

Po stopách Alberta Michelsona, Marina Mersenna a dalších

J. Dvořák, Gymnázium Botičská, Praha 1, dvorak1430@seznam.cz

K. Rydlo, Gymnázium Dobruška, Krystof.Rydlo176@gmail.com

V. Mikeska, Gymnázium Františka Palackého, Valašské Meziříčí,
vasek.mikeska@seznam.cz

Abstrakt

Jednou z nejznámějších a nejpoužívanějších rychlostí je rychlost zvuku, již jsme měřili pomocí Quinckovy trubice a Helmholtzova rezonátoru. Druhou důležitou rychlostí je rychlost světla, kterou jsme proměřili za užití metody Foucaultova rotujícího zrcadla.

1. Úvod

Rychlost zvuku je rychlost šíření mechanického vlnění o slyšitelné frekvenci látkou. Jelikož závisí na kvalitě vazby mezi atomy, je odlišná pro různá prostředí. My se zajímáme o rychlost zvuku ve vzduchu. Quinckova trubice funguje na principu interakce zvukových vln. Rozdělíme-li zvukovou vlnu do dvou různě dlouhých trubice, které se opět spojují, dorazí zvuková vlna z delší trubice později. Tyto zvukové vlny mohou spolu různě interagovat v závislosti na fázích, ve kterých se potkaly. Krajnými situacemi jsou minima resp. maxima, která vznikají při střetu vln opačné fáze resp. stejných fází.

Druhým možným způsobem, jak změřit rychlost zvuku, je za užití Helmholtzova rezonátoru, kde se využívá rezonance mechanického vlnění plynů v uzavřené dutině. Jedná se zde o tlumený jev, kdy naplníme dutinu vzduchem a posléze dochází k periodickému unikání a následnému nasávání vzduchu z trubice a zpět do ní. To vše díky změnám tlaku v dutině.

Roku 1675 dánský astronom Olaf Römer díky znalostem parametrů dráhy a rozměrů Země, Jupitera a jeho měsíce Io dokázal, že je rychlost světla konečná. My jsme se pomocí Foucaultova rotujícího zrcadla pokusili jeho rychlost přesně změřit. Vyslali jsme svazek paprsků z laseru a pomocí čoček, mezi nimiž byl mikroskop pro následné měření, jej zaostřily na rotující zrcátko. Od tohoto zrcátka se paprsek odrazil na pevně položené zrcadlo 4 metry vzdálené, jež paprsek odrazilo zpět. Než se však paprsek stihl vrátit, rotující zrcátko se pootočilo a my na mikroskopu viděli čáru místo tečky, z jejíž délky, frekvence rotace zrcátka a vzdálenosti pevného zrcadla jsme vypočítali rychlost světla.

2. Postup měření

I. Zvuk

Rychlost zvuku ve vzduchu je závislá na teplotě vztahem $v=(331,57+0,607.t) \text{ m.s}^{-1}$. Pro teplotu 25°C během našeho měření by měla být přibližně 347 m.s⁻¹.

Quinckova trubice

V tomto měření jsme měřili vlnovou délku zvuku o různých frekvencích. Quinckova trubice (obrázek 1) má dvě větve, které spolu interferují při výpusti. Posouváním jednoho ramene kontrolujeme dráhový rozdíl. Náš oscilátor měl nastavitelnou frekvenci. Tudíž jsme mohli na výstupním osciloskopu pozorovat různé interferenční extrémy. Z rýsky na trubici jsme odčítali vzdálenost minim. Tato vzdálenost odpovídá polovině vlnové délky zvukového vlnění.

$$\Delta d = d_{n+1} - d_n = \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$



