



Ako veľryby telefonujú – fyzikálna akustika netradične I.

Juraj Slabeycius¹, Pedagogická fakulta Katolíckej univerzity v Ružomberku

Článok přetiskujeme ze sborníku Národního festivalu fyziky 2011 **Tvorivý učitel fyziky IV**, <http://sfs.sav.sk/smolenice/index.htm>, který se konal ve Smolenicích 12. – 15. 4. 2011. Ve sborníku se originál článku nachází na stranách 205–215². V tomto čísle časopisu Školská fyzika naleznete první část článku, dokončení bude následovat v čísle dalším.

Pre zvýšenie záujmu o fyziku a prírodné vedy je možné využiť atraktívne témy ako doplnkový materiál vyučovania, alebo pre prácu v záujmových krúžkoch. Predkladaný príspevok uvádza jednu z takýchto tém. Je známe, že niektoré druhy veľrýb sa v oceáne dorozumievajú na veľké vzdialenosti. Mechanizmus, vďaka ktorému je to možné, sa dá názorne vysvetliť už na úrovni základnej školy. Výpočty jednoduchých prípadov sú dostupné aj stredoškólakom.

Úvod

Fyzikálna akustika je jednou z menej známych fyzikálnych disciplín, napriek tomu poskytuje mnoho zaujímavých a príťažlivých tém, ktoré majú potenciú zaujať poslucháčov. S fyzikálnou akustikou súvisia odpovede na také otázky, prečo sa niektoré druhy veľrýb v oceáne dokážu dorozumieť na veľké vzdialenosti, ako môže dutá kovová guľka zachrániť život pilotovi zostrelnému nad oceánom, prečo v lete dva kilometre za dedinou nepočuť vyzváňanie zvonov, ale na jeseň, keď je hmla, ich počuť aj desať kilometrov ďaleko, čo je to Roswellské UFO, ako ďaleko možno počuť zvuk vo vode, prečo kvôli akustickým javom generáli v americkej občianskej vojne niekedy prehrali vyhranú bitku a mnoho ďalších zaujímavostí.

Výklad uvedených javov možno podať na kvalitatívnej úrovni už pre žiakov vyššieho stupňa základných škôl, jednoduchšie prípady možno analyzovať aj kvantitatívne, pomocou jednoduchých výpočtov dostupných priemernému stredoškólakovi. Materiál uvedený v príspevku je možné využiť ako popularizačnú prednášku pre deti, doplnkový materiál vyučovania, alebo pre prácu v záujmových krúžkoch.

1 Šírenie zvuku v prostredí

Zvuk sa v homogénnom prostredí bez prekážok šíri od zdroja priamočiaro. Rýchlosť zvuku závisí od parametrov prostredia. Pre plyny platí vzťah

$$c = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}},$$

kde κ je Poissonova konštanta, R univerzálna plynová konštanta, M molekulová hmotnosť prostredia a T je termodynamická teplota [1]. Tento vzťah môžeme použiť, ak deje v plyne pri prechode zvukovej vlny možno považovať za adiabatické – čo platí pre frekvencie vyššie ako 1 Hz. Pre suchý vzduch z toho vyplýva, že v intervale bežných teplôt t rýchlosť zvuku rastie s teplotou zhruba o $0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ na 1 K. Číselné údaje sú zhrnuté v tab. 1.

$\frac{t}{^\circ\text{C}}$	-10	0	10	20	30
$\frac{c}{\frac{\text{m}}{\text{s}}}$	325,3	331,4	337,5	343,4	349,2

Tab. 1 – Závislosť rýchlosti zvuku od teploty

Pre vlhký vzduch je rýchlosť o niečo vyššia vzhľadom k tomu, že klesá priemerná molekulová hmotnosť, mení sa aj Poissonova konštanta. Pri 0°C je korekcia len $0,003 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ na 1 % relatívnej vlhkosti, ale pri 30°C až $0,024 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ na 1 % relatívnej vlhkosti [2].

