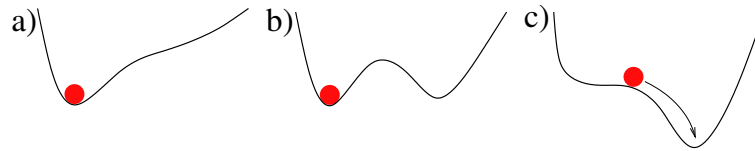


Zajímavé zvuky kolem nás

1 Šustění sáčku

Jistě vás už někdy napadla otázka, proč šustí mikrotenový sáček nebo alobal, když se ho dotýkáme nebo jej nějak deformujeme. Jakým způsobem vzniká tento zvláštní zvuk?

K jeho pochopení nám pomůže obyčejné víčko od kojenecké výživy. Jestliže pomalu zatlačíme prstem na jeho vydutou část, ozve se najednou lupnutí či cvaknutí. Původní poloha víčka se totiž pod vlivem tlaku prstu změnila na nestabilní a víčko přskočilo do nové, stabilní polohy, při níž je vyduté na druhou stranu, než bylo původně. Je to schematicky znázorněno na obrázku 1. Takovýto přeskok je velmi rychlý, protože víčko má poměrně malou hmotnost a síly v něm působící jsou relativně velké. Rychlý přeskok pak vyvolá chvění vzduchu, které vnímáme jako ostré lupnutí nebo cvaknutí víčka.



Obrázek 1: Model, který vysvětluje cvakání víčka od kojenecké výživy. Kulička představuje polohu víčka a může se pohybovat po dráze znázorněné křivkou. Než začneme na víčko tlačit prstem, má jen jednu rovnovážnou polohu (a). Při určitém tlaku se však vytvoří další rovnovážná poloha (b) a při ještě větším tlaku přestane být původní poloha stabilní, takže víčko je nuceno přskočit do polohy nové (c). Tento přeskok se odehraje velmi rychle a navenek se to projeví jako cvaknutí.

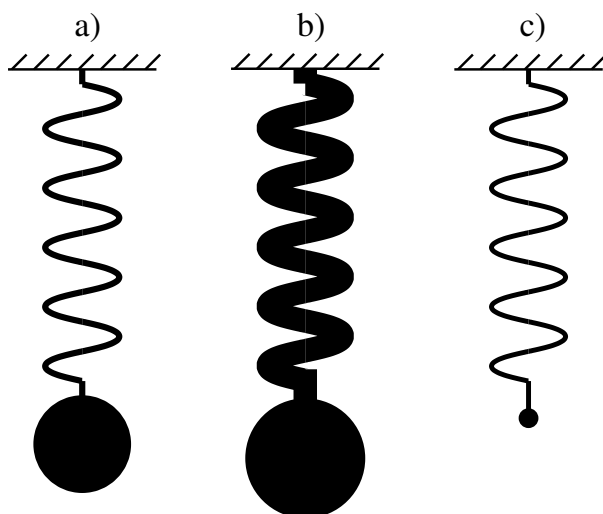
Prohlédneme-li si zblízka mikrotenový sáček, zjistíme, že jeho povrch má složitý tvar – je složen z velkého množství malých plošek oddělených ohyby. Když pak sáček začneme deformovat, stane se s některou ploškou přesně totéž, co s víčkem od kojenecké výživy. Její poloha přestane být stabilní, ploška přskočí do nové rovnovážné polohy a to se projeví slabým, sotva slyšitelným lupnutím. Nejlépe je to vidět při velmi pomalé deformaci kousku alobalu – tehdy jasně vidíme jednotlivé přeskoky a slyšíme jimi způsobená lupnutí. Pokud sáček nebo alobal deformujeme rychle, přeskakují popsáním způsobem stovky nebo tisíce plošek rychle po sobě. Sérii mnoha lupnutí pak vnímáme jako šustění. Protože lupnutí nepřicházejí v pravidelných časových intervalech, ale náhodně, nevydává sáček žádný hudební tón, ale jen nepravidelný šum. Dá se říci, že v tomto šumu je obsaženo mnoho různých frekvencí.

U alobalu si můžeme všimnout ještě jedné zajímavé věci: pokud je hodně nerovný (toho docílíme tak, že alobal po zmačkání rozbalíme, ale nevyhlazujeme), skoro vůbec nešustí. Pokud je ale velice rovný a hladký (toho docílíme vyhlazením nehtem), šustí silně. Je tomu tak proto, že u velmi pomačkaného alobalu dojde jen zřídka k přeskoku, protože úhly mezi ploškami jsou velké a není snadné změnit rovnovážnou polohu plošky. Naproti tomu u vyhlazeného alobalu se polohy mění snadno a lupnutí se ozývá mnohem více.

