1088/0004-637x/810/2/122`

[9] Editor Engineeringtoolbox. (2025b, March 26). Combustion heat. `https://www.engineeringtoolbox.com/standard-heat-of-combustion-energy-content-d1987.html`

Ale z konzervativního pohledu lze tvrdit, že bude energie skvrny klesat (minimálně povrchového víru, je možné, že její vnitřní struktura je naopak silnější, což ale nemůžu vyloučit ani potvrdit).

Kateřina Rosická
kacka@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.