¹ juraj.slabeycius@ku.sk

² http://sfs.sav.sk/smolenice/pdf_11/30_Slabeycius.pdf



Keď šírenie zvuku z bodového izotropného zdroja nie je ničím obmedzené, klesá intenzita zvuku s druhou mocninou vzdialenosti. Zodpovedá to šíreniu sférickej vlny v priestore. Túto závislosť môžeme ľahko zdôvodniť jednoduchou úvahou rovnomerného rozdelenia energie zvukovej vlny na plochu, žiaci by už mali ovládať vzťah pre plochu povrchu gule v závislosti od jej polomeru. Môžeme využiť aj analógiu so svetlom žiarovky – plôška (orientovaná kolmo na lúče) vo vzdialenosti 5 m od žiarovky je osvetlená 4krát lepšie, ako plôška vzdialená 10 m od nej. Ak sa zvuková vlna môže šíriť len vo dvoch rozmeroch (2D prípad – zodpovedá šíreniu cylindrickej vlny), je intenzita zvuku nepriamo úmerná vzdialenosti od zdroja, pretože veľkosť valcovej plochy je úmerná polomeru valca. A nakoniec, vlna, ktorá sa šíri len v jednom smere (rovinná vlna), má intenzitu konštantnú. Takýto prípad nastáva, keď šírenie zvuku je priestorovo ohraničené napr. dutou rúrou (vlnovod). Samozrejme, berieme do úvahy len geometrické vlastnosti priestoru, útlm vlny v prostredí zanedbávame (ideálne bezstratové prostredie).

2 Huyghensov princíp

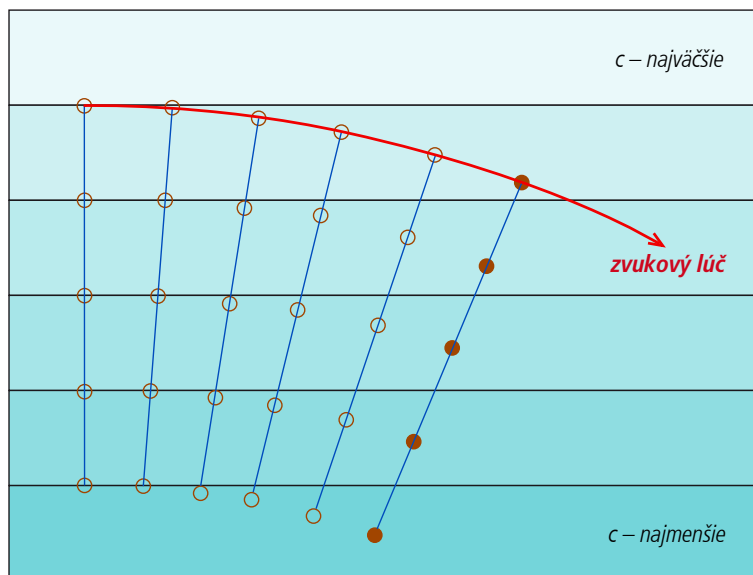
Šírenie vlnenia v prostredí opisuje Huyghensov princíp. Tento princíp umožňuje skonštruovať vlnoplochu v čase $t + \Delta t$, keď poznáme tvar vlnoplochy v čase t , neumožňuje však výpočet amplitúdy vlny v danom mieste – na to musíme použiť Fresnelove doplnenie k Huyghensovmu princípu.

Podľa Huyghensovho princípu sa vlnenie šíri tak, že všetky body priestoru, do ktorého sa vlnenie v určitom okamihu t dostane, sa stávajú bodovými zdrojmi vlnenia a elementárnych guľových vlnoplôch s polomerom $c \cdot \Delta t$, kde c je rýchlosť vlnenia v danom bode. Vlnoplocha v čase $t + \Delta t$ je obálkou takýchto elementárnych vlnoplôch. Na úrovni základnej školy nemôžeme pochopiteľne operovať s pojmami ako „obálka elementárnych vlnoplôch“, ale pre naše účely k výkladu akustických javov, spomínaných v úvode, nám postačí zjednodušená verzia Huyghensovho princípu, ktorá dostatočne názorne vysvetľuje jav ohybu zvukovej vlny v nehomogénnom prostredí.

