

→ dokaj zabrisana, premika k vse nižjim frekvencam in se po 70-em letu premakne tudi pod 8000 Hz. To pri poslušanju radia ne moti veliko, ker lahko povečamo jakost. Bolj moti pri pogovoru dveh v množici ljudi. Soglasnike p, t, k, f, s prepoznamo predvsem po njihovih sestavinah z veliko frekvenco. Zato jih v starosti slabše slišimo, posebno ko se pogovarjamo v množici, in slabše razločimo.

Pri pogovoru s sogovornikom se osredotočimo na zvok, ki prihaja iz določene smeri. To lahko določimo v smeri naprej celo na eno do dve stopinji natančno. Pri tem izkoristimo dva pojava. Prvi je zakasnitev, s katero odmik delov zraka doseže levo in desno uho. Pri tem mora biti valovna dolžina večja od razdalje med ušesoma. V ta namen so uporabne frekvence, manjše od 1500 Hz. Toda v dvoranah pogosto prevladuje hrup z majhno frekvenco, ker se zvok pri odboju tem manj oslabi, čim manjša je frekvenca. Zato opisani pojav ni posebno uporaben. Uporabnejša je zakasnitev, s katero jakost zvoka doseže levo in desno uho. Pri tem ne moti uklon le, če je valovna dolžina manjša kot razdalja med ušesoma. Uporaben je tedaj le zvok s frekvenco nad 3000 Hz. Ker ta zvok stari ljudje slabše zaznavajo, ne morejo izkoristiti tudi drugega pojava. Pomagajo si lahko tako kot naglušni ljudje, ki opazujejo ustnice govorečega.

Ali se vam ni zdela zgodba o decibelih, fonih in sonih precej zapletena? Pri tem niste osamljeni. Podobnega mnenja so tudi strokovnjaki, ki zato opuščajo glasnost v fonih. Pri tem jim pomaga dejstvo, da sodobni merilniki zvok mimogrede razstavijo na sestavine z različnimi frekvencami. Tako je mogoče z elektronskim vezjem upoštevati, da je uho za sestavine pri manjši frekvenci od 2000 Hz in pri večji frekvenci od 4500 Hz manj občutljivo (slika 3). Merilnik potem pokaže glasnost v dB(A), ki približno ustreza glasnosti v fonih. V tem primeru je bolje, da podatki niso zelo natančni. Tako smo na koncu boljše spoznali pomen količine, s katero smo začeli prispevek o hrupu.

Jakost zvoka $j = \frac{1}{2}c\rho(2\pi v s_0)^2 = \frac{1}{2}\rho_0^2/(c\rho)$. c je hitrost zvoka, ρ gostota snovi, v frekvenca, s_0 amplituda odmika, $p_0 = 2\pi v c \rho s_0$ amplituda tlaka. Na slišenem pragu je pri frekvenci 1000 Hz v zraku v navadnih okoliščinah $s_0 = 1,1 \cdot 10^{-6} - 11 \text{ m}$ in $p_0 = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$.

Glasnost v decibelih je $g = 10 \log(j/j_0)$, log pomeni desetiški logaritem. _____ ✕ ✕ ✕