Obrázek 1 Quinckova trubice

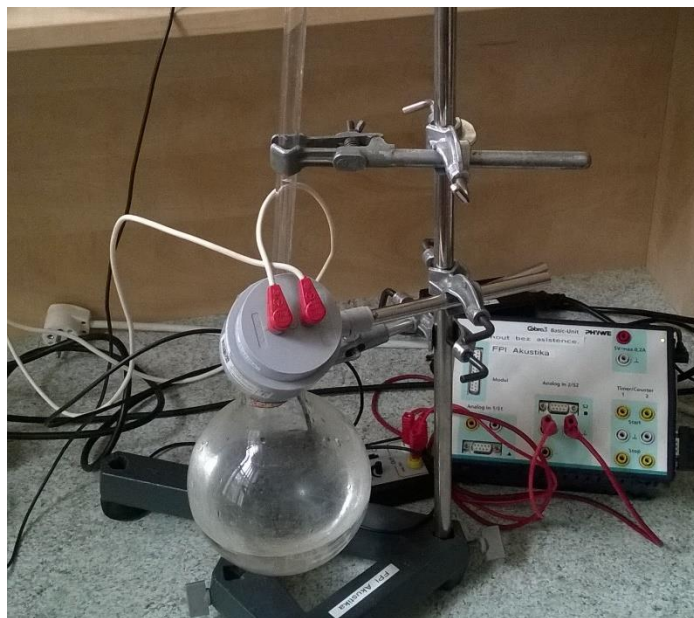
A poté na základě známého vztahu pro rychlost vlnění, frekvenci a vlnovou délku

$$v = f \cdot \lambda \quad (2)$$

jsme mohli pomocí fitování naměřených dat získat rychlost šíření vlnění.

Helmholtzův rezonátor

Do prázdné litrové baňky jsme vložili generátor signálu, mikrofon a skleněnou trubici na dolévání vody. Změnou kmitočtu generátoru signálu jsme hledali rezonanční frekvenci nejdříve pro prázdnou baňku a poté i pro baňku s objemem zmenšeným o nalitou vodu.



Obrázek 2 Helmholtzův rezonátor

Pro určení rychlosti zvuku jsme použili tyto dva vztahy:

$$f = a \cdot \frac{1}{\sqrt{V}} \quad (3)$$

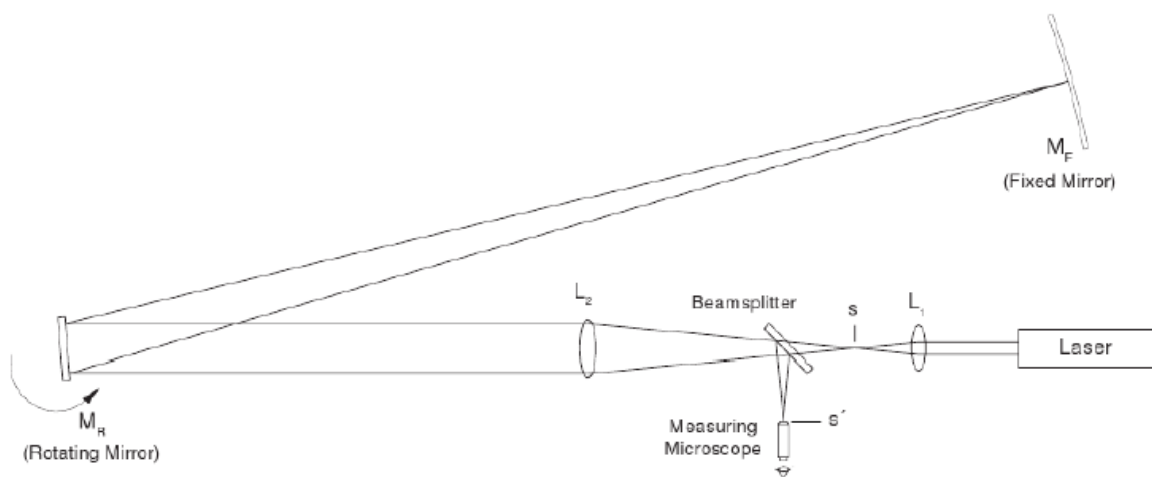
$$a = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi r^2}{(l+1,4 \cdot r)}} \quad (4)$$

kde v je rychlost zvuku, l délka hrdla baňky, r poloměr hrdla baňky a V objem baňky. Fitováním jsme získali výslednou rychlost.

II. Světlo

Ze začátku musíme hlavně upozornit, že laserové paprsky jsou pro kohokoliv nebezpečné a při nechtěném zasvícení do oka by ho mohly spálit. Proto jsme museli používat speciální brýle tlumící intenzitu světla.