2 Dunění koktejlu

Už v dětství jsem pozoroval zajímavý jev, když nám maminka připravovala doma ovocné koktejly. Do mixéru dala černý rybíz, kousky banánu nebo jiné ovoce, zalila mlékem, přidala trochu medu nebo cukru a po krátkém mixování jsme měli pěnivý koktejl. Jak koktejl tekł s mixéru do hrnku, ozýval se zajímavý dunivý zvuk. Ten se pak dal také vytvořit poklepem na dno hrnku. To mě zaujalo a zkusil jsem totéž s vodou, ale tentokrát se neozvalo zadunění, ale spíše cinknutí. A prázdný hrnek také nijak zvlášť neduněl. Celkově bylo patrné, že zvuk vydávaný hrnkem s koktejlem je mnohem hlubší a dunivější než zvuk hrnku s vodou nebo se vzduchem.

Vysvětlení zvláštního dunění koktejlu není obtížné. Mixováním se do koktejlu dostane spousta bublin různých velikostí. Tyto bubliny se pak musí skrz hustý koktejl prodírat na hladinu, což jim, zvláště těm menším, může dlouho trvat, nebo dokonce zůstanou zcela uvězněny (protože koktejl ani není v pravém smyslu kapalina – i např. v medu, tedy značně viskózní kapalině, by po dostatečně dlouhé době vyplavaly všechny bubliny na povrch, což u koktejlu neplatí). Takže důležitý rozdíl mezi hrnkem vody a hrnkem koktejlu je v tom, že v prvním případě nejsou přítomny vzduchové bubliny, kdežto ve druhém ano. Je to logické – když něco duní, tak je to většinou duté. A koktejl je skutečně tak trochu dutý, protože obsahuje malé dutinky – bublinky vzduchu!



Obrázek 2: Model, který vysvětluje cvakání víčka od kojenecké výživy. Kulička představuje polohu víčka a může se pohybovat po dráze znázorněné křivkou. Než začneme na víčko tlačit prstem, má jen jednu rovnovážnou polohu (a). Při určitém tlaku se však vytvoří další rovnovážná poloha (b) a při ještě větším tlaku přestane být původní poloha stabilní, takže víčko je nuceno přeskocit do polohy nové (c). Tento přeskok se odehraje velmi rychle a navenek se to projeví jako cvaknutí.

Tím jsme si však ještě nevysvětlili, jak přesně dunivý zvuk vzniká a proč jsou pro jeho vznik bublinky důležité. Zkusme o tom uvažovat. Jistě to bude souviset s tím, že vzduch je mnohem (asi 22000 krát) stlačitelnější než voda. Protože koktejl jistě množství vzduchu obsahuje, je mnohem snazší jej poněkud stlačit než stlačit vodu, tj. ke zmenšení jeho objemu např. o jednu tisícinu stačí mnohem menší tlak než u čisté vody. Koktejl tedy může pružit v hrnkem mnohem lépe než voda a poklepáním na dno se tedy snáze rozkmitá a vytvoří zvuk.

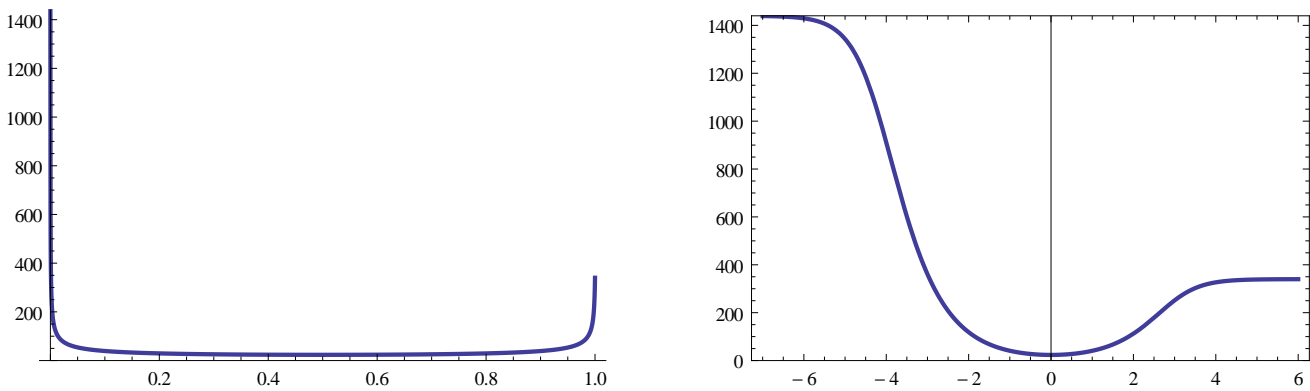
Podle této úvahy by ovšem měl dobře dunět i prázdný hrnek, ve kterém je samotný vzduch, protože vzduch je ještě mnohem snáze stlačitelný než koktejl. Jak se ale snadno přesvědčíme, prázdný hrnek

zdaleka neduní tak dobře jako koktejl, takže se zdá, že stlačitelnost možná není jediná veličina, která je pro dunění důležitá.

