

**21. ročník, úloha II. E ... bubo bubo (7 bodů; průměr 3,50; řešilo 20 studentů)**

Experimentálně proveďte tvrzení, že vinnou rotace Země se na severní (jižní) polokouli vír vody vypouštěné otvorem otáčí doprava (doleva). Mají-li mít vaše závěry váhu, musíte provést dostatečný počet měření v různých podmínkách.

Během návštěvy Austrálie vymyslel Honza Prachař.

**Teorie**

Hned na začátku opravme zadání úlohy, které je špatně. Kvůli rotaci Země by se měl vír otáčet *doleva* na severní polokouli, tj. ve směru rotace Země! Proč tomu tak je? Nejdříve se podívejme, co by se s vodou dělo, kdyby nebyla rotace Země. Tehdy je to jednoduché – voda ze všech stran v blízkosti otvoru prostě směřuje do otvoru a propadá jím dolů. Protože žádný směr otáčení není lepší než ten opačný, voda by měla bez vírů prostě propadnout otvorem. Naproti tomu často vír při vytékání vidíme. Co když stačí jenom malý nepostřehnutelný vír, který rozhodne směr, a voda už si vyvine mohutnější vír v tomto směru? Při pozorování takového víru se často zdá, jako by se vír roztočil a získal na síle. Ale není to tak. Faktem je, že celkový moment hybnosti vody v nádobě musí *klesat* (třením o povrch nádoby a vytékáním rotující vody), a tak se malý vír utlumí dříve, než voda stihne vytéct.

Proto není možné, aby z libovolně malého víru vznikl velký – voda nemá odkud získat moment hybnosti. Pokud ve vodě vidíme vír, už na začátku musel ve vodě být. Zdánlivé zesílení víru je způsobeno poklesem a přiblížením vody ke středu nádoby (efekt krasobruslařky).

Jak do hry vstoupí rotace Země? Pro zjednodušení si představme, že na severním pólu máme mísu s vodou a otvorem a my ji pozorujeme shora z inerciální soustavy, která se neotáčí. Pokud je otvor uzavřen, voda je klidná a rotuje spolu se Zemí doleva rychlostí jedna otočka za 24 hodin. Když teď otevřeme otvor, voda začne vytékat dolů. Přitom voda proudí také směrem od obvodu ke středu nádoby a dochází k efektu krasobruslařky – rychlost proudící vody se zvyšuje, a voda tedy předbíhá normálně rotující vodu. Na Zemi se zdá, že se voda odklání od původního směru doprava, a tedy celý vír se otáčí *doleva* (viz obr. 2).

Z hlediska pozorovatele na Zemi vysvětlíme jev tak, že Země rotuje úhlovou rychlostí<sup>1</sup>  $\Omega$  a na každé těleso, které se vzhledem k ní pohybuje rychlostí  $\mathbf{v}$ , působí v soustavě Země *Coriolisova síla*

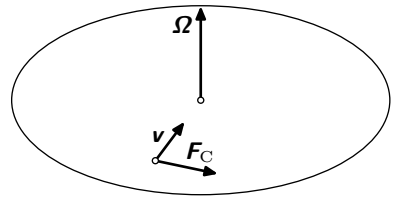
$$\mathbf{F}_C = -2m\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v},$$

kteřá ho odklání na severní polokouli doprava; vzhledem ke středu víru má tato síla moment roztáčející vodu proti směru hodinových ručiček, tj. *doleva*.

Zemská rotace má tendenci stáčet vír doleva, otázkou však je, zda je tato tendence dostatečně silná. Abychom získali aspoň nějakou představu o velikosti tohoto vlivu, odhadněme úhlovou rychlost, na jakou by Coriolisova síla roztočila vodu ve válcové míse poloměru  $R$ , výšky  $H$  a s otvorem poloměru  $a$ . Použijeme druhou impulsovou větu: časový účinek momentu Coriolisovy síly se rovná změně momentu hybnosti kapaliny. Z takové mísy bude voda vytékat rychlostí (Torricelliho vzorec)

$$v_{\downarrow} \sim \sqrt{Hg}$$

<sup>1</sup>) V dalším textu budeme pracovat s úhlovou rychlostí jako se skalárem, a proto ji budeme značit pouze  $\Omega = |\boldsymbol{\Omega}|$ .



Obr. 1. Coriolisova síla

po dobu

$$t \sim \frac{V}{v_1 S} \sim \frac{HR^2}{\sqrt{Hga^2}} \sim \frac{R^2}{a^2} \cdot \sqrt{\frac{H}{g}}.$$

Během vytékání na vodu působí celkový moment Coriolisovy síly, který odhadneme jako

$$M_C \sim F_C R \sim mv_t \Omega R,$$

kde  $m$  je hmotnost vody a  $v_t$  typická dostředivá rychlost vody; na začátku je voda ve vzdálenosti  $R$ , na konci je všechna voda ve středu, tudíž platí

$$v_t \sim \frac{R}{t}.$$

Potřebujeme ještě určit změnu momentu hybnosti – ať se na konci vytékání kapalina na okraji nádoby otáčí úhlovou rychlostí  $\omega$  – pak je moment hybnosti kapaliny

$$L \sim mR^2 \omega.$$

Tyto odhady jsou jenom řádové, protože nedokážeme přesně vypočítat, kde má kapalina jakou rychlost. Postačí ale pro řádový odhad úhlové rychlosti, kterou získá voda<sup>2</sup>.