Nehomogénnym nazývame prostredie, ktorého niektorý parameter závisí od polohy. V akustike je týmto kľúčovým parametrom rýchlosť zvuku. Ako už bolo povedané, rýchlosť zvuku vo vzduchu závisí od jeho teploty, a teda ak teplota vzduchu nie je všade rovnaká, nebude rovnaká ani rýchlosť zvuku. Najbežnejším prípadom je tzv. stratifikované (rozvrstvené) prostredie, v ktorom rýchlosť zvuku závisí len od jednej súradnice, napr. výšky. Takéto prostredie si môžeme modelovo predstaviť ako sústavu tenkých vodorovných vrstiev vzduchu, v každej z nich je rýchlosť zvuku konštantná. Nech rýchlosť zvuku spojitie rastie s výškou, t. j. gradient rýchlosti je kladný (os y smeruje nahor).

Modelovanie postupu zvukovej vlny predvedieme pomocou tyče dĺžky 2–2,5 m a piatich žiakov, ktorí sa budú držať tyče v pravidelných rozstupoch. Na podlahu nakreslíme sústavu rovnobežných pruhov, zodpovedajúcich vrstvám vzduchu s konštantnou rýchlosťou (obr. 1). Počiatočná poloha tyče so žiakmi je kolmá na pruhy. Pruhy sú označené číslami, ktoré reprezentujú rýchlosť zvuku v danom pruhu (napr. 300, 280, 260, 240, 220, 200 – rozdiely sú úmyselne prehnané, aby zakrivenie lúča bolo výrazné. Hodnoty nemajú vzťah k skutočnej rýchlosti zvuku vo vzduchu). Na pokyn učiteľa každý žiak urobí krok dopredu, pričom dĺžka kroku v mm zodpovedá číslu v pruhu, v ktorom sa žiak nachádza. Je vhodné vybrať žiakov s vhodnou veľkosťou topánky, takže žiak, keď kladie nohu pred nohu na doraz, urobí krok dĺžky stopy. Palica zaručuje, že žiaci zostanú v rade, aj keby niektorý urobil príliš dlhý alebo príliš krátky krok. Vidíme, že po každom kroku sa smer palice trochu zmení, a tým aj smer, ktorým sa palica držaná žiakmi pohybuje. Ak sa pri pohybe dostane žiak do iného pruhu, platí preň prirodzene iná dĺžka kroku. Palica predstavuje vlnoplochu, ale to pre demonštráciu nie je podstatné. Žiaci vidia, že smer postupu zvuku sa mení.

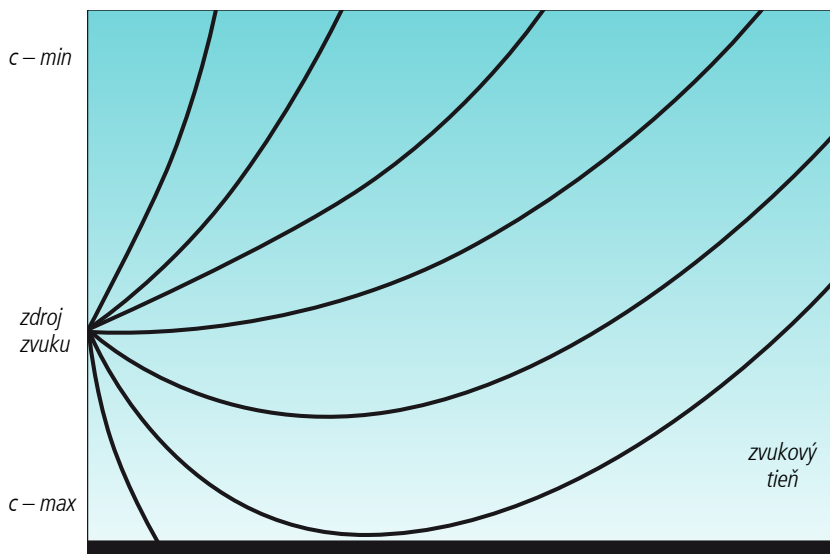
Definujme zvukový lúč ako krivku, dotyčnica ku ktorej je v každom bode kolmá ku vlnoploche (v našom prípade k palici – červená čiara na obr. 1). Využijeme analógiu so svetelným lúčom, tento pojem žiaci poznajú (aspoň intuitívne). Na základe nášho pokusu vyslovíme dôležitú poučku: Zvuková vlna v stratifikovanom prostredí sa šíri tak, že zvukový lúč sa vždy odkláňa na stranu, kde je rýchlosť zvuku menšia. Pomocou tejto poučky teraz objasníme niekoľko zaujímavých akustických javov.