Pro vznik zvuku je důležité, aby vznikly mechanické kmity tekutiny v hrnku, které se pak přenesou do vzduchu a tím se šíří dál. Uvažujme, jak ke vzniku takových kmitů dojde. Když tekutinu trochu stlačíme a pak uvolníme (to se v podstatě děje při poklepání na dno), má snahu se zase vrátit zpět, začne se tedy rozpínat. Setrvačností toto rozpínání pokračuje ještě chvíli potom, co už tekutina zase nabyla původního objemu. Tím vznikne v tekutině podtlak, následkem čehož se začne zase smršťovat atd., a tímto způsobem vznikne kmitavý pohyb. Je to situace velmi podobná kmitání závaží na pružině – pružina nám zde reprezentuje pružnost tekutiny, zatímco hmotnost závaží souvisí s hmotností tekutiny v hrnku, tedy s její hustotou. Je známo, že závaží bude kmitat tím pomaleji, čím je pružina měkká a čím je závaží těžší. Dá se to vyjádřit rovnicí

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (1)$$

kde f je frekvence kmitání, k je tuhost pružiny a m je hmotnost závaží. Pomyslná pružina u koktejlu je dost měkká a závaží dost těžké (viz obrázek 2 a), takže kmitání bude velmi pomalé – slyšíme dunění. U samotné vody je sice závaží ještě o něco těžší než u koktejlu, ale pružina je nesmírně tuhá (viz obrázek 2 b) – výsledkem jsou velmi rychlé kmity (cinknutí). A u vzduchu je sice pružina velmi měkká, ale závaží je nesrovnatelně lehčí než u koktejlu (viz obrázek 2 c), takže výsledkem budou opět rychlé kmity. Koktejl tedy v sobě spojuje dvě vlastnosti vhodné pro dunění – relativně dobrou stlačitelnost (díky přítomnosti bublin) a současně relativně velkou hustotu (díky značnému množství vody, kterou obsahuje). Samotná voda a samotný vzduch mají vždy jen jednu z uvedených vlastností, takže neduní.



Obrázek 3: Rychlost zvuku v homogenní směsi vody a vzduchu. V obou grafech je na svislé ose rychlost zvuku. V prvním grafu je na vodorovné ose vynesena poměr objemu vzduchu k celkovému objemu směsi (tedy $x = 0$ odpovídá čistá voda, $x = 1$ čistý vzduch). Je vidět, že zvuk je velmi pomalý ve velkém rozsahu objemových koncentrací vzduchu. Pro lepší zachycení průběhu rychlosti je ve druhém grafu na vodorovné ose vynesena dekadický logaritmus poměru objemu vzduchu a vody. V minimu dosahuje rychlost zvuku hodnoty pouhých 24 m/s, což je výrazně méně než pro čistou vodu i čistý vzduch. Rychlost zvuku v čisté vodě a v čistém vzduchu je 1440 m/s a 340 m/s, což jsou hodnoty, ke kterým křivky jdou v levých a pravých částech grafů.

Uvedené kvalitativní vysvětlení lze popsat i kvantitativně. Nejlépe k tomu poslouží fyzikální veličina, která souvisí s frekvencí dunění, ale nezávisí na tvaru a velikosti hrnku – rychlost zvuku v

dané tekutině. Čím bude rychlost vyšší, tím vyšší bude vydávaný tón a naopak. Jestliže budeme pro jednoduchost považovat koktejl za homogenní směs vody a vzduchu, lze odvodit vzorec pro rychlost zvuku ve směsi. Ukazuje se, že nejmenší rychlost nastává pro poměr voda:vzduch přibližně 1:1 a činí asi 24 m/s. To je výrazně méně než rychlost vzduchu ve vzduchu (340 m/s) i ve vodě (1440 m/s). Rychlost zvuku ve směsi je ale výrazně snížena oproti 340 m/s ještě pro objemové koncentrace vzduchu ve směsi kolem 1/300 a pro koncentraci 1/100 je rychlost stále jen asi 100 m/s. Grafy rychlosti v závislosti na koncentraci jsou na obr. 3.