Uho



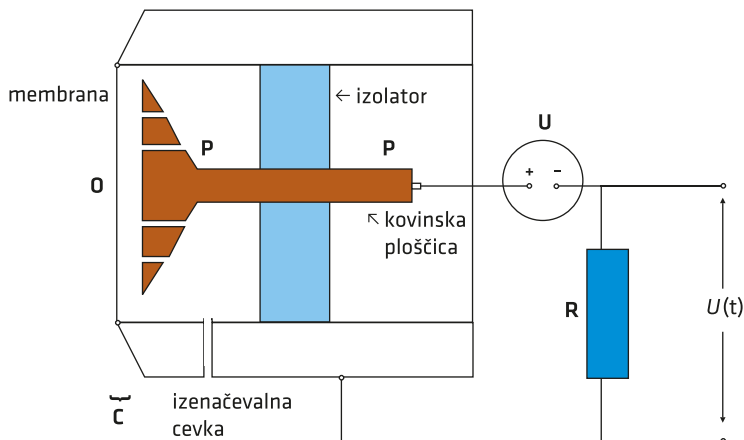
ANDREJ LIKAR

→ V dolgem razvoju živih bitij so se čutila zelo izpopolnila. Za preživetje so pomembna, saj bitju omogočijo, da zazna nevarnost in najde hrano. Tokrat si v grobem oglejmo, kako kopenski sesalci zaznavajo zvok. Ustroj in delovanje ušes sta pri njih presenetljivo podobna. Nekatere vrste so razvile sluh do neverjetnih meja. Tako se netopirji s poslušanjem odmevov lastnega glasu zelo natančno orientirajo in iščejo žuželke, sove v letu pa vodi k plenu njegovo škrebjanje v travi ali pod snegom.

Za merjenje in prenos zvoka uporabljamo mikrofona. V njem v ritmu zvočnih valov niha tanka jeklena opna. Njeno nihanje se spremeni v nihanje električne napetosti med izhodnima žičkama, ki sta zvezani na delovni upor R . Zaradi nihanja opne se spreminja kapaciteta ploščatega kondenzatorja, pri katerem je opna ena plošča, druga pa je debela kovinska plošča z luknjicami, ki primerno dušijo nihanja membrane (slika 1). Napetost iz mikrofona lahko v priključnih elektronskih napravah podrobneje obdelujemo. Najpogosteje jo le ojačimo in prenesemo do bolj ali manj oddaljenega zvočnika, ki jo spet spremeni v zvok.

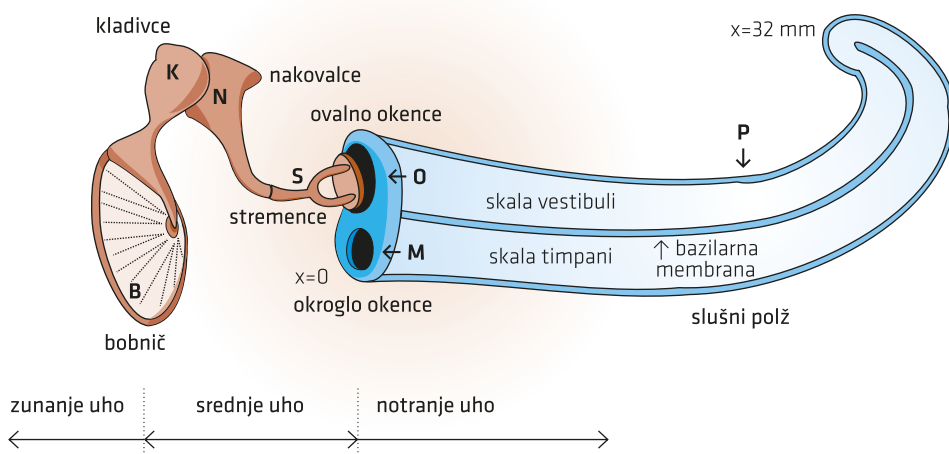
Tudi uho prestreza zvok z napeto kožico, imenovano bobnič, na kateri je pritrjena drobna koščica - kladivec (slika 2). Ta preko nakovalca in stremenca prenese nihanje bobniča v notranje uho. Opni s koščicami pravijo v medicini srednje uho, zunanje uho pa uhlju in sluhovodu do bobniča. Uho je prva stopnja pri razpoznavanju zvoka, ki se opravi v veliki meri v možganih. Nekaj posla v tej smeri pa opravi že notranje uho s tem, da razstavi zvok po frekvencah in tako obdelanega nato prenese v možgane po slušnem živcu.

