

Jednoduché pokusy z vlnění a akustiky

Leoš Dvořák,

katedra didaktiky fyziky MFF UK Praha

Příspěvek představuje sadu pokusů z oblasti vlnění a akustiky, které lze využít ve výuce fyziky na střední i základní škole. Většinou jde o pokusy s jednoduchými pomůckami. Některé pokusy využívají počítač se zvukovou kartou, ten však vzhledem k rozšíření výpočetní techniky už dnes také téměř můžeme považovat za jednoduchou pomůcku.

Úvodní poznámka

Uvedenou sadu pokusů předvádím při akcích pro studenty středních i základních škol. (Může jít prakticky o tytéž pokusy, liší se jen úroveň vysvětlení a důraz na kvantitativní měření.) Pokusy jsem též předváděl na několika seminářích pro učitele konaných v pedagogických centrech. Některé z dále uváděných pokusů jsem již prezentoval na Šoltésových dnech 2003, zde proto budou připomenuty jen stručněji. Budou ovšem zasazeny do kontextu dalších pokusů, které na sebe v řadě případů navazují. Přesto bych nechtěl jejich sled prosazovat jako nějakou „určitě správnou metodiku“. Cílem je spíše dát učitelům fyziky náměty, jaké pokusy z uvedených oblastí mohou být ve výuce zajímavé a v jaké návaznosti by mohly být řazeny.

Jak začít trochu netradičně

Prezentaci obvykle začínám konstatováním, že žáci (studenti) o zvuku už spoustu věcí vědí a že mi tedy sami mohou říci: 1. jaké vlastnosti zvuk má a 2. co může dělat (nebo co my s ním můžeme dělat). Odpovědi, ať už formulované ve fyzikálních termínech nebo v „běžné řeči“ zapisuji do dvou sloupců na tabuli a někdy stručně komentuji, že tu či onu vlastnost si v pokusech ukážeme. (Některé spíše ne. Například měření hlasitosti by vyžadovalo hlukoměr, což je velmi drahý přístroj.)

Mezi věcmi, „které můžeme se zvukem dělat“ se objeví (obvykle až mezi posledními nápady) to, že jej můžeme vydávat. Zeptám se, jak nejjednodušeji vydáme zvuk, nemáme-li žádný hudební nástroj ani pomůcku. Řada lidí odpoví, že hlasem. Na to požádám auditorium: „Takže vydejte zvuk. Zařvěte!“ Odpovědi bývá nervózní smích a stěží slyšitelné „kníknutí“ několika jedinců. Obvykle až na třetí pokus je zařvání dostatečně silné. Pak vybidnu přítomné, aby udělali pokus (starý známý, který asi většinou už dělali) – zařvali znovu, ale předem si lehce přiložili prsty jedné ruky na krk (na hrtan). A zeptám se, co cítili. Odpovědi „chvění“, „vibrace“ apod. nás přivedou ke konstatování, že zvuk má něco společného s chvěním. Jakmile něco kmitá (v patřičném rozsahu frekvencí) a může rozkmitat vzduch, budí to zvuk. Ten se šíří vzduchem a my ho slyšíme.

Proč začínat takto? Při diskusi o tom, proč takhle začínat, bychom mohli používat mnoho moderních cizích slov, mluvit o konstruktivismu, kontextové výuce apod. Podstatné však je, že, jak zkušenost ukazuje, dá se takto rychle navodit zájem studentů, „zboří se“ (či alespoň výrazně se oslabí) bariéra mezi učitelem a žáky a navodí se atmosféra interakce a spolupráce.

Zdroje zvuku – píšťaly a sirény

Po zmíněném úvodu přecházíme ke zdrojům zvuku. Strunu a strunné nástroje obvykle jen zmíním a věnujeme se píšťalám. Píšťalka, ať už z vrbového proutku či zakoupená někde v tržnici, ukáže, že kratší vzduchový sloupec zní vyšším tónem, delší nižším. Totéž platí i pro různé trubky (roury, třeba plastové od vysavače). Vzduch v nich můžeme rozkmitat tak, že na konec udeříme dlaní (zvuk je krátký, ale jasně slyšíme jeho výšku) nebo jen dvěma prsty (tón

je v tomto případě o oktávu vyšší). Druhou možností je foukat na hranu trubky – po troše cviku dokážeme trubku rozeznít tak, že tón připomíná až fujaru. O závislosti výšky tónu na délce trubky řeknu, že to je něco, co bychom se měli snažit pochopit (a že se k tomu ještě vrátíme).