Obr. 1 – Modelovanie postupu zvukovej vlny v rozvrstvenom prostredí

3 Šírenie zvuku v stratifikovanom prostredí

Teplota vzduchu cez deň, keď je slnečné počasie, je najvyššia pri zemi (v lete často okolo $30\text{ }^{\circ}\text{C}$) a s výškou klesá. V rovinnom teréne je obvyklý výškový gradient teploty $8\text{--}12\text{ }\frac{\text{K}}{\text{km}}$, závisí to od konkrétnych meteorologických podmienok. V horných vrstvách troposféry (7–10 km) je gradient teploty prakticky konštantný $9,8\text{ }\frac{\text{K}}{\text{km}}$, vo výške 10 km je viac-menej stála teplota okolo $-56\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]. Z toho vyplýva, že gradient rýchlosti zvuku je záporný (os y smeruje nahor) a má hodnotu zhruba $6\text{ }\frac{\text{m}}{\text{s}}$ na 1 km. Rýchlosť zvuku pri zemi je najvyššia, s výškou klesá a teda zvukové lúče sa odkláňajú nahor (obr. 2).

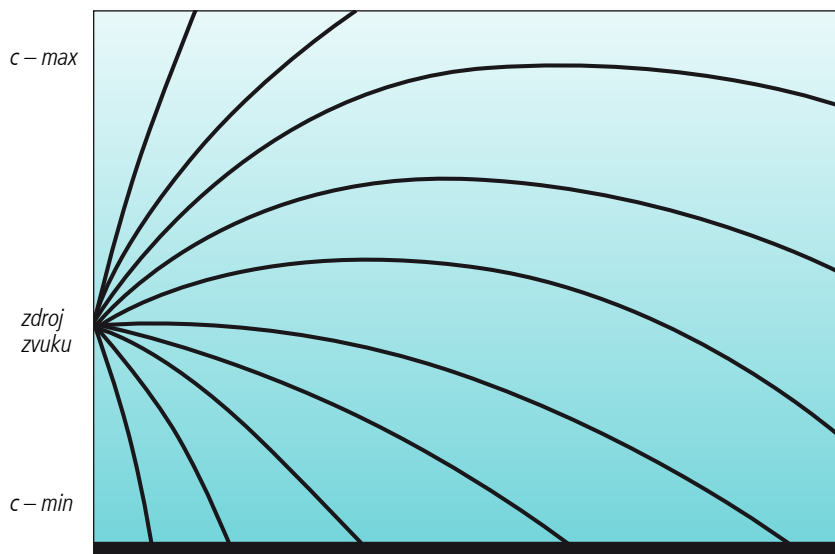


Obr. 2 – Šírenie zvuku cez deň a vznik zvukového tieňa. Podľa [4]

Tento jav je príčinou toho, prečo v lete nepočuť poludňajšie vyzváňanie zvonov už v relatívne malej vzdialenosti (3–4 km) od zvonice. Vzniká totiž oblasť tzv. zvukového tieňa, kam sa zvuk nedostane, napriek tomu, že z daného bodu je zvonica dobre viditeľná. Večer po západe Slnka sa prízemná vrstva vzduchu ochladzuje rých-



lejšie, ako vzduch vo väčších výškach, v dôsledku toho vzniká prízemná teplotná inverzia. Na jeseň a niekedy aj na jar vzniká niekedy oveľa mohutnejšia teplotná inverzia až do výšky 2000 m. Dôsledkom je kladný výškový gradient rýchlosti zvuku. Zvukové lúče sa odkláňajú nadol (obr. 3), nevzniká zvukový tieň a vyzváňanie zvonov je počuť aj za kopcom.