Notranje uho tvori slušni polž, ki je zavrt v kosti. Izpolnjen je s tekočino, ki je po fizikalnih lastnostih zelo podobna vodi. Za opis delovanja ga precej po-



SLIKA 1.

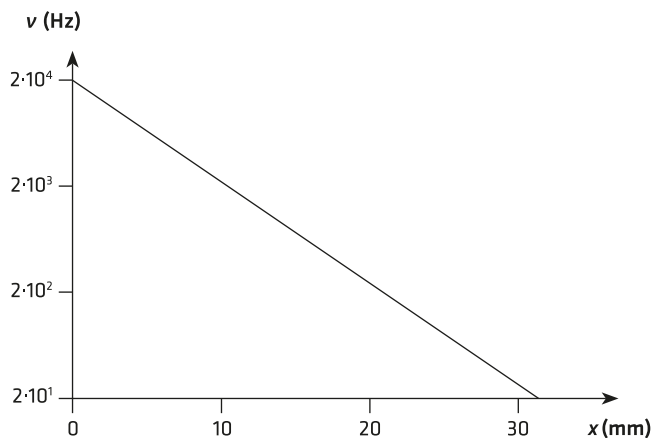
Zgradba in delovanje mikrofona. Sestavlja ga kondenzator (C), upor (R) in napetostni vir (U). Kondenzator tvori tanka napeta opna (O) in kovinska ploščica z luknjicami (P). Z nihanjem opne se spreminja kapaciteta kondenzatorja, to pa povzroča tok skozi upor in padelec napetosti na njem. Opna niha v skladu z nihanjem tlaka v zraku.



SLIKA 2.

Bobnič (B), klavdice (K), nakovalce (N) in stremence (S) tvorijo srednje uho. Stremence prenaša tresljaje v polž (P) preko ovalnega okenca (O). Slušni polž je polžasto zavita votlina, ki jo omejuje kost in je napolnjena s tekočino z lastnostjo vode. Bazilarna membrana deli polž na dva povezana dela. Polž smo razvili, da je slika bolj pregledna. Skala vestibuli je votlina, ki se razteza na zgornjem delu od ovalnega okenca s stremencem do vrha polža, skala timpani pa je spodnja votlina od vrha do okroglega okenca, ki z upogljivo membrano preprečuje, da bi tekočinastekla iz polža.

enostavimo. Najprej ga v mislih razvijemo v ravno, ožečo se cevko, ki je predeljena s tanko membrano na dve povezani cevki, ki ju imenujemo skala vestibuli in skala timpani (slika 3). Membrana se namreč tik pred najožjim delom polža konča. Membrana je elastična in prenaša svoje nihanje na drobne slušne celice, ki posredujejo njeno nihanje preko vlaken slušnega živca v možgane. Membrani pravijo bazilarna membrana. Stremence pritiska preko ovalnega okenca na tekočino skale vestibuli, na isti strani skale timpani pa se tanka opna okroglega okenca upogiba v srednje uho. Dolžina razvitega polža L_p je le 32 mm. Ker je hitrost zvoka v vodi 1500 m/s, bi bila valovna dolžina tona s frekvenco 1 kHz, ki ju uho najbolj zazna, v njej dolga kar 1,5 m. To je krepko nad dolžino polža. Za večino frekvenc, ki jih uho zaznava, lahko zato obravnavamo slušni polž kot togo votlinico, ki je napolnjena z nestisljivo te-



SLIKA 3.

Lastna frekvenca bazilarne membrane kot funkcija lege x na logaritmičnem diagramu.

→ kočino, po kateri se širi zvok z neskončno veliko hitrostjo. Zaradi pregrade, ki jo tvori bazilarna membrana, nastane med skalama tlačna razlika, ki poganja nihanje bazilarne membrane.