Místo dlouhé roury lze použít i kus zahradní hadice. Do konce hadice s průměrem větším než asi coul (2,54 cm) lze nacpat rty a (opět po troše cviku) na hadici „hrát“ tak, jako australští domorodci troubí na svůj nástroj *didjerydoo* (vyslovuje se to „dýdžerydů“). „Hrát“ je asi silné slovo, ale rozhodně lze z hadice vyloudit drsný zvuk, který prý zvuk didjerydoo velmi připomíná. (Do hadice přitom nijak nehoukáme, rty vsunuté do hadice musí volně kmitat.) Používám hadici dlouhou dva metry, zvuk je opravdu hluboký. Dodávám pak, že na konci všech pokusů si touto hadicí změříme rychlost zvuku.

Po píšťalách obvykle demonstruji ještě malé „píšťalky“ pracující na principu Savartovy sirény. Princip Savartovy sirény lze prezentovat i pomocí rotující krabičky od sýra (viz [1]).

Pokusy s ladičkami

Od zdrojů typu píšťaly můžeme přejít ke školní pomůcce – ladičkám. Kromě klasických pokusů typu rázy zvuku dvou mírně rozladěných ladiček lze zmínit či předvést i věci méně obvyklé. Zajímavá je třeba následující otázka. Rozezvučíme ladičku bez ozvučné skříňky, držíme ji blízko ucha a stopujeme, jak dlouho zvuk uslyšíme. Pak totéž uděláme s ladičkou s ozvučnou skříňkou. Ve kterém případě slyšíme zvuk déle? Pokus je třeba dělat v co největším tichu, takže není vhodný pro předvádění ve třídě. Můžeme však jeho výsledky diskutovat. Je dobré se žáků předem zeptat, jaký výsledek očekávají. Velká většina obvykle odpoví, že déle budeme slyšet ladičku s ozvučnou skříňkou. Pokus v dostatečně tichém prostředí prokáže, že opak je pravdou: více než dvakrát déle slyšíme ladičku *bez* skříňky. Výsledek lze přitom lehce vysvětlit. Ozvučná skříňka zvuk nezesiluje jako zesilovač (nemá žádný zdroj energie), pouze efektivněji předává energii kmitů ladičky okolnímu vzduchu. Názorně lze říci, že efektivněji „odsává“ energii z ladičky. Není tedy divu, že ladička se skříňkou se utlumí dřív.

Pokus s rezonancí, kdy jedna znějící ladička rozezní druhou, lze obměnit tak, že vystačíme s jednou ladičkou. Stačí do ladičky (do otvoru její rezonanční skříňky) zazpívat tón, jehož frekvence je rovna frekvenci ladičky – a ladička se rozezní. Obvykle asi nezvládneme zazpívat tón s frekvencí 440 Hz, stačí ale zpívat o oktávu níž. Harmonická složka s dvojnásobnou frekvencí ladičku rozezní. „Chytit“ správnou frekvenci se nám podaří lépe, když držíme ladičku v místech, kde je zasunuta do rezonanční skříňky. V prstech pak cítíme, kdy začíná vibrovat.

A ještě jeden pokus, tentokrát opravdu takový, v němž jedna ladička rozeznívá druhou. K rozeznívané ladičce předem přistavíme kyvadélko, malou kuličku na niti dlouhé 20-30 cm, tak, aby se kulička ramena ladičky právě dotýkala, ale jen velmi lehce. Kmitající rameno ladičky pak bude do kuličky narážet, takže se kyvadlo začne viditelně kývat. Po několika pokusech se nám takto podaří kyvadlo rozkývat i na dálku několika metrů. K čemu, kromě určité efektnosti, je tento pokus dobrý? Jasně, byť v malém, ukazuje, že *zvuk přenáší energii*. Na začátku viselo kyvadlo kolmo dolů a nekývalo se. Na konci se kýve, má tedy vyšší energii. Přitom jsme neudeřili do něj, ani do ladičky, které se dotýká. Udeřili jsem do druhé, vzdálené ladičky. energii na kyvadlo tedy musel přenést zvuk. (Poznamenejme, že ladičku u kyvadla při tomto pokusu můžeme rovněž rozkmitat hlasem.)

