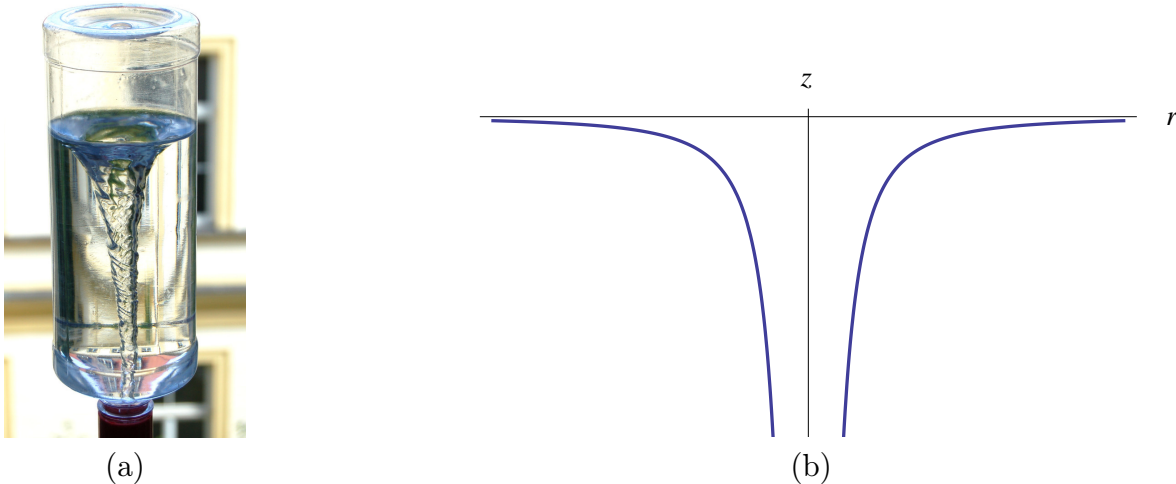


Víry kolem nás

Úvod

S vírem v nějaké podobě se setkal snad každý, jeden vidíme na obr. 1 (a). Ne každému je ovšem jasné, jak takový vír vzniká, co nutí vodu nebo vzduch obíhat dokola, proč mají víry někdy tak destruktivní účinky apod. Na tyto otázky se pokusíme odpovědět a chování víru si vysvětlit.



Obrázek 1: (a) Vír v láhvi a (b) profil ideálního víru

Představme si válcovou nádobu s otvorem uprostřed dna, který je nejprve ucpán zátkou. Mícháním vodu uvedeme mírného krouživého pohybu a poté zátku odstraníme. Co se stane? Voda začne odtékat, nejprve ta, která je nejbližší otvoru (a tedy i osy nádoby), a na její místo se po chvíli dostane voda, která byla od osy nádoby dále. Jestliže nyní zanedbáme vnitřní tření v kapalině, tedy viskozitu, pak díky symetrii nádoby nepůsobí na částice vody žádný moment síly vzhledem k ose nádoby. Jinými slovy, nic částice neroztáčí ani jejich krouživý pohyb kolem osy nebrzdí. Proto se bude zachovávat moment hybnosti částice kapaliny vzhledem k ose nádoby. Moment hybnosti částice kapaliny o hmotnosti m , která se pohybuje obvodovou rychlostí v a nachází se ve vzdálenosti r od osy, je dán součinem

$$L = mrv .$$

Je zřejmé, že pokud se má L zachovávat, pak při zmenšování r (jak se element kapaliny blíží k ose nádoby) musí růst obvodová rychlost v . Částice vody se tedy budou zrychlovat, jak se blíží k ose, a vlivem toho hladina vody už nebude rovná, ale prohnutá směrem dolů – vytvoří se typický nálevkovitý tvar víru. Není těžké vypočítat profil hladiny v ideálním víru, v němž pro obvodové rychlosti všech částic kapaliny platí $v = A/r$, kde A je konstanta. Profil je pak dán vztahem

$$z = z_0 - \frac{A^2}{2gr^2} ,$$

kde z_0 je konstanta (odpovídá výšce hladiny daleko od osy). Tento profil je znázorněn na obrázku 1 (b), kde vodorovná přímka odpovídá právě $z = z_0$.

Vidíme tedy, že jakýkoli rotační pohyb kapaliny ze „zesiluje“ tím, jak se kapalina blíží k výtokovému otvoru, a to díky zachování momentu hybnosti. To je také důvod, proč vzniká vír např. ve vaně nebo v umyvadle. Když člověk vyleze z vany, je voda jeho pohybem náhodným způsobem zvířená. A tento vířivý, rotační pohyb se stává zřetelnějším („zesiluje se“) při vytékání vody díky právě vyloženému principu.

Na kterou stranu se vír otáčí?