Izračunajmo tlačno razliko vzdolž bazilarne membrane. Denimo, da niha stremence harmonično z amplitudo z_0 in kotno frekvenco ω_0 , torej

$$\blacksquare z(t) = z_0 \sin(\omega_0 t).$$

Ker je tekočina v obeh skalah nestisljiva, mora slediti nihanju stremenca. Vsak del tekočine torej niha prav tako kot stremence. Sila, ki poganja del tekočine od mesta, ki je za x oddaljeno od stremenca do okroglega okenca, mora biti zaradi 2. Newtonovega zakona

$$\blacksquare F = m(x)a,$$

kjer smo z $m(x)$ označili maso opazovanega dela tekočine, z a pa njen pospešek. Tlak na tem mestu je potem

$$\blacksquare p(x) = \frac{F}{S} = \frac{m(x)a}{S}.$$

Pospešek a harmonično nihajoče tekočine je povezan z amplitudo in frekvenco tako, kot pri nihalu, in sicer velja

$$\blacksquare a(t) = -z_0\omega_0^2 \sin \omega_0 t = -\omega_0^2 z(t).$$

Masa $m(x)$ je za cevko s konstantnim prerezom S kar sorazmerna z dolžino opazovanega dela tekočine $l = L - x$, kjer smo z L označili celotno dolžino obeh skal, ki je $L = 2L_p = 64\text{mm}$. Prostornina opazovanega dela tekočine je torej $V(x) = (L - x)S$, masa pa

$$\blacksquare m(x) = \rho(L - x)S.$$

Tlak vzdolž skal je torej

$$\blacksquare p(x) = \rho(L - x)\omega_0^2 z(t).$$

Tlak torej enakomerno pada od stremenca do konca polža in še naprej do okroglega okenca, kjer je zelo blizu ničle, saj se opna okroglega okenca podaja skoraj brez tlaka. Razlika tlakov, ki poganja bazilarno membrano, torej prav tako enakomerno pada od naj-

večje vrednosti $p(0)$ do nič na koncu polža, kjer se tekočini v skalah stikata:

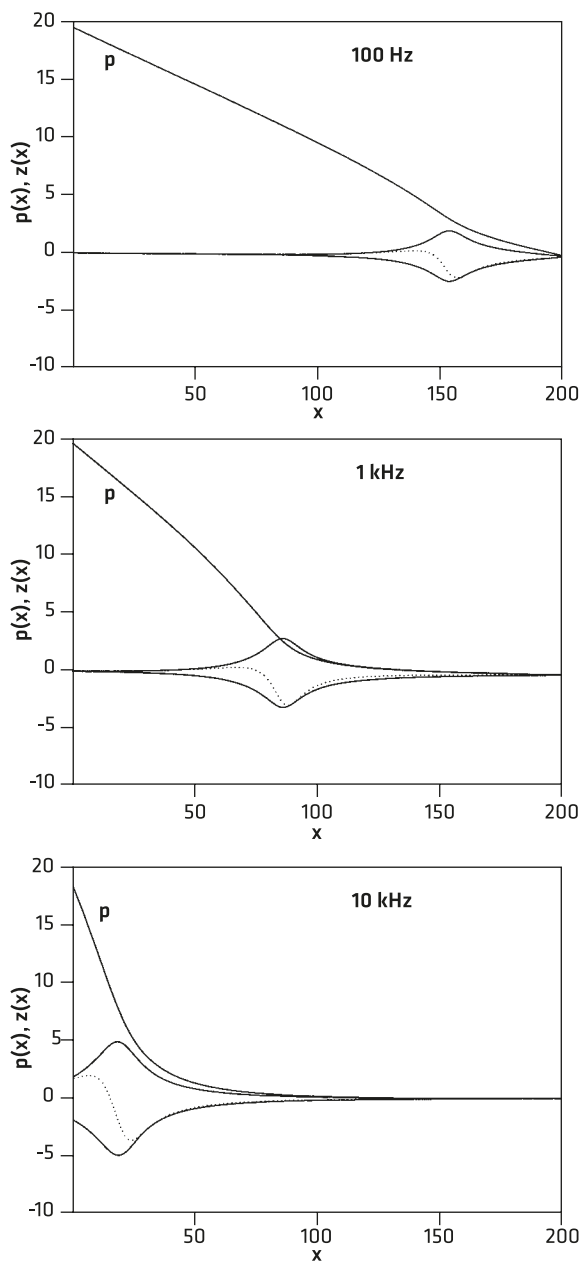
$$\blacksquare \Delta p(x, t) = \rho(L_p - x)\omega_0^2 z(t).$$