Nyní použijeme druhou impulsovou větu a postupně dosadíme předchozí výsledky

$$\begin{aligned} M_C t &\sim L, \\ m \frac{R}{t} \Omega R t &\sim mR^2 \omega, \\ \omega &\sim \Omega. \end{aligned}$$

Dostáváme zajímavý výsledek, že Coriolisova síla dokáže roztočit vodu nanejvýš na úhlovou rychlost Země! Jde ale samozřejmě jen o řádový odhad. Aby bylo možné vír zpozorovat, musí se voda otočit o nějaký znatelný úhel, např.  $2\pi$ ; k tomu je zapotřebí čas

$$t = \frac{2\pi}{\Omega} = T.$$

Tedy zhruba jeden den. To je ohromně mnoho času pro náš vír v misce, ale ne až tak moc pro 100km vír vzduchu v atmosféře. Proto můžeme vidět na družicových snímcích víry roztočené Coriolisovou silou (a taky ty ostatní) – než vzduchové masy projdou k centru tlakové níže, uplyne hodně času a síla má čas působit. Abychom mohli pozorovat stočení víru i v naší misce, potřebujeme tedy prodloužit čas vytékání  $t$  – a to jedinečně zvětšením rozměrů naší misky. Pro námi uvažovanou válcovitou misku platí

$$T \sim \frac{R^2}{a^2} \sqrt{\frac{H}{g}}.$$

Pokud budeme chtít misku s proporci  $H = R = 100a$ , pak by její poloměr měl být

$$R \sim \frac{gT^2}{100^4} \sim 1 \text{ km}.$$

Ale to už berne s velkou rezervou.

<sup>2)</sup> Můžete si zkusit udělat přesnější model vytékání a pohybu kapaliny v nádobě a porovnat získané výsledky. Měli by vyjít řádově stejně bez ohledu na model – to je pěkné na řádových odhadech a rozměrové analýze.

### Provedení experimentu

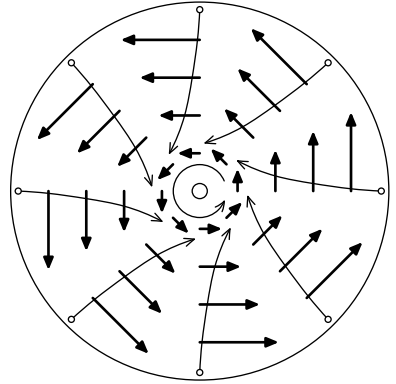
Každou teorii je třeba prověřit v praxi – experiment jsme dělali v koupelně s malou mističkou, lívkem a rotačním paraboloidem (zrcátko ze svítilny). Výtokový otvor jsme uzavírali a otevírali kouskem plastelíny. Na hladinu vody jsme nasypali trochu mouky na zviditelnění jejího pohybu, pak jsme ji nechali uklidnit a otevřeli otvor. *Ve všech případech* voda opakovaně vytekla bez jakékoli rotace. Malé víry, které v ní třeba i zůstaly po nalití vody, byly nemilosrdně utlumeny viskozitou vody. Zkoušeli jsme také vodu roztočit v obou směrech a sledovat, jestli se bude točit v daném směru, nebo dojde k onomu záhadnému „obrácení víru“, který někteří z vás popisovali ve svých řešeních. Voda si ale dostatečně silné roztočení bez problémů udrží, žádné otočení víru se nekoná. To je jasné potvrzení našich pochybností – rotace Země má vskutku zanedbatelně malý vliv na směr víru. Na směr výsledného víru má vliv kdeco, třeba i způsob, jakým vytáhneme špunt, zbytkové víry, tvar nádoby, ...

### Komentář k došlým řešením

Ve vašich řešeních se často objevil nesprávný předpoklad, že vír by se měl točit doprava, který následně velká část z vás experimentálně „dokázala“. Je nemožné říci přesně, proč jste dostali takové podivné výsledky (třeba 100 % pravotočivých vírů), myslím si však, že to je vinou špatného postupu měření – část z vás vytahovala špunt z umyvadla nebo vany, což rozvíří vodu úplně nepředvídatelným směrem a efekt Coriolisovy síly úplně překryje. Dalším zdrojem chyb bylo pravděpodobně nedostatečné ustálení vody. Zajímavý byl nápad některých z vás, že na rotaci víru má vliv malý magnetické pole Země. Není mi znám žádný mechanismus, jakým by se to mohlo dít, v každém případě tento efekt bude mnohem menší než působení Coriolisovy síly – voda je nemagnetická a nenabitá! Tento pokus je pro nás skvělým příkladem, jak lidi rádi přijímají různá líbivá vysvětlení a také jak lehké je přesvědčit samého sebe a udělat experiment a jeho interpretaci úplně špatně. Pozor na to!

*Ján Lalinský*

[jano@fykos.mff.cuni.cz](mailto:jano@fykos.mff.cuni.cz)



Obr. 2. Stáčení vodního víru