Často se traduje, že směr rotace víru ve vaně závisí na tom, na které jsme polokouli. Přitom se argumentuje tím, že rotační pohyb způsobuje setrvačná Coriolisova síla (více o ní v Zajímavé fyzice příští rok) způsobená rotací Země. Argumentace pomocí Coriolisovy síly je ovšem ekvivalentní naší argumentaci se zachováním momentu hybnosti¹, proto se podívejme, jak se rotace Země projeví na vzniku víru.

Pro jednoduchost si představme, že umyvadlo se nachází na severním pólu. Označme poloměr celé nádoby R , poloměr výtokového otvoru r a uvažujme částici, která se původně nacházela na okraji nádoby a během vytékání vody se dostala až do výtokového otvoru. Na začátku se tato částice vlivem rotace Země pohybovala obvodovou rychlostí $V = \Omega R$, kde Ω je úhlová rychlost rotace Země, tedy $\Omega = \frac{2\pi \text{ rad}}{24 \text{ hodin}} = \frac{2\pi \text{ rad}}{86400 \text{ sekund}} \approx 7,27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$. Obvodová rychlost elementu tekutiny ve chvíli, když už bude ve výtokovém otvoru, je díky zachování momentu hybnosti rovna $v = \frac{RV}{r} = \frac{\Omega R^2}{r}$ a odpovídající úhlová rychlost pak $\omega = \frac{v}{r} = \Omega \frac{R^2}{r^2}$. Podívejme se, jak velká by musela být nádoba s výtokovým otvorem o poloměru 2,5 cm, aby úhlová rychlost vody na odtoku byla $\omega = 1 \text{ rad/s}$, což by ještě zdaleka nestačilo na vytvoření víru, ale rotační pohyb by byl už okem postřehnutelný. Vyjde $r = R\sqrt{\frac{\omega}{\Omega}} = 2,9 \text{ m}$. Vidíme, že bychom potřebovali nádobu o průměru asi 6 metrů, aby se vliv rotace Země alespoň trochu projevil. Z toho je zřejmé, že na směr rotace víru ve vaně nebo v umyvadle nemá rotace Země a tím ani zeměpisná poloha pražádný vliv. Víř je způsoben výhradně zbytkovou rotací vody a směr jeho rotace je proto náhodný, podle toho, jak voda před vytažením zátky v nádobě zrovna proudila.

Chcete-li si to ověřit, nechte vodu po opuštění vany nebo napuštění umyvadla půl hodinky ustát. Když potom vytáhnete zátku, žádný vír se nevytvoří, protože náhodný pohyb vody již díky viskozitě vody ustal.



Obrázek 2: Víř na přehradě Texoma v Texasu.

¹Naše argumentace odpovídá pohledu z inerciální vztažné soustavy, zatímco argumentace pomocí Coriolisovy síly odpovídá pohledu z neinerciální vztažné soustavy spojené s rotující Zemí.

Velké víry

Existují ovšem i situace, kdy se rotace Země má vliv na vznik víru i směr jeho otáčení. Jak je vidět z předchozích úvah, při rostoucím poměru R/r bude růst i výsledná úhlová rychlost otáčení částic kapaliny, které se přibližují k ose. Pokud bychom tedy měli obrovskou nádobu o poloměru několika desítek či stovek metrů, pak by se při jejím vypouštění vír vytvořil skutečně vlivem rotace Země. Je to pravděpodobně případ i víru na obrázku 2 nebo na následujícím videu:

<https://www.youtube.com/watch?v=5hRSvVfAha0>

Podobně může vzniknout obří vír v atmosféře, jestliže je vzduch nucen tlakovou níží proudit do určitého místa (řekněme do bodu A). Vlivem rotace Země má vzduch určitý moment hybnosti, který se při jeho přibližování k bodu A projevuje zrychlující se rotací. Nasávání vzduchu do bodu A může být způsobeno např. rychle stoupajícím vzduchem zahřátým od zemského povrchu. Tímto způsobem může vzniknout tornádo (obr. 3 (a)). Jiným příkladem víru, tentokrát obřích rozměrů, je hurikán (obr. 3 (b)).



(a)



(b)

Obrázek 3: (a) Tornádo. (b) Hurikán v blízkosti Floridy

U vírů, o kterých jsme zatím mluvili, obíhají částice kapaliny nebo vzduchu kolem určité, většinou svislé přímky. Takovéto přímce se říká vírová čára a v ideálním víru rychlost roste nade všechny meze, jak se k vírové čáře blížíme. Je však také možné si představit, že vírová čára není rovná, ale zakřivená, jako např. u tornád na obr. 4. Je to případ i dvojitého víru, který není obtížné vytvořit tažením lžičky v hrnku kávy, viz obr. 5. Vírová čára je v tomto případě půlkružnice, jedná se tedy o dva konce jediného víru propojeného pod hladinou.