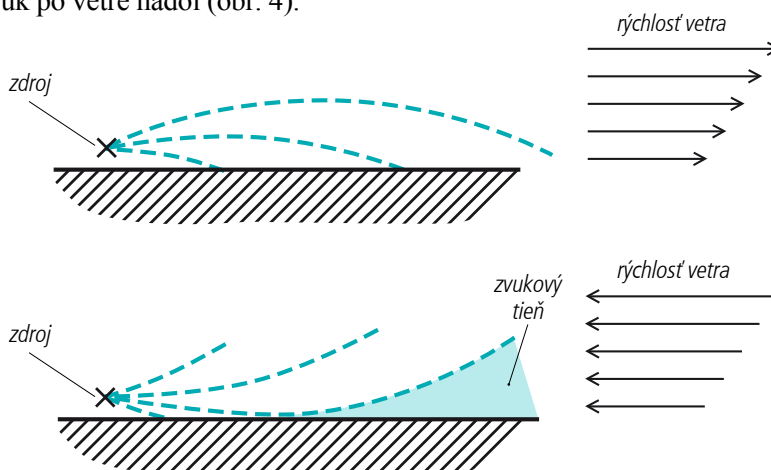


Obr. 3 – Šírenie zvuku pri teplotnej inverzii. Podľa [4]

4 Vplyv vetra na šírenie zvuku

Zvuk je vlnenie, ktoré je viazané na hmotné prostredie, to znamená, že pod rýchlosťou zvuku vždy rozumieme rýchlosť šírenia akustického rozruchu vzhľadom k prostrediu. Pokiaľ sa prostredie pohybuje ako celok vzhľadom k zemi, bude rýchlosť zvuku vzhľadom k zemi súčtom rýchlosti vetra a rýchlosti zvuku.

Rýchlosť vetra tiež nie je v celom priestore konštantná, ale obvykle je pri zemi najmenšia a s výškou rastie. Gradient rýchlosti vetra má podobný vplyv na ohyb zvukových lúčov ako gradient teploty, ale vzhľadom na skladanie vektorov rýchlosti sa zvuk pri kladnom gradiente rýchlosti vetra (t. j. rýchlosť vetra rastie s výškou) proti vetru ohýba nahor, zvuk po vetre nadol (obr. 4).



Obr. 4 – Ohyb zvukových lúčov v dôsledku gradientu rýchlosti vetra. Podľa [5]

Účinky vetra a teplotného gradientu sa môžu navzájom zosilňovať, alebo zoslabovať, podľa orientácie vetra a gradientu teploty.



5 Zvukový tieň

Keď sú zvukové lúče v dôsledku teplotného gradientu alebo gradientu vetra zakrivené nahor, vzniká v určitej vzdialenosti od zdroja oblasť zvukového tieňa. Ako už bolo spomínané, najvýraznejšie sa tento efekt prejavuje v lete cez deň, keď gradient teploty môže dosiahnuť hodnotu až $15 \frac{\text{K}}{\text{km}}$. Keď sa k tomu pridá ešte vietor vhodného smeru, dochádza k zaujímavým situáciám, niektoré z nich sú opísané v knihe [6]. Autor opisuje mnohé prípady z obdobia americkej občianskej vojny, u nás známejšej pod názvom Vojna Severu proti Juhu. Velenie vojsk Konfederácie zo svojho veliteľského stanoviska malo panoramatický výhľad na menej ako dve míle vzdialený boj 91 tisíc vojakov pri Gainesovom mlyne (Battle of Gaines's Mill), jasne videli dym a záblesky strelby artilérie a muškiet, ale nič nepočuli. V tom istom čase bolo zvuky boja počuť v 100 míľ vzdialenom Stauntone. Tento prípad je v histórii známy ako „tichá bitka“ (silent battle). Zvuky bitky pri Gettysburgu (1863, 160 tisíc bojujúcich vojakov) nebolo počuť v 10 km vzdialenosti, ale v 150 km vzdialenom Pittsburgu ich bolo jasne počuť.

