

Biofizika

- ECTS: 2
- Razina: 6
- Predavanja: 25 sati
- Dodatno samostalan rad od oko 25 sati

- Nastavnici: prof. dr. sc. Mile Dželalija, doc. dr. sc. Marija Raguž

- Literatura:
 - Glaser, Roland, Biophysics, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2001
 - Bilješke
 - www.pmfst.hr/~mile/nastava/Biofizika.pdf

Ishodi

Student/ica će:

- objasniti molekulske veze;
- objasniti prijenose energije između molekula;
- objasniti pojam entropije i opisati važnost promjene entropije u razvoju bioloških sustava;
- opisati međudjelovanja koja su važna kod stvaranja bioloških struktura, posebno struktura vode;
- objasniti svojstva bioloških membrana;
- opisati osnovna termodinamička svojstva bioloških sustava;
- objasniti neravnotežnu raspodjelu iona u stanicama;
- opisati električno polje u biološkim sustavima;
- opisati osnovna biomehanička svojstva tekućina i ljudskog tijela;
- opisati osnovne elemente fizike okoliša

Tematske cjeline

- Biofizika je interdisciplinarna znanost koja zakonima fizike opisuje biološke sustave.
- Biofizika istražuje sve razine bioloških sustava, od molekulskih dimenzija do cijelih organizama i ekosustava.

Tematske cjeline:

- Molekulske veze;
- Pobuđenje molekula i prijenos energije;
- Biološki sustavi, vjerojatnost i entropija;
- Biološki sustavi i međudjelovanja;
- Svojstva bioloških membrana;
- Termodinamika bioloških sustava; entropija i stabilnost;
- Neravnotežna raspodjela iona u stanici;
- Električno polje u biološkim sustavima (182-202);
- Biomehanika tekućina i ljudskog tijela;
- Osnove fizike okoliša;

Uvodno

- Biofizika istražuje temeljne principe koji su osnova svim procesima živih sustava;
- Biofizika je interdisciplinarna znanost, prvenstveno oslanjajući se na spoznaje fizike i biologije, te matematike, fizikalne kemije i biokemije;
- Biofizika uzima osnovne principe fizike i primjenjuje ih na biološke sustave;
- Izvori Biofizike mogu se pronaći u antičkim vremenima pa dalje u doba renesanse i kasnije – Leonardo da Vinci (modeli aktivnosti životinja), Alfonso Borelli (istraživanja gibanja životinja), Luigi Galvani, Alessandro Volta (električna svojstva kod životinja), Thomas Young (optička svojstva oka), Albert Einstein (opisano Brown-ovo gibanje), i mnogi drugi

Molekulske veze

Kvantni brojevi

- Kvantno-fizikalni pristup, koji omogućava opisivanje molekulske veze i prijenos energije;
- Svojstva atoma, atomske orbitale
- Schroedingerova jednačba, kao teorijska osnova određivanja valne funkcije te vjerojatnosti prisustva elektrona negdje u prostoru;
- Stanja elektrona u atomu prikazuju se kvantnim brojevima:
 - Glavni kvantni broj, $n = 1, 2, 3, \dots$ (K, L, M, ...);
 - Orbitalni kvantni broj, $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ (s, p, d, ...);
 - Magnetski kvantni broj, $m = -l, \dots, 0, \dots, l$;
 - Spinski kvantni broj (točnije projekcija), $s = -1/2, 1/2$;
- Paulijev princip isključenja – nemogućnost postojanja dva i više elektrona u istom stanju (u stanju s identičnim vrijednostima kvantnih brojeva);

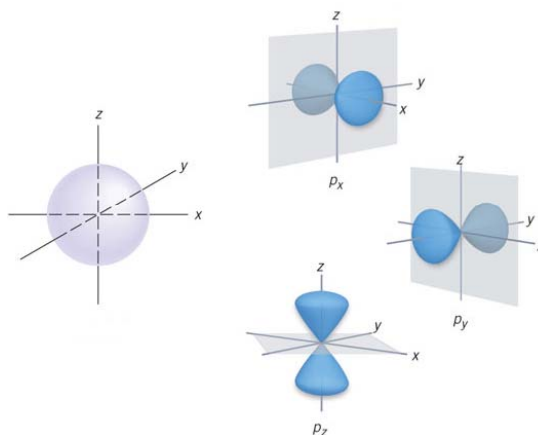
Primjer, atom vodika

- Za primjer, energija elektrona u osnovnom stanju atoma vodika:

$$E = -\frac{e^4 m}{8\epsilon_0 n^2 h^2} = -2.18 \cdot 10^{-18} \text{ J} = -13.6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602177 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

- s-orbitale ($l = 0$), sferno simetrična raspodjela naboja u atomu
- p-orbitale ($l = 1$), tri mogućnosti cilindrično-simetrične raspodjele (x, y, z simetrija)