Připravili jsme aparaturu tak abychom mohli využít Foucaultovy metody (obrázky 3, 4). Na 1m dlouhou optickou lavici jsme umístili modul s rotačním zrcátkem a ke druhému konci jsme přiložili laser. Užitím dvou zaměřovačů svazků jsme nastavili laser tak aby skrze ně procházel až na rotační zrcátko. Příprava může klidně trvat i pár hodin. Pokud by nebyla správně seřízena, mohla by být následná měření nepoužitelná. Jakmile jsme zaměřili laser, oddělali jsme destičky pro zaměřování a umístili čočky. Čočku s ohniskovou vzdáleností 48 mm ve vzdálenosti 76 cm od rotačního zrcátka a čočku s ohniskovou vzdáleností 252mm 43 cm. Obě čočky jsme pak nastavili tak, aby paprsek stále směřoval na zrcátko a mezi ně jsme umístili měřicí mikroskop, do kterého se nesmí dívat, dokud se před laser nepoloží polarizátor. Poté jsme umístili zrcadlo ve vzdálenosti 4 m od rotačního zrcátka tak, aby laser, rotační zrcátko a zrcadlo spolu svírali úhel zhruba 12°.



Obrázek 3



Obrázek 4

Motor od rotačního zrcátka jsme nechali zahřát v obou směrech, po směru hodinových ručiček *cw* a proti směru hodinových ručiček *ccw*. Když jsme se podívali do měřícího mikroskopu, viděli jsme místo tečky čárku. Je to způsobeno tím, že poté, co je paprsek vyslán, je pootočen rotačním zrcátkem, než se však stihne vrátit od zrcadla, rotační zrcátko se již trochu pootočilo a paprsek se vrátil pod jiným úhlem. Na této čarce

jsme si mikrometrickým šroubkem zaměřili jednu ostrou hranu a odečetli hodnotu. Tento postup jsme provedli i pro opačný směr i pro jiné frekvence rotačního zrcátka. Pomocí velikosti této čárky, rychlosti rotace zrcátka a vzdálenosti zrcadla jsme vypočítali rychlost světla.

3. Výsledky měření

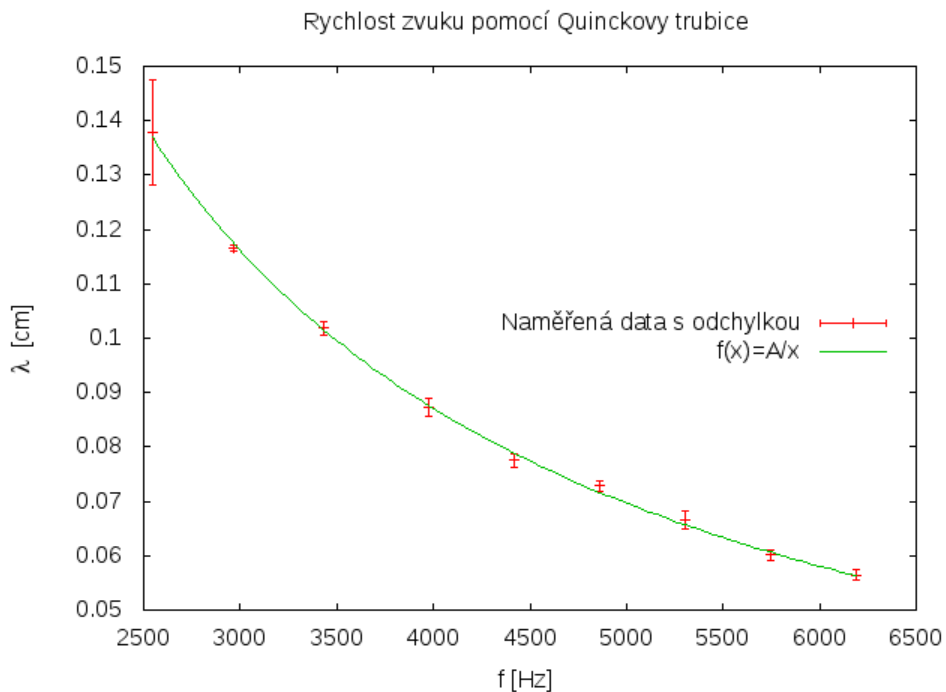
I. Zvuk

Quinckova trubice

Prováděli jsme měření právě pro deset hodnot frekvencí. Postupem měření jsme museli přidávat amplitudu generovaného zvuku oscilátorem, abychom mohli číst výsledky. Při dané frekvenci jsme hledali všechna interferenční minima, pomocí posouvání jednoho ramene trubice.

