

Úloha I.P ... nebe nám padá na hlavu

8 bodů; (chybí statistiky)

Už jste se někdy zamysleli nad tím, proč mraky nespadnou na zem, když jsou z vody, která má přece výrazně větší hustotu než vzduch? Dešťové kapky dopadnou na zem v rádech minut, tak proč ne i mraky? Zkuste tuto skutečnost fyzikálně objasnit. Veškerá svá tvrzení podložte výpočtem.

Mirek se zadíval na nebe a dostal strach.

Chrabří Galové se nebáli nikoho o ničeho, snad jen toho, že by jim nebe mohlo spadnout na hlavu. Ukážeme si, že ač třeba nejsme tak stateční jako galští válečníci, rozhodně se nemusíme bát toho, že by nás nebe neboli obloha zamáčklo do země. Pojem obloha není úplně jednoznačný, budeme ho proto používat z pohledu meteorologie jako označení pro troposféru, tedy dolní vrstvu atmosféry, ve které se „odehrává počasí“. Zde musíme přiznat, že atmosféra nás do země sice zamačkáva poměrně velkým tlakem (jehož velikosti se ze zřejmých důvodů říká 1 atmosféra), ale na tento tlak je lidské tělo zvyklé a nepocituje ho jako zátěž. Co by tedy na nás z oblohy mohlo spadnout? První věc, která nás na nebi kromě Slunce upoutá, jsou mraky. A těmi se budeme nadále zabývat.

Jak zadání připomíná, mraky jsou tvořeny primárně vodou. Když se podíváme do tabulek, tak zjistíme, že hustota vody je za běžných atmosférických podmínek zhruba tisíckrát vyšší než hustota vzduchu. Když si nalijeme do rukou vodu a hodíme ji do vzduchu, tak spadne k zemi velmi rychle. Stejně tak však ze zkušenosti víme, že padání mraků nepozorujeme. Podívejme se proto, co přesně mraky jsou a jak vznikají.

Když za chladného počasí vydechnete, vytlačíte tak ze svých plic horký, vlhký vzduch do prostředí s nižší teplotou, která je pro vydechnutý vzduch pod tzv. rosným bodem. Za takových podmínek nastane kondenzace¹ vodních par a vy před svými ústy pozorujete nabělalý obláček. A přesně tak vznikají i velká oblaka na obloze – vlhký vzduch se z rozehráté země dostává do vyšších vrstev atmosféry s nižší teplotou a kondenzovanou páru vnímáme jako bílé mraky. Oblaka se mohou nalézat v různé výšce, dokonce i mlha není ve své podstatě nic jiného než oblak, který je velmi nízko. Dolní hranici velikost kulovitých kapiček, z nichž se mrak skládá, lze na základě Mieova rozptylu² odhadnout na zhruba na 1 μm , běžné rozměry³ se pohybují mezi 10 až 20 μm .

Jak Galileo experimentálně ověřil, zrychlení objektů při pádu nezávisí na jejich hmotnosti, kapička vody by tedy měla z výšky řekněme 10 km dopadnout na zem při konstantním zrychlení $g = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ za necelou minutu. Opět ale ze zkušenosti víme, že malé částice z relativně hustého materiálu, například prach, padají k zemi poměrně pomalu (spíš se tak vznášejí). Příčinou pomalého pádu je odpor prostředí⁴. Ačkoli je vzduch velmi řídký, dokáže v závislosti na rozměrech objektu a jeho rychlosti působit nezanedbatelnými odporovými silami. V zásadě nám stačí vědět pouze to, že odpor vzduchu je závislý na horizontálním průřezu objektu a na jeho hmotnosti nikoli. Potom už si stačí jenom uvědomit, že když zmenšujeme poloměr homogenní kuličky, tak její hmotnost klesá rychleji než obsah jejího povrchu. Z toho již plyne, že

¹Z molekulárního hlediska znamená kondenzace vznik vodíkových můstků mezi molekulami vody, přičemž energie tepelného pohybu molekul je natolik nízká, aby nedocházelo k okamžitému zpretrhávání těchto vazeb.

²Rozptyl elektromagnetického vlnění na dokonalých sférách. Pro objekty větší než vlnová délka slabně závislost na konkrétní vlnové délce, a protože mraky jsou bílé, musí být částice v nich větší než 350 až 750 nm (rozsah vlnových délek viditelného světla).

³Velmi přesné měření rozměrů částic v oblacích (konkrétně v cirrech, vysoká oblačnost) za pomoci lidarů je popsáno například zde: <http://www.atmos-chem-phys.net/7/3507/2007/acp-7-3507-2007.pdf>.

⁴Tento poznatek nám mimo jiné říká, že kdybychom byli v prostředí bez atmosféry, tj. kdybychom vytvořili mrak například na Měsíci, tak by spadl dost rychle.

čím bude kulička menší, tím větší bude mít odpor vzduchu vliv v porovnání s tíhovou silou a kulička proto bude zrychlovat pomaleji.