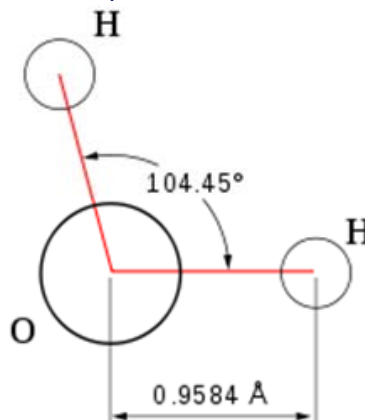


Kovalentna veza

- Sljedeće komponente sudjeluju u energiji vezanja atoma u molekulama:
 - Kinetička energija elektrona;
 - Elektrostatska potencijalna energija elektrona;
 - Elektrostatska potencijalna energija elektrona u odnosu na jezgru;
- Postoji potpuni izračun samo za molekulu H_2 , kao najjednostavniju molekulu;
- Izračun energije vezanja za druge molekule nije jednostavno;
- Kovalentna veza, događa se kada dva atoma imaju nesparene elektrone u svojim valentnim (vanjskim) ljuskama, te da su navedeni elektroni suprotnih projekcija spina;
- Primjer, ugljik, C ($1s^2 2s^2 2p_x 2p_y$), dakle 2 elektrona su u mogućnosti stvaranje veze;
- Postoji i druga mogućnost stanja ugljika ($1s^2 2s 2p_x 2p_y 2p_z$), tj. s 4 valentna elektrona.

Primjer kovalentne veze

- Za primjer dušika postoji jedna takva mogućnost, N ($1s^2 2s^2 2p_x 2p_y 2p_z$), dakle 3 valentna elektrona;
- Kod molekule vode, H_2O :
 - Atom kisika, O ($1s^2 2s^2 2p_x 2p_y 2p_z^2$), ima 2 valentna elektrona
 - Atom vodika, H (uz suprotne spinove), veže se preko 2 valentna elektrona kisika, stvarajući sp-vezu
 - Kut između tako postavljenih atoma vodika nije 90° , nego 104.45° (što je uzrokovano odbijanjem dvaju elektrona koji dolaze iz atoma vodika)
- Elektronski parovi koji sudjeluju u vezi, mogu imati veću vjerojatnost postojanja oko jednog od atoma kojima pripadaju – to znači da atomi postaju djelomično električki nabijeni



Ionska veza

- U slučaju da dođe do ekstremnih polarizacija atoma, uzrokovano kovalentnom vezom, nije moguće govoriti o molekularnoj orbitali, niti o vezanim elektronima. U tom se slučaju govori o potpunom odvajanju naboja – tj., stvaranju iona
- Primjer, NaCl (čak nema ni smisla NaCl zvati molekulom) – vezu ovih dvaju atoma moguće je objasniti jednostavnom elektrostatskom silom, tj., Columbovim zakonom

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ C/V}$$

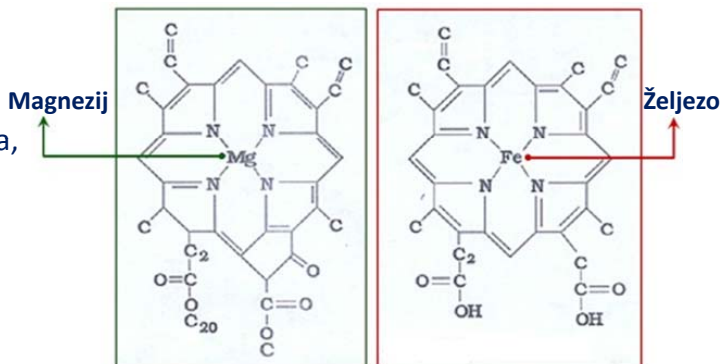
- Energija vezanja – rad potreban za pomak jednog iona s njegovog mjesta do beskonačne udaljenosti od drugog iona (za NaCl u primjeru)

$$E = -\int F dr = -\int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} dr = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r_1} = 8.27 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Metalna veza

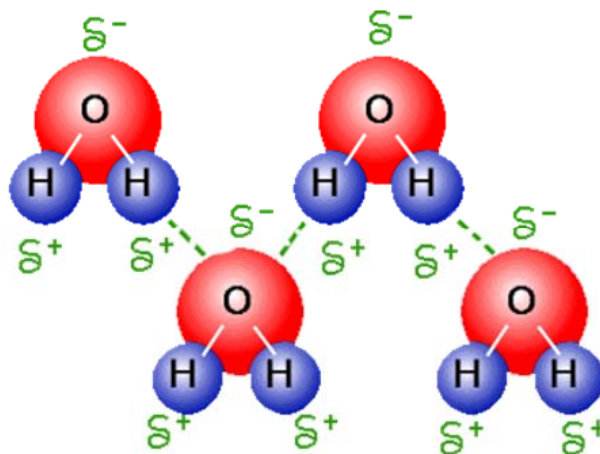
- Veza više atoma sa središnjim atomom, bez međusobnog vezanja
- Središnji atomi su elementi s nepopunjenom d-orbitalom (tj., $n > 2$)
- Takvi atomi su:
 - Fe (npr., kod stvaranja hemoglobina, prenosi kisik u krvi);
 - Mg (npr., kod klorofil, zeleni pigment kod biljaka);
 - Co (npr., B₁₂-vitamin)