Ladičky lze samozřejmě využít i ke známému pokusu, kdy zvuk ladičky bez rezonanční skříňky slyšíme mnohem lépe, jestliže si držák ladičky přitiskneme na čelo či na spánkovou kost nebo ho sevřeme do zubů. Já při této příležitosti vyprávím, že Bedřich Smetana v době,

kdy již téměř neslyšel, mohl prý poslouchat klavír tak, že o něj opřel konec své hole španělky a její rukojeť stiskl do zubů. (A máme tu i mezipředmětové vztahy...)

Reproduktory

Dnes jsou asi častěji než píšely a ladičky zdrojem zvuku kolem nás reproduktory. Je dobré dát žákům do ruky malý elektrodynamický reproduktor s plochou baterií, aby si zkusili, že při připojení baterie ke svorkám reproduktor „lupne“ a jeho membrána se pohne, v závislosti na polaritě baterie ven nebo dovnitř. (Někdy přitom žáci sami objeví, jak z reproduktoru udělat bzučák.)

Princip elektrodynamického reproduktoru se dá názorně ukázat jednoduchým modelem z polystyrénové destičky ovinuté smaltovaným drátem, k níž přiblížíme magnet. Tento model již byl na Šoltésových dnech prezentován a popsán v příspěvku [2].

Vedení zvuku nití

Pro mnohé žáky je překvapením, jak dobře dokáže vést zvuk obyčejná nit. Pokud si nikdy nehráli s nitkovým telefonem, je dobře dát jim k tomu příležitost. Pro ty, kdo s ním již mají zkušenost, může být (třeba na škole v přírodě, na výletě či při jiné příležitosti) výzvou úkol udělat hvězdicové spojení, vést nitkový telefon za roh apod.

Velkým překvapením je pro řadu žáků i prastarý pokus se lžící přivázanou na nit. Volné konce nitě si dáme na ukazováky a zastrčíme do uší. Když pak visící lžící udeříme třeba do stolu, uslyšíme krásný zvuk podobný zvuku zvonu. (Slyšíme totiž i hluboké tóny, které lžice do vzduchu příliš nevyzařuje. Naopak vysoké tóny se nití utlumí. Lžice musí být kovová, dostatečně masivní, hliníkové moc nezní.) O tomto pokusu platí: kdo si to nezkusil, neuvěří.

Zviditelnění zvuku

Zvuk, resp. kmitání, které ho budí, můžeme zviditelnit známým pokusem, kdy tenký hrot na dlouhé ladičce zanechává při pohybu stopu na začazené destičce.

Modernější je snímat zvuk mikrofonom a časový průběh sledovat na osciloskopu. V dnešní době roli osciloskopu s výhodou zastane počítač se zvukovou kartou, doplněný vhodným softwarem. Využit lze například program *Winscope*, který lze stáhnout ze sekce Dílna serveru Fyzweb [3]. Tento program běží i na dosti starých počítačích, je velmi malý (navzdory bohatým možnostem, které nabízí), ale již řadu let není dále vyvíjen a na počítačích s některými novými zvukovými kartami nepracuje. Druhou možností, vhodnou pro novější počítače s operačním systémem Windows XP, je program „SoundCard Scope“ vyvinutý (a dále vyvíjený) C. Zeitnitzem. Účastníci Šoltésových dnů 2005 jej najdou na CD [4], ostatní zájemci si jej mohou stáhnout z adresy [5]. Oba zde zmíněné programy jsou pro použití v oblasti vzdělávání zdarma.