Akustický tieň nebol len nevinnou zaujímavosťou. V časoch, keď neexistovalo rádio ani mobily, bola komunikácia medzi velením a vojenskými jednotkami uskutočňovaná prevažne akusticky. Vojenská trubačia ovládali celý rad signálov, ktoré na pokyn veliaceho generála trúbili vojskám. Bola síce možnosť odovzdávať príkazy po rýchlych posloch, ale v priebehu bitky bol tento spôsob príliš pomalý. Veliaci generáli preto zvyčajne zaujali pozíciu na vyvýšenine neďaleko bojiska a odtiaľ riadili celý boj. V orientácii mu samozrejme pomáhali aj zvuky bitky, prichádzajúce z bojiska. Preto narušenie zvukového spojenia mohlo mať katastrofálne následky pre výsledok bitky. Známa je bitka pri Five Forks neďaleko Petersburgu (1. 4. 1865), kde utrpela armáda Juhu rozhodujúcu porážku. Divízia Konfederácie pod velením Georga Picketta sa nachádzala len tri kilometre od miesta, kde prebiehala bitka medzi vojskom Severu pod velením generála Philipa Sheridana a silami Konfederácie. V dôsledku zvukového tieňa Pickett nič nepočul a spokojne si opekala ryby. Keď pritiahol so svojimi vojakmi na bojisko, bolo už neskoro. Sheridan zvíťazil a to donútilo generála Lee ustúpiť od Petersburgu.



Obr. 5 – Generál George Edward Pickett³

6 Zakrivenie lúča

Zakrivenie zvukového lúča v stratifikovanom prostredí vplyvom gradientu rýchlosti zvuku môžeme jednoducho určiť pomocou obr. 6. Nech vo výške z zviera zvukový lúč s vodorovnou rovinou uhol α . Za čas Δt prejde dráhu $s = c \cdot \Delta t = |\mathbf{AE}|$, pričom c je rýchlosť zvuku vo výške z . Podobne za ten istý okamžik prejde vlna vo výške z' dráhu $s' = c' \cdot \Delta t = |\mathbf{DC}|$, pričom c' je rýchlosť zvuku vo výške z' . Bodom C vedme rovnobežku s úsečkou $\mathbf{AD}$, na priesečníku s $\mathbf{AE}$ dostaneme bod B . Zrejme platí $|\mathbf{AB}| = |\mathbf{DC}|$. Označme $\Delta z = z - z'$, $\Delta c = c - c'$. Zrejme $\Delta z = d \cdot \cos \alpha$. Lokálny polomer krivosti lúča vo výške z označme $R = |\mathbf{AS}|$. Z podobnosti trojuholníkov $\mathbf{SAE}$ a $\mathbf{CBE}$ vyplýva