Minima jsme objevili vždy, když jsme fundovaně odhadli okamžik správného nastavení, kdy došlo k zastavení klesání amplitudy výsledného vlnění a obnovení růstu amplitudy výsledného vlnění.

Námi vypočítaná rychlost zvuku byla $348,4 \pm 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro srovnání měla být naměřena rychlost $347 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



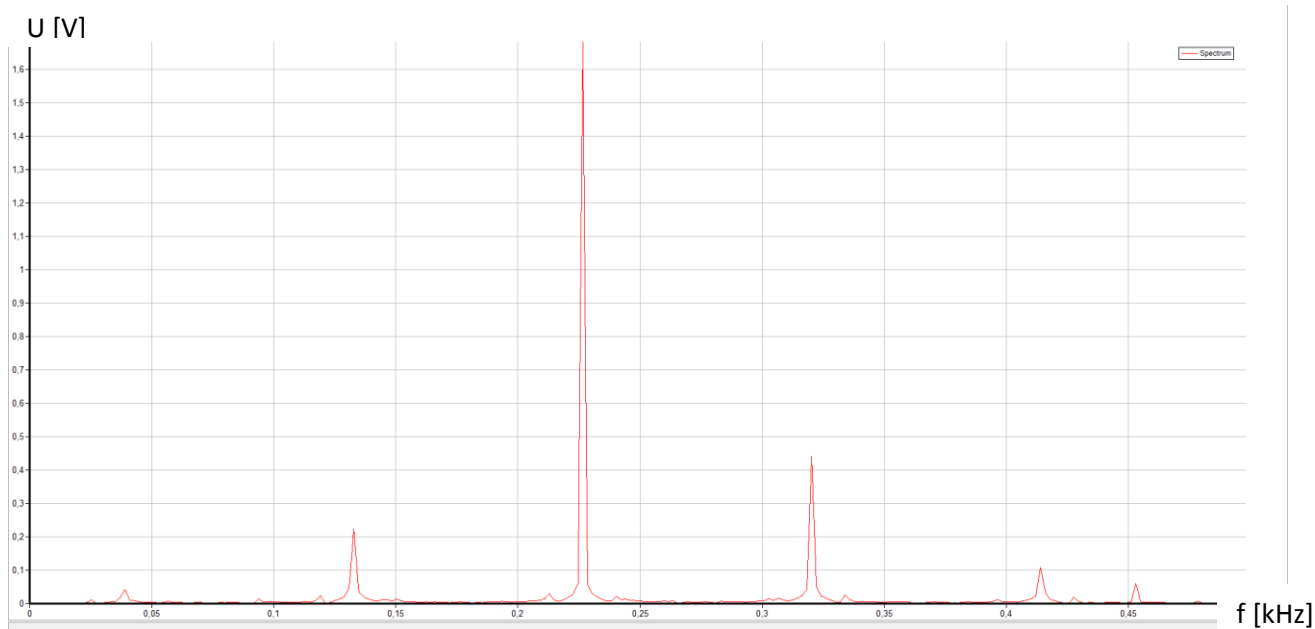
Obrázek 5

Helmholtzův rezonátor

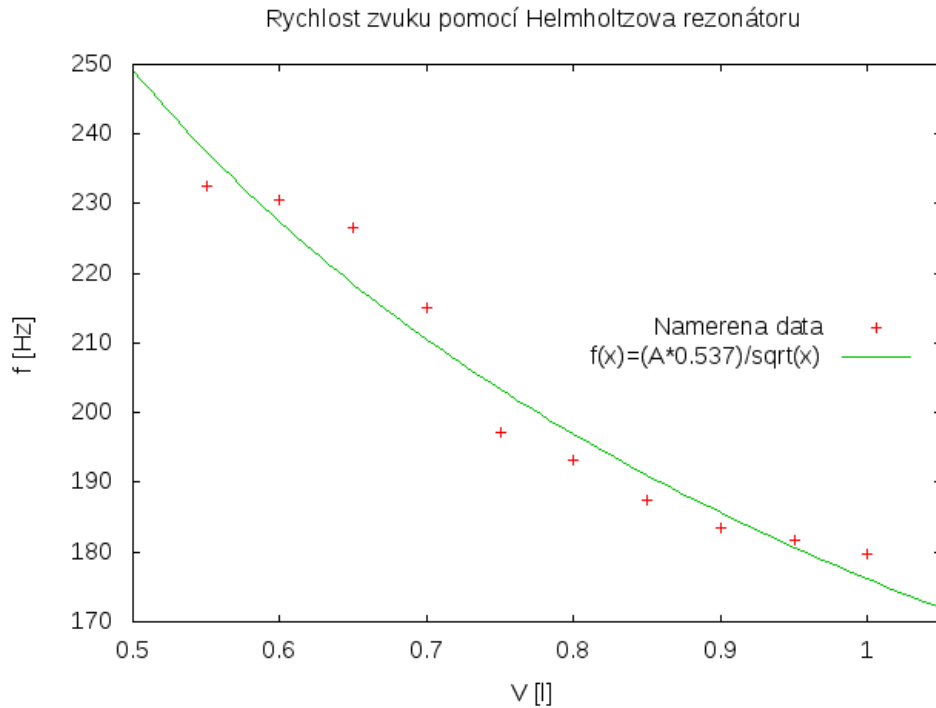
Se změnou frekvence zvuku se hlavní vrchol v grafu periodicky zvyšoval nebo snižoval. Rezonanční frekvenci pro daný objem jsme našli právě tehdy, byl-li pík nejvyšší. Ze známých frekvencí a příslušných objemů baňky jsme určili rychlost šíření zvuku na $328,0 \pm 2,5 \text{ m.s}^{-1}$. Náš výsledek je poměrně o dost nižší, než by měl být, protože určování rezonanční frekvence bylo značně náročné a je to patrné i z obrázku 7, kde nám přesně neseďí fitovací data. Vedlejší vrcholy vznikly z šumu z okolí.

Rez. frekvence [Hz]	179,7	181,8	183,5	187,5	193,3	197,2	215	226,5	230,6	232,5
Objem V [ml]	1000	950	900	850	800	750	700	650	600	550

Tabulka 1



Obrázek 6 Rezonanční frekvence



Obrázek 7

II. Světlo

Naše výsledky se shodovaly s naším očekáváním. S rostoucí frekvencí rychlosti otáčení rotujícího zrcátka se velikost čáry z laseru zvětšovala na určitou stranu v závislosti na směru otáčení.

Frekvence rotujícího zrcátka [Hz]	cw [mm]	ccw [mm]
189	11.49	11.46
406	11.52	11.42
557	11.55	11.41
700	11.56	11.38
852	11.59	11.37
100	11.61	11.33
1100	11.63	11.32