Výhodou počítače využitého jako osciloskop je skutečnost, že vedle časového průběhu kmitů umí programy (oba výše uvedené) zobrazit i frekvenční *spektrum* signálu. Zobrazíme-li tedy třeba signál zvuku ladičky (sejmutý mikrofonom), můžeme ukázat, že časovým průběhem je sinusovka a ve spektru jí odpovídá jediná frekvence. Podobně je tomu u zvuku láhve, na jejíž hrdlo foukáme. Naopak zazpíváme-li do mikrofону hlásku „á“, ukáže počítač, že časový průběh je sice periodický, ale rozhodně ne sinusový. Ve spektru pak vidíme kromě základní frekvence ještě její dvojnásobek, trojnásobek a další vyšší harmonické. Naproti tomu hláska „ů“ se mnohem víc blíží sinusovému průběhu. (Ve spektru je málo vyšších harmonických.)

Při těchto pokusech můžeme ukazovat, jak souvisí barva zvuku s obsahem vyšších harmonických, že sykavky („sss“ nebo „ššš“) svým spektrem zasahují do vysokých frekvencí

(a přitom nemají žádný základní tón a vyšší harmonické), můžeme porovnávat spektra různých hudebních nástrojů či spektrum zvuku struny, kterou jednou rozezvučíme palcem v polovině její délky a pak trsátkem blízko kobylky apod. Nápadům se zde meze nekladou. Ještě jeden tip, jak žákům na začátku názorně ukázat, co vlastně ukazuje zobrazení spektra signálu. Stačí hvízdát na píšťalku (nebo jen ústy) a měnit přitom výšku tónu. „Pík“ ukazující frekvenci přitom krásně „cestuje“ zleva doprava a naopak.

Výše uvedené „osciloskopické“ programy nám na počítači umožňují ještě jednu důležitou věc: měřit frekvenci signálu. (Zvláště v oblasti nízkých frekvencí nemusí být toto měření příliš přesné, ale pro řadu pokusů postačí.) Právě měření frekvence nám umožní určit rychlost zvuku pomocí výše zmíněného kusu hadice. Předtím je však ještě vhodné názorně se seznámit se stojatými vlnami v situaci, kdy jsou dobře vidět.

Postupné a stojaté vlny na gumičce

Pokusy s vlněním na gumičce byly už rovněž popsány v příspěvku [2], proto se o nich zmíním také jen stručněji.

Pět metrů kloboukové gumičky (resp. raději tlustší gumičky, do bund apod.) jedním koncem upevněné (třeba na kličku okna) a za druhý konec držené v ruce představuje vhodný nástroj, jak ukázat vlastnosti postupných i stojatých vln a provést i některá kvantitativní měření. Můžeme například:

- Ukázat šíření pulzu (jedné vlny) a jeho odraz na pevném konci.
- Měřit rychlost šíření tohoto pulzu. (Necháme jej odrážet desetkrát tam a zpět, takže projde celkovou dráhu 100 m. Doba šíření je několik s, což mohou žáci změřit stopkami.)
- Ukázat, že se zvyšujícím se napětím gumičky rychlost šíření vlny roste.
- Rozkmitat konec gumičky rukou a ukázat stojaté vlny. (Rozebrat přitom s žáky, že při nejpomalejším kmitání, kdy jediné uzly jsou na koncích gumičky, je vlnová délka rovna dvojnásobku délky gumičky.)
- Změříme-li periodu stojatých vln, můžeme ukázat, že ze vztahu $v = \lambda f$ vyjde pro stojaté vlny stejná rychlost vln jako pro vlny postupné. (Napětí gumičky musí být v obou případech stejné.)
- Ukázat, že zvyšujeme-li frekvenci kmitání, vejde se na délku gumičky více půlvln. Kvalitativně tak ověřujeme vztah $\lambda = v/f$. (Při zvyšování frekvence vlnová délka klesá.)
- Rozkmitat konec gumičky pomocí elektrické vrtačky. (Z kusu tlustšího drátu uděláme kličku, kterou upneme do sklíčidla vrtačky.) Na gumičce pak je výrazně více půlvln. Velmi dobře se tak demonstrují kmitny a uzly.
- V uvedených pokusech se stojatými vlnami můžeme měnit napětí gumičky. Při vyšším napětí roste vlnová délka. (Protože roste rychlost v . Opět tak kvalitativně ověřujeme vztah $\lambda = v/f$.)
- Ze změřené rychlosti šíření vln v (z šíření postupných vln, jak bylo popsáno výše) a ze změřené vlnové délky λ (pravítkem na gumičce) můžeme určit frekvenci f – třeba počet otáček vrtačky nebo frekvenci kmitů holicího strojku. (Tím se lépe rozkmitává tenčí klobouková guma.)
- Přivážeme-li konec gumičky na tenkou nit (a tu držíme zhruba o metr dále), můžeme demonstrovat chování stojatých kmitů na volném konci.