Zaradi te tlačne razlike se bazilarna membrana podaja. Membrana je elastična, njene lastnosti pa se vzdolž membrane močno spreminjajo. Na začetku, ob ovalnem okencu, kamor je pripeto stremence, je zelo toga, potem pa vse mehkejša. Tudi njena debelina se spreminja, na začetku je tenka, na koncu pa postaja vse debelejša. Z merjenji in računanjem so dognali, da je njena masa na površinsko enoto podana z izrazom $\frac{m}{S} = 0,770e^{\kappa_m x} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$, koeficient vzmeti na površinsko enoto pa $\frac{k}{S} = 2,1 \cdot 10^{10} e^{-\kappa_k x} \frac{\text{kg}}{(\text{m s})^2}$. Konstanti v eksponentu imata vrednost $\kappa_m = 50\text{m}^{-1}$ in $\kappa_k = 210\text{m}^{-1}$, x pa spet merimo od stremenca proti koncu polža. Taka razporeditev mase in koeficienta prožnosti privede do tega, da lahko opišemo bazilarno membrano kot množico nihal, ki se jim lastna frekvenca zmanjšuje vzdolž polža. Zveza med oddaljenostjo membrane od stremenca x in ustrezno lastno krožno frekvenco na tem mestu je eksponentna in jo zapišemo kot

$$\blacksquare \omega(x) = \omega_{max} \left(\frac{\omega_{min}}{\omega_{max}} \right)^{\frac{x}{L_p}}.$$

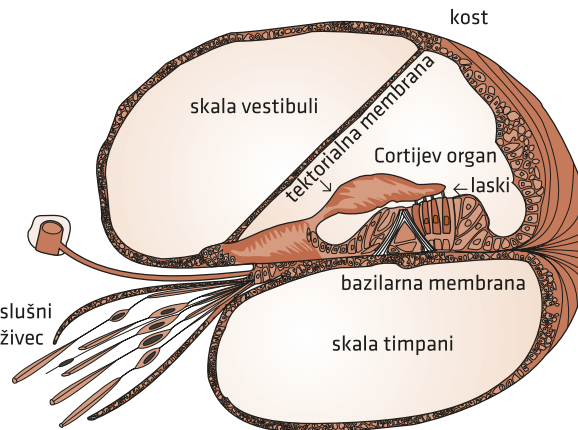
Maksimalna krožna frekvenca ω_{max} ustreza tonom na zgornji slišni meji, to je 20 kHz, minimalna ω_{min} pa tonom na spodnji meji, to je 20 Hz. Na začetku, ko je $x = 0$, je lastna krožna frekvenca membrane $\omega(0) = \omega_{max}$, proti koncu polža, ko je $x = L_p$, pa tisočkrat manjša, $\omega(L_p) = \omega_{min} = \frac{\omega_{max}}{1000}$ (slika 4). Nihala so tudi močno dušena, nekoliko manj pri koncu polža.