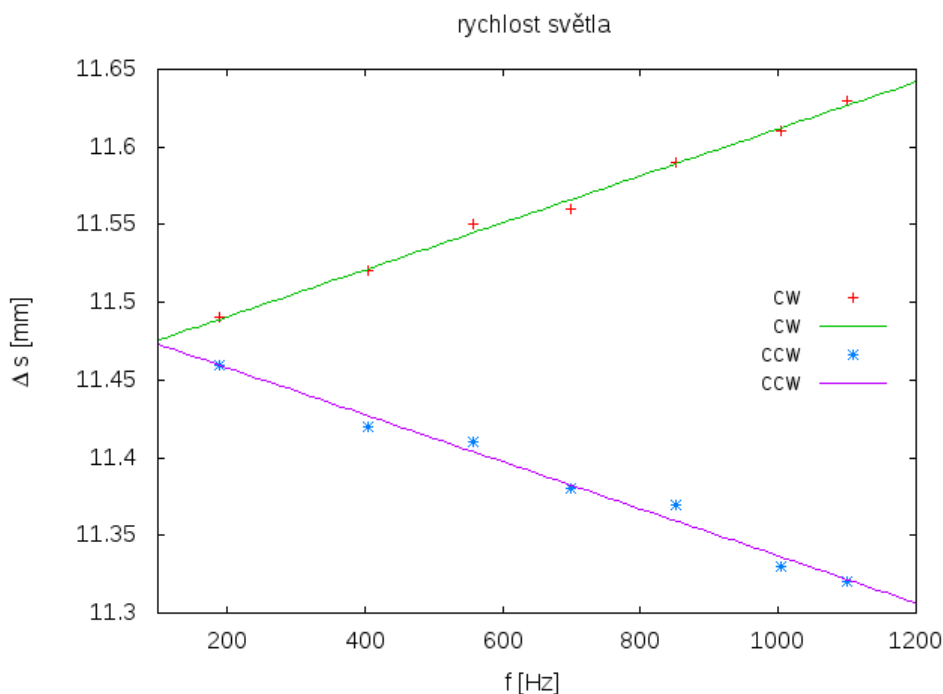
Tabulka 2

Naměřená data jsme dosadili do fitovacího vzorce, který je odvozen ze vzorce 5.

$$c = \frac{8\pi AD^2(f_{cw} + f_{ccw})}{(D+B)(s'_{cw} + s'_{ccw})} \quad (5)$$

f_{cw} f_{ccw} rychlost rotování zrcátka A Vzdálenost druhé čočky a laseru
 s'_{cw} s'_{ccw} změna velikosti čáry z laseru B Vzdálenost druhé čočky a rotujícího zrcátka
 D Vzdálenost rotujícího zrcátka a zrcadla

jsme dopočítali, že rychlost světla je $(2.21 \pm 0.45) \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ Odchylka byla spočtena ze vzorce pro chybná měření [4].



Obrázek 8

4. Shrnutí

Rychlost zvuku jsme pomocí Quinckovy trubice naměřili $348,4 \pm 1,5 \text{ m.s}^{-1}$, která se jen nepatrně liší od reálné hodnoty. Naproti tomu je rychlost zvuku změřená pomocí Helmholtzova rezonátoru značně nižší, než její skutečná hodnota, a to $328,0 \pm 2,5 \text{ m.s}^{-1}$. Rychlost světla jsme změřili metodou Foucaultova rotačního zrcadla na $(2.21 \pm 0.45) \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$, přičemž její skutečná rychlost je přibližně $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$. Tato nepřesnost je dána nedokonalým sestavením aparatury.

Poděkování

Za finanční podporu našich projektů a realizaci Týdne vědy na Jaderce děkujeme jednak Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské Českého vysokého učení technického v Praze a zejména pak Ing. Vojtěchovi Svobodovi, CSc. Dále vřele děkujeme Bc. Romanu Lavičkovi za jeho konzultaci během experimentu a za pomoc při zpracování výsledků.

Reference

- [1] Kolektiv fyzikálního praktika FJFI ČVUT, Základní experimenty akustiky, URL: http://praktikum.fjfi.cvut.cz/pluginfile.php/126/mod_resource/content/5/09-140920-akustika.pdf, citace: 16.6.2015
- [2] Kolektiv fyzikálního praktika FJFI ČVUT, Měření rychlosti světla, URL: http://praktikum.fjfi.cvut.cz/pluginfile.php/2745/mod_resource/content/3/speed_of_light_JF_v2.pdf, citace: 16.6.2015
- [3] Kolektiv fyzikálního praktika FJFI ČVUT, Návod na Gnuplot, URL: http://praktikum.fjfi.cvut.cz/documents/navod_gnuplot.pdf, citace: 16.6.2015
- [4] Kolektiv fyzikálního praktika FJFI ČVUT, Chyby měření, URL: <http://praktikum.fjfi.cvut.cz/documents/chybynav/chyby-o.pdf>, citace: 16.6.2015