3 Zvuk při vaření vody

Proč při vaření vody v konvici na sporáku nebo v rychlovarné konvici vzniká zvláštní zvuk? A jak to, že silící hučení, které oznamuje brzký bod varu, najednou téměř utichne, jakmile voda skutečně začne vřít?

Vysvětlení tohoto zajímavého zvuku je následující: při ohřívání vody se zahřívá nejprve kovové dno konvice od plamene (nebo topná spirála) a teprve od něj samotná voda. Jde tedy o ohřev značně nerovnoměrný – voda v těsné blízkosti dna má již po několika sekundách od postavení konvice na plamen téměř teplotu varu, zatímco voda ve větší vzdálenosti je mnohem chladnější. Následkem toho dochází k intenzivnímu promíchávání (tzv. konvekci), při které lehčí horká voda stoupá nahoru a na její místo se dostává voda chladnější, a horká vrstvička u dna se také ochlazuje od zbylé vody obvyklým vedením tepla. Žádný zvuk se zatím neozývá.

Když se ale voda v celé konvici postupně zahřeje na vyšší teplotu (kolem 60 stupňů Celsia), nestačí již dostatečně ochlazovat vrstvičku vody, která je v kontaktu s horkým dnem konvice, a voda v této vrstvičce začne vřít. Vznikají bublinky páry, které se prudce zvětšují, a pokud by v celé konvici měla voda již teplotu varu, stoupały by až na hladinu. Protože je ale voda v konvici stále ještě výrazně chladnější než 100 stupňů Celsia, bublinka páry se po krátkém stoupání dostane do chladnější vody. Zde ovšem dojde k jejímu ochlazení a následně prudké kondenzaci páry, čímž se bublinka pohltí a zmizí. To vyvolá rychlý pohyb okolní vody do místa zmizelé bublinky a vzniká zvuk (připomínající jakési cvaknutí), který se přenáší dále do vody a okolního vzduchu. A protože ke vzniku a kolapsu bublinek dochází v okolí celého dna, je vzniklý nepravidelný zvuk dosti silný a slyšíme jej jako známé hučení nebo šumění.

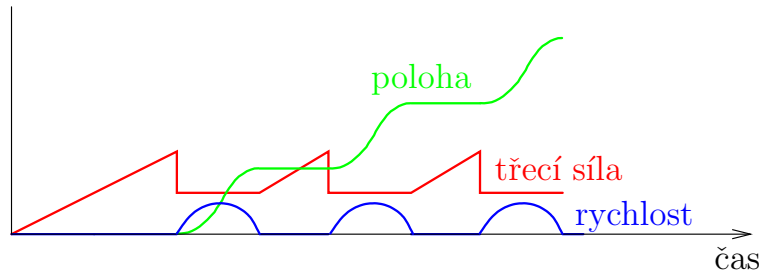
Situace se ale opět změní, když už voda v celém objemu dosáhne teploty varu. V té chvíli bublinky páry vznikající na dně a stoupající vzhůru nejsou ničím ochlazovány, nezanikají tedy a nejsou proto zdrojem zvuku. Zvuk proto v této fázi paradoxně poněkud utichne, což nám může být znamením, že voda je už dost horká a můžeme si třeba zalít čaj.

4 Vrzání dveří

Každý jistě zná zvuk vrzání dveří nebo skřípění brzd vlaku. I tyto zvuky lze poměrně jednoduše vysvětlit pomocí fyzikálních zákonů.

Představme si vrzající dveře. Jejich panty se vyznačují tím, že nebyly dlouho promazány, a je v nich proto velké tření. Jestliže takové dveře chceme otevřít, zatlačíme na ně, ale díky velkému tření v pantech zpočátku nedojde k prokluzu v pantech, ale k deformaci dveří. Jak síla, kterou na dveře tlačíme, narůstá, narůstá i statická třecí síla v pantech. V určité chvíli dosáhne třecí síla určité mezní hodnoty, nad kterou nemůže jít, a pant začne prokluzovat. V tom okamžiku se statické tření změní na dynamické, které je vždy o něco menší. Odpore pantů najednou skokem poklesne a dveře se začnou pohybovat. Díky svému napružení je tento pohyb značně zrychlený, panty „poskočí“, napětí v nich

poklesne a dostane se pod hodnotu maximálního statického tření. V té chvíli se pohyb pantů zastaví, třecí síla začne narůstat a vše se opakuje. Na obrázku 4 je schematicky zachycen průběh třecí síly, rychlosti pohybu pantů a jejich polohy u vrzajících dveří.