Zaradi tlačne razlike, ki niha s frekvenco poslušane tona ω_0 , se tako močno odzove le del membrane, pač tisti, ki je ubran na to frekvenco. Na sliki 5 je prikazanih nekaj odzivov za različne frekvence. Zaradi podajanja bazilarne membrane se spremeni tudi tlačna razlika v skalah. Tega tu ne bomo podrobneje obravnavali, na sliki pa je ta vpliv upoštevan. Tlak na slikah zaradi preglednosti ni prikazan v pravem merilu. Amplituda nihanja stremenca je pri vseh treh frekvencah enaka, začetna strmina krivulje tlaka pa bi morala biti sorazmerna z ω_0^2 . Nihanje bazilarne membrane prenašajo v možgane celice, ki so s tankimi laski razpete med bazilarno membrano in t.i. tektorialno membrano. Ob nihanju bazilarne



SLIKA 4.

Nihanje bazilarne membrane pri nekaj frekvencah. Dušenje membrane je za visoke frekvence nekoliko manjše od dušenja, ki ga pričakujemo od instrumentov, proti nižjim frekvencam pa nekoliko pojema. Računali smo s konstantnim dušenjem. Krivulje tlaka zaradi preglednosti niso narisane v enakem merilu pri vseh treh frekvencah. Amplitude nihanja membrane so podane pri konstantni amplitudi stremenca. Potemnjeni del prikazuje amplitudo nihanja v odvisnosti od kraja, pikčasta krivulja pa podaja odmik bazilarne membrane od mirovne lege v trenutku, ko smo zajeli krivuljo tlaka.



SLIKA 5.

Prečni prerez cevke slušnega polža. V srednjem delu je prikazan Cortijev organ, ki omogoča prenos tresenja bazilarne membrane na celice z laski. Organ z ogradjem v obliki črke Δ ima enako zgradbo vzdolž celotne polžaste cevi.

membrane celice aktivirajo njihovi laski, ki nihajo zaradi medsebojnega strižnega gibanja obeh membran (slika 6).

Morda preseneča, da se znatno odzove zelo velik del bazilarne membrane na ton z eno samo frekvenco. Pred oči nam stopi črtast spekter, ki ga imajo toni in pričakujemo, da se bo ton v polžu preslikal na nihanje bazilarne membrane na podoben način. To utrjuje še dejstvo, da lahko glasbeno nadarjeni ljudje ločijo med tonoma, ki se po frekvenci ločita le za nekaj nihajev v sekundi. Zavedati pa se moramo, da je uho le prva stopnja pri zaznavi tonov. Mnogo, na način, ki ga še ne razumemo v celoti, prispevajo možgani. Bazilarna membrana bi se sicer lahko odzvala v mnogo ožjem pasu, če bi nihala manj dušeno. Pri razpoznavanju zvoka pa bi bila to ovira, saj bi se membrana tresla tudi potem, ko zvoka ne bi bilo več. Prav tako bi kratkotrajne tone slišali slabše kot tone, ki trajajo dlje časa. Vse pa kaže, da na dušenje bazilarne membrane aktivno vplivajo na določen ton uglasene celice z laski tako, da se v pravilnem ritmu krčijo in raztezajo in s tem močno ojačijo nihanje bazilarne membrane prav v področju največjega pasivnega odmika. Rečemo lahko, da se dušenje na mestu, kjer je nihanje membrane največje, za trenutek zelo zmanjša, morda celo vzbuja nihanje, namesto da bi ga zaviralo.

Uho je tudi glede občutljivosti izreden instrument. Slišimo še tone s frekvenco 1 kHz in gostoto ener-