Obrázek 4: Tornáda se zakřivenou vírovou čarou



Obrázek 5: Vír v hrnku kávy vytvořený tažením lžičky. Obrázek jsem pořídil v oblíbené kavárně Costa v St Andrews ve Skotsku. Díky delšímu expozičnímu času (1/13 s) se zviditelnil pohyb tukových kapiček, které v kávě zbyly ze šlehačky.

Vírové prstence

Vírová čára většinou někde začíná a někde končí. Představme si ale situaci, kdy je vírová čára uzavřená sama do sebe a má např. tvar kružnice. Takovéto struktury říkáme vírový prstenec a je možné ji vytvořit pomocí zařízení na obr. 6 (a) – jde o válcovou nádobu (jakýsi „buben“), v jejímž dně je vyřezán kruhový otvor a na druhé straně je opatřena gumovou membránou. Při úderu do membrány vypudíme z otvoru vzduch. Při jeho tření o okolní, nepohybující se vzduch dojde ke vzniku vířivého pohybu, přičemž vírová čára má tvar kružnice. Vír pak postupuje prostorem a dokáže např. sfouknout svíčku (s naším bubnem na vzdálenost až 15 metrů), shodit pyramidu z kelímků apod. Pomocí kouře fouknutého z generátoru kouře do bubnu můžeme vírové prstence zviditelnit (viz obr. 6 (b)) a ještě lepšího efektu dosáhneme, jestliže navíc tento kouř prozáříme laserem, viz obr. 6 (c).



(a)



(b)



(c)

Obrázek 6: Vírové prstence ve vzduchu

Podobný buben můžeme vytvořit i v mnohem menším měřítku např. z krabičky od pomazánkového másla. Vírové prstence se dají střílet i z obyčejné PET lahve, na jejíž stěnu cvrnkneme prstem. Vzniklým prstencem lze sfouknout svíčku i na tři metry, jestliže se trefíme.

Prstence někdy vznikají v přírodě samovolně, např. při sopečných erupcích, když praskne obří bublina v lávovém jezeře, viz obr. 7 (a), nebo při výbuchu, viz obr. 7 (b).

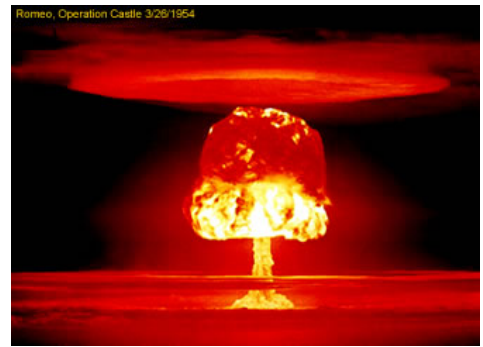
Vírové prstence mohou vznikat na mikroskopických škálách stejně jako na obřích. Příkladem nejmenšího prstence jsou kvantované mikroskopické prstence v supratekutém heliu, příkladem obřího zase hřib



(a)



(b)



(c)

Obrázek 7: (a) Vírový prstenec nad sopkou Villarica v Chile, (b) vírový prstenec vzniklý výbuchem nitroglycerínu v továrně na výbušniny v Semtíně 20. dubna 2011, (c) vírový prstenec vzniklý po výbuchu atomové bomby.

vzniklý po výbuchu atomové bomby, viz obr. 7 (c).

Vírové prstence můžeme vytvářet i ve vodě. Stačí k tomu PET láhev plná vody, do které pod vodou udeříme pěstí, nebo ji jen silně zmáčkne. Abychom prstenec zviditelnili, vytvoříme ve vodě předem spoustu bublin. Prstenec bublinky „nasaje“ a ty se následně uspořádají podél vírové čáry, viz obr. 8 (a). Mistry ve vytváření vírových prstenců ve vodě jsou běluhy, viz obr. 8 (b). Obr. 8 (c) ukazuje detail prstence ve vodě. Vírová čára může být dokonce propletena tak, že tvoří uzel. To se podařilo vědcům na univerzitě v Chicagu, video si můžete prohlédnout na stránce

<http://www.ineffableisland.com/2013/03/vortex-knot-tied-by-physicists-like.html>



(a)



(b)



(c)

Obrázek 8: Vírové prstence ve vodě: (a) prstenec vytvořený v hodině Zajímavé fyziky v akváriu, (b) kytovec běluha s prstencem, který vytvořila, (c) detail prstence ve vodě.

Na internetu lze nalézt nádherné fotky vírových prstenců ve vzduchu i ve vodě i proudění v nich, stačí zadat na googlu „vortex rings“.