Na rozdíl od zvuku jde na gumičce sice o vlnění příčné, ovšem řada vlastností vlnění je stejných. Proto můžeme názorné demonstrace kmitů gumičky využít třeba k pochopení chování kmitů vzduchu v píšťale.

Měření rychlosti zvuku zahradní hadicí

Se žáky nyní můžeme probrat, jak vypadá stojatá vlna v píšťale, která je na jednom konci uzavřená. Na uzavřeném konci vzduch nemůže kmitat (je tam uzel výchylky), na otevřeném kmitá nejvíce (je tam tedy kmitná výchylka). Z analogie s kmitající gumičkou vidíme, že jsme se vlastně dostali z uzlu jen do čtvrtiny vlnové délky. (Je vhodné k tomu žákům nakreslit názorný obrázek. Samozřejmě, že každý učitel má asi svou metodu, jak žákům přiblížit fakt, že vlnová délka základní frekvence tónu na jednom konci uzavřené píšťaly je čtyřnásobkem její délky. Výše uvedený postup je jen námětem, jak tento poznatek s žáky vyvodit co nejnázorněji.)

Uvedená analogie může žákům pomoci pochopit, proč delší píšťaly mají hlubší tón. Získaný poznatek lze ale samozřejmě využít i dále.

Zvuk (základní frekvence) tónu, který vyloudíme na dvoumetrové hadici, má vlnovou délku 8 metrů. Stačí už jen pomocí počítače změřit frekvenci. Ta je asi 42 Hz. Rychlost zvuku daná vztahem $v = \lambda \cdot f$ pak vychází 336 m/s. Změřili jsme rychlost zvuku kusem zahradní hadice!

Na uvedený pokus lze navázat konstatováním, že nemáme-li hadici, stačí foukat na uzávěr od fixu. Pro tlustý fix s délkou uzávěru asi 3 cm je frekvence tohoto hvizdu okolo 3 kHz. Po vynásobení čtyřnásobkem délky fixu získáme opět hodnotu rychlosti zvuku. Tento pokus už vychází méně přesně, ale tolerujeme-li chybu zhruba 10%, lze jej též využít.

Závěrem

Výše uvedené pokusy určitě nejsou jediné hezké jednoduché pokusy z oblasti vlnění a akustiky. Do bloku, který obvykle předvádím (asi 60 minut, v akcích pro učitele je s komentáři dvakrát delší) se jich však už víc nevejde. Řada jich je samozřejmě starých a známých, některé jen použité v trochu jiném hávu či v trochu jiné souvislosti. Pokud vám budou alespoň některé z nich ve výuce v něčem inspirací, splnil tento příspěvek svůj účel. A pokud víte o jiných jednoduchých pokusech, které „trumfnou“ ty, které jsem zde uvedl, dejte mi vědět. (Kontakt: Leos.Dvorak@mff.cuni.cz.)

Literatura

[1] Dvořák L.: *Fyzika s Veselou krávou*. In: Sborník z konference *Veletrh nápadů učitelů fyziky 10*. Praha, 24.-27. 8. 2005, v tisku.

[2] Dvořák L. *Pokusy a projekty nejen pro letní tábory*. Sborník konference Šoltésove dni 2003. Ed.: Hajdúková T., Metodicko-pedagogické centrum města Bratislavy, 2003, s. 45-52.

[3] <http://fyzweb.cuni.cz>

[4] *Veletrh nápadů pro fyzikální vzdělávání*. Rozšířený elektronický sborník vybraných příspěvků z prvních devíti ročníků konference Veletrh nápadů učitelů fyziky, doplněný o další příspěvky. Editoři Dvořák L., Brokolová Z. Sborník na CD vydal Prometheus, Praha 2005.

[5] http://www.zeitnitz.de/Christian/Scope/Scope_en.html