Obrázek 4: Schematické znázornění průběhu třecí síly, rychlosti pohybu pantů a jejich polohy u vrzajících dveří.

Vidíme tedy, že dveře v pantech se nepohybují rovnoměrně, ale „poskakují“. Tyto vibrace se přenesou na vzduch a vytvoří typický vrzavý zvuk. Je zřejmé že čím rychleji dveřmi pohybujeme, tím rychleji se budou přeskoky opakovat a zvuk, který dveře vydávají, bude mít vyšší frekvenci. Pokud ale dveřmi otáčíme příliš rychle, nebudou panty už stíhat se zastavovat a k vrzání vůbec nedojde. Proto je dobré vrzající dveře otvírat rychle. Přitom vrznou jen krátce na začátku a konci otevírání. Druhá možnost je panty namazat olejem. Tím se značně sníží jak dynamické, tak statické tření (i relativní rozdíl mezi nimi) a dveře přestanou vrzat.

Vrzání dveří úzce souvisí s mechanismem hry na housle (jak známo, dokonce i zvuk je někdy, když hraje začátečník, podobný). I tam je důležitý rozdíl mezi statickým a dynamickým třením, který se zvyšuje potřením smyčce kalafunou.

Velký rozdíl mezi statickým a dynamickým třením je žádoucí i při klasickém stylu běhu na lyžích. Při odrazu je totiž dobré, aby tření bylo co největší, a běžkaři dobře vědí, jak je běh na lyžích namáhavý, když lyže prokluzují a musí se „to tahat rukama“. Na druhou stranu dynamické tření by mělo být co nejmenší, protože po odrazu se chceme na druhé lyži co nejdále sklouznout. Umění dobrého mazání lyží tak spočívá v tom, jak co nejvíce zvětšit statické a současně zmenšit dynamické tření na daném typu sněhu.

5 Pískání vlnitého plechu

Zajímavý zvuk můžeme slyšet, když tleskneme nebo dupneme v blízkosti vlnitého plechu. Čím je plech delší, tím lepší, a ideální vzdálenost pro tento pokus je stát asi 10 m od plechu. Frekvence tónu je nejprve vyšší a pak klesá. Jak se to dá vysvětlit? Vysvětlení jsou dvě, navzájem ekvivalentní.

Při tlesknutí vytvoříme ostrý zvuk. Ten se odráží od jednotlivých vlnek plechu a vrací se k nám jako ozvěna. Ozvěna od každé vlnky je poněkud opožděna oproti ozvěně od vlnky předchozí kvůli větší vzdálenosti, kterou musí zvuk urazit. To, co slyšíme, je proto série ozvěn ostrého zvuku, které jdou pravidelně po sobě. Výsledkem jsou periodické změny tlaku vzduchu a tedy zvuk, který slyšíme. Pokles jeho frekvence s časem je důsledkem toho, že časové zpoždění ozvěny od sousedních vlnek souvisí také s úhlem, pod kterým zvuk na plech dopadá. Zpočátku je dopad skoro kolmý a zpoždění je malé, později se zvuk odráží od vzdálených vlnek a zpoždění se blíží k $2d/v$, kde d je vzdálenost sousedních vlnek („vlnová délka“ vlnitého plechu) a v je rychlost zvuku. Z toho lze snadno odvodit, že vlnová délka zvuku ke konci písknutí se blíží ke dvojnásobku vlnové délky vlnitého plechu.

Druhé vysvětlení spočívá v pohledu na situaci jako na difrakční problém. Vlnitý plech funguje jako mřížka, na které nastává difrakce a která tedy zvuk odráží nejen do směru daného zákonem odrazu, ale i do dalších směrů – do těch, pro které nastane konstruktivní interference vln odražených od jednotlivých vlněk plechu. Pro každou frekvenci zvuku jsou tyto směry jiné. V tlesknutí či dupnutí, které je ostré, je obsaženo mnoho frekvencí spektra. Proto se pro každé místo vlnitého plechu najde taková frekvence, která je obsažena ve spektru tlesknutí a pro kterou se zvuk odrazí zpátky k nám. Není těžké se přesvědčit, že je to právě taková frekvence, kterou dostaneme pomocí prvního vysvětlení se zpožděnými ozvěnami.

Běžně se mi stává, že někde jdu po ulici a najednou slyším známý pískavý zvuk vlnitého plechu. Podívám se a teprve teď plech spatřím. Někdy je to ale třeba jen laťkový plot, na kterém efekt nastává také, jen není tak výrazný.

V blízkosti PřF je vlnitý plech na ulici Sokolská (pod křižovatkou s Kounicovou ulicí), na Jana Babáka nebo na Lerchově.