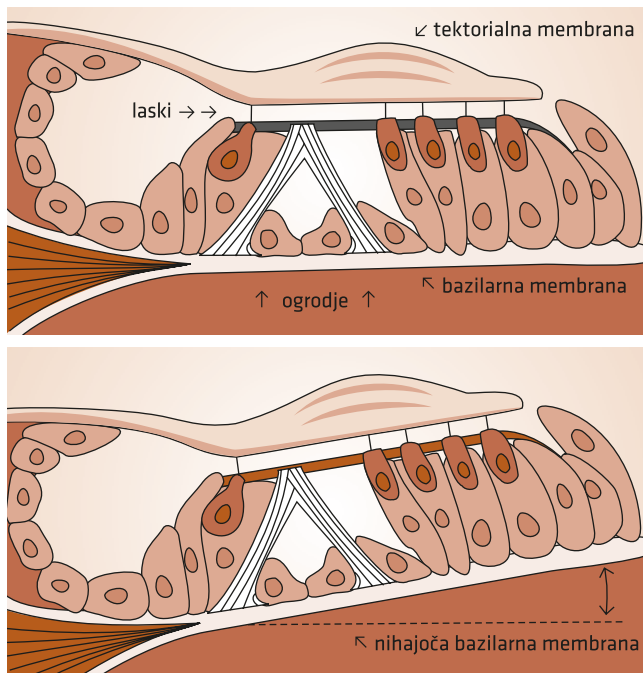




15

nadaljevanje
s strani

gijskega toka 10^{-12} W/m², pri katerem nihajo deli zraka le za del polmera molekul. Tolikšna občutljivost je na meji, da bi slišali motnje zaradi termičnega šuma v polžu. Mikrofoli le s težavo sledijo ušesu, ko gre za zelo tih zvok. Opisano ojačevanje v polžu gotovo pripomore k tolikšni občutljivosti ušesa. Celice z laski se v ušesu ne obnavljajo. Prevelik hrup lahko te celice onemogoči tako, da se laske potrgajo. To vodi v gluhost, ki se je ne da ozdraviti.



SLIKA 6.

Celice z laski se vzbudijo, ko medsebojno strižno nihata bazilarna in tektorialna membrana.

× × ×

www.presek.si
www.dmfa.si
www.dmfa.si

× × ×

Razmisli in poskusi



MITJA ROSINA

→ PREGLED VPRAŠANJ IN NALOG

Dragi misleci in poizkuševalci!

V prejšnjih *Presekih* se je zvrstilo že mnogo zgledov iz vsakdanjega življenja, pa tudi nenavadnih pojavov. Škoda bi bilo, če bi potonili v pozabo. Marsikatero ste preskočili, pa jih lahko še vedno poiščete v starih številkah *Preseka*. Če pokukate v odgovore, lahko sami tudi po svoje razmislite in poskuse dopolnite. Veseli bomo, če nam boste poslali svoje rezultate v uredništvo *Preseka*. Pojavi okrog nas vedno znova presenečajo! Zgledi, označeni z *, pa predstavljajo poseben izziv, saj nanje še nismo objavili odgovorov. Časa za razmislek in poizkuse bo med počitnicami več kot dovolj. Vabljeni k razmisleku in poizkušanju.

- [33, št. 1, str. 20] Ali lahko premakneš roko z večjim pospeškom, kot je pospešek prostega pada? *Spusti svinčnik in ga poskusi ujeti!*
- [33, št. 1, str. 20] Ali lahko brez opeklin zdržiš temperaturo nad 1000° C? *Zamahni s prstom skozi plamen sveče!*
- [33, št. 1, str. 20] Kdaj te napetost 10000 V ne ubije? *Počehi se!*
- [33, št. 1, str. 21] Ali v jasni noči vidiš žarnico na Krvavcu? *Kot zvezdo prve magnitude - če ne bi bilo svetlobnega onesnaženja.*
- [33, št. 1, str. 21] Aleksander Veliki je v puščavi razlil vrč vode. Koliko molekul te vode je danes v tvojem kozarcu soka?
- [33, št. 1, str. 21] Kako ribi uspe v divergentnem toku mirovati glede na breg? *Če prehiti, jo hitrejša voda odnese nazaj.*
- [33, št. 1, str. 21] Ali se les močno poda pri tlaku (10^8 Pa)? *Zbodi s šivanko, pa boš videl, da ne.*
- [33, št. 1, str. 21] Ali lahko napihneš balon na tlak, ki je za 10000 Pa višji od zunanjega? *Poskusi pihati s cevko v en meter globoko vodo!*