$$\frac{s - s'}{d} = \frac{s}{R}.$$

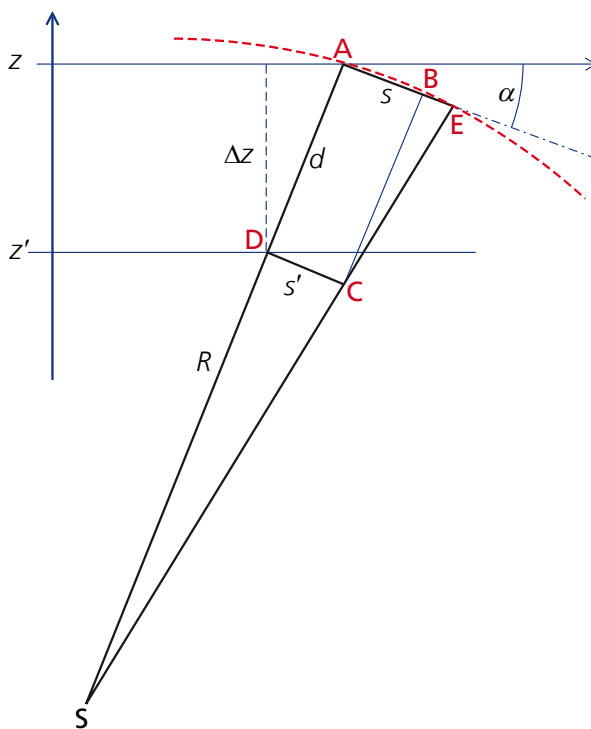
Vzhľadom k tomu, že platí

$$\frac{s - s'}{s} = \frac{c - c'}{c} = \frac{\Delta c}{c},$$

dostávame pre hľadaný lokálny polomer krivosti vzťah

$$R = \frac{c}{\cos \alpha} \left(\frac{\Delta c}{\Delta z} \right)^{-1}.$$

³ <http://forum.valka.cz/viewtopic.php/t/75941>, obrázek doplněn redakcí

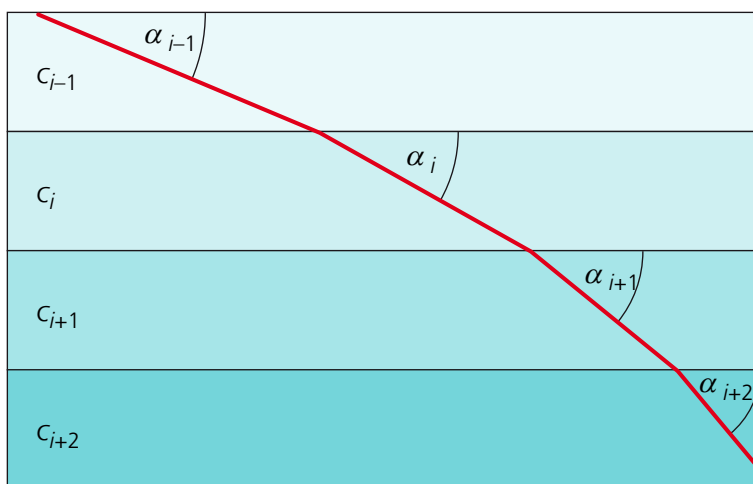


Obr. 6 – Odvození polomeru krivosti zvukového lúča

Obr. 7 ukazuje zmenu smeru zvukového lúča s výškou z . Použitím zákona lomu pre rozhranie medzi jednotlivými vrstvami prostredia dostaneme (pozor, uhol meriame od roviny rozhrania, nie od kolmice!) vzťahy

$$\frac{\cos \alpha_{i-1}}{\cos \alpha_i} = \frac{c_{i-1}}{c_i}, \quad \frac{\cos \alpha_i}{\cos \alpha_{i+1}} = \frac{c_i}{c_{i+1}}, \quad \frac{\cos \alpha_{i+1}}{\cos \alpha_{i+2}} = \frac{c_{i+1}}{c_{i+2}}, \quad \dots$$

z ktorých vyplýva, že podiel $\frac{c}{\cos \alpha}$ je pre všetky hodnoty z rovnaký. Lokálny polomer krivosti teda závisí len od gradientu rýchlosti zvuku v danej výške. V prípade, že gradient rýchlosti $\frac{dc}{dz}$ je konštantný, je polomer krivosti lúča všade rovnaký – lúče sú kruhové oblúky.



Obr. 7 – Zmena smeru zvukového lúča

Druhá časť, dokončení článku, vyjde v ďalšom čísle Školskej fyziky a bude venovaná akustike morí a oceánů, šírení zvuku v oceáne, dorozumívání veľryb a mimo jiné i Roswellskému UFO.