Chceme-li být přesnější, pak musíme vědět, že na kuličku při začátku jejího pohybu začne působit Stokesova odporová síla daná vztahem (skalárně)

$$F_o = 6\pi r\eta v,$$

kde r je poloměr kuličky, η dynamická viskozita vzduchu a v rychlost kuličky. Pro jednoduchost budeme počítat se zaokrouhlenou hodnotou dynamické viskozity suchého vzduchu⁵ $\eta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, hustotu vody ρ zaokrouhlíme na $\rho = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Bude-li mít kulička rozměr $r = 10^{-5} \text{ m}$, dojde k vyrovnání odporové síly F_o a tíhové síly $F_g = mg$ při rychlosti⁶

$$v = \frac{mg}{6\pi r\eta} = \frac{2r^2 g \rho}{9\eta} \doteq 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

Touto rychlostí by kapka dopadla na zem z výšky 10 km za čas

$$t = \frac{10 \text{ km}}{10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}} = 10^6 \text{ s} \doteq 10 \text{ dní}.$$

Pokud by se jednalo o ještě menší kapky s rozměrem $r = 1 \mu\text{m}$, padaly by na zem stokrát déle, tedy zhruba 3 roky.

Jak jste si ale jistě během svých let na tomto světě všimli, mraky stále na zem nepadly. Může za to opět vzduch – tentokrát ne čistě jeho přítomnost, ale jeho pohyb. Celá atmosféra je neustále v pohybu, a to jak v horizontálním, tak vertikálním. Především konvekce vzduchu (stoupání teplejších oblastí) zajišťuje, že mraky vznikající výparem vody z povrchu země vystoupají do velkých výšek, kde postupně chladnou (adiabatické rozpínání) a jsou vytlačovány novými mraky s vyšší teplotou. Celá atmosféra je rozdělena do tzv. buněk, ve kterých vzduch, a tedy i mraky, cirkulují. Podrobnější informace naleznete například pod heslem „globální cirkulace atmosféry“. Pro nás je důležité, že rychlost tohoto pohybu se pohybuje v řádu jednotek až desítek⁷ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, což je s rychlostí volného pádu vodních částic zcela nesrovnatelné.

Přece jen však nastává chvíle, kdy mrak v určitém smyslu spadne. Když se oblak stále více ochlazuje, tak se mikroskopické kapičky častěji srážejí (je jich více v dané prostorové oblasti) a spojují ve větší útvary, vzestupné proudy vzduchu je proto nedokáží tlačit vzhůru tak snadno jako jemnější částičky a mrak klesá. Větší kapičky ve velkém množství hůře propouštějí světlo a mraky se jeví jako šedé. Dosáhne-li poloměru kapek kritické velikosti, začnou se vzrůstající rychlostí nabírat stále více vlhkosti z okolí, dále rostou a nakonec rychlostí kolem $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dopadnou na zem,⁸ prší. V mracích se však nevyskytují pouze částičky vody, ale také částičky ledu, neboť teplota v horní atmosféře je hluboko pod bodem mrazu. V takovém případě pak padají kroupy, které jsou buďto malé a ještě před dopadem roztají,⁹ nebo v mracích se silný-

⁵Obecně bychom se museli potýkat se závislostí na tlaku, teplotě a vlhkosti.

⁶Vypočtená velikost rychlostí nám také zaručuje, že jsme správně zvolili Stokesův vzorec, neboť s rostoucí rychlostí by se začala měnit závislost odporové síly na rychlosti samotné. Neuvažujeme zde, že se kapka pohybuje ze začátku zrychleně, neboť je to na časových škálách, se kterými pracujeme, zanedbatelné.

⁷https://www4.uwsp.edu/geo/faculty/lemke/geog101/lectures/05_pressure_wind.html

⁸<http://hypertextbook.com/facts/2007/EvanKaplan.shtml>

⁹Občas i kapky vody nedopadnou na zem – vidíme tedy nad sebou dešť, ale nedopadá. Tento jev se nazývá *virga*. Dochází k němu vlastně neustále v těsné blízkosti mraků, neboť kapky, které jsou příliš malé, se odpaří velmi rychle a vracejí se okamžitě zpátky do mraku. Proto často mraky vypadají před deštěm a během něj tak „rozcuchané“.

mi turbulencemi vydrží tak dlouho, dokud nenabudou velkých rozměrů a padají pak na zem ve formě ledových koulí, někdy s opravdu velkým průměrem.¹⁰

K závěru ještě připomeňme, že dokud se nezačnou v mraku formovat kapičky a jedná se tedy o směs vody a vzduchu v plynném stavu (vlhký vzduch), má tato směs menší hustotu než suchý vzduch. Vzduch se totiž skládá převážně z molekul dusíku a kyslíku, které mají větší hmotnost než molekula vody. To jen dále podporuje stoupání vlhkého vzduchu do horních vrstev atmosféry. Dojde-li však ke kondenzaci, vznikne koloidní suspenze a na ni již nelze aplikovat tvrzení platící pro plynné látky.

Suma sumárum tedy můžeme říct, že mraky na zem nespadnou díky zemské atmosféře a vůbec kvůli její přítomnosti vlastně existují. Nelze však vyloučit, že na nás z mraků občas spadne nějaký ten hydrometeor.

Miroslav Hanzelka
mirek@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

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

¹⁰Kroupy obvykle vznikají v bouřkových mracích, kde vzestupné proudy mohou mít rychlost až přes $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, <https://en.wikipedia.org/wiki/Hail>. Za mírnějších podmínek vznikají sněhové vločky.