- U skladu s vrijednostima magnetskog kvantnog broja, moguće je postojanje 5 različitih d-orbitala



Vodikova veza

- Veza dvaju dipola preko atoma vodika
- Dipoli se približe jedan drugome do oko 0.3 nm, što ukazuje da pored elektrostatskog privlačenja postoji i doprinos kovalentne veze
- Vodikova veza spada u slabe veze (prekida se već i pri normalnim temperaturama)
- Vodikova veza može postojati unutar velike molekule, ali i između njih



Pobuđenje molekula i prijenos energije

Fotonsko pobuđenje molekula

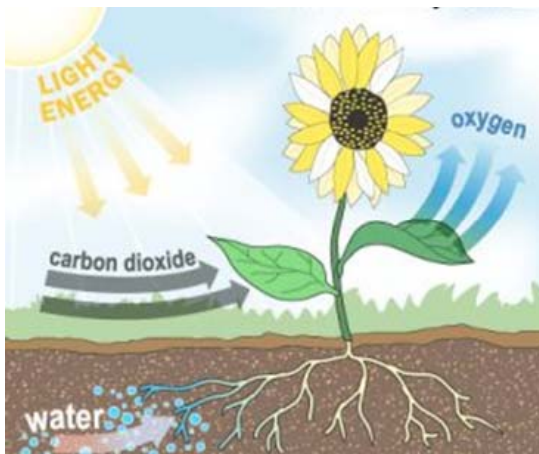
- Svi procesi u životu trebaju energiju, koja izvorno dolazi uglavnom od vidljive svjetlosti koju emitira Sunce
- Valna duljina vidljive svjetlosti: 400 do 800 nm
- Energija takvih fotona je između 3.1 i 1.6 eV (za usporedbu, ionizacijska energijavode je 12.56 eV), $E = hc/\lambda$
- Mehanizam prijenosa energije započinje apsorpcijom fotona vidljive svjetlosti i pobuđenjem molekula na mjestima gdje se događa fotosinteza
- Dalje se energija akumulira kao kemijska energija u stanicama ATP-a
- Uvodimo tri načina prijenosa energije između molekula:
 - Prijenos energije zračenjem
 - Prijenos energije induciranom rezonancijom
 - Prijenos energije nabojima

Prijenosi energije

- Prijenos zračenjem:
 - Pobuđena molekula emitira zračenje koje (kad odgovara apsorpcijskom spektru drugih molekula) bude uhvaćeno drugim susjednim molekulama. I tako proces nastavlja dalje.
 - Ovakav prijenos energije nije učinkovit i ne predstavlja značajniji proces u biološkim sustavima
- Prijenos induciranom rezonancijom:
 - Od posebne je važnost proces fotosinteze, kojim se energija, uhvaćena u molekulu kroz pobuđenje elektrona u njoj, predaje cijeloj molekuli
 - Elektron u povratku u osnovno stanje jedne molekule predaje energiju elektronu druge molekule bez zračenja
- Prijenos nabojima:
 - Najčešći proces u metaboličkim procesima (npr., elektronima)

Prijenosi energije fotosintezom

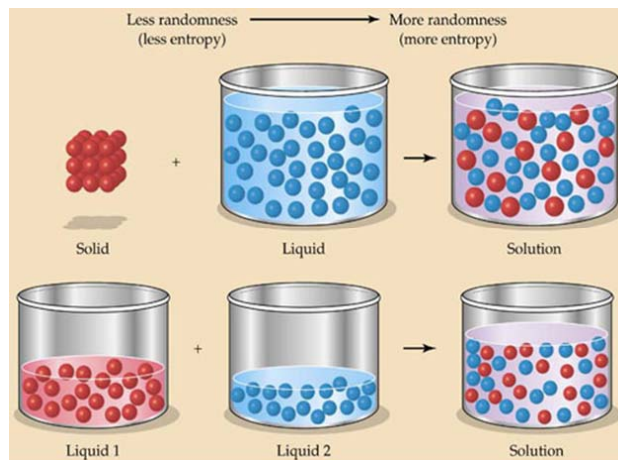
- Poseban proces prijenos energije u kojem se kvant sunčeve svjetlosti transformira u energiju kemijskih veza. To je slučaj kod fotosinteze.
- Oko 0.05 % ukupne energije koja stigne do Zemlje svake godine, uhvati se fotosintezom. To je glavni proces prijenoa energije za potrebe života



Vjerojatnost i entropija

- Biološke sustave možemo proučavati i u kontekstu termodinamičkih gibanja.
- Entropija, uvedena još 1854. (Rudolf J.E. Clausius), kao veličinu u termodinamici, definiranu kao toplinu koja se daje sustavu pri reverzibilnom procesu u odnosu na temperaturu sustva.
- Kasnije, 1894. (Ludwig Boltzmann) uvodi se kao veličina u statističkoj fizici. Ovdje, entropija postaje mjera uređenosti nekog sustava
- Entropija, S , je ekstenzivna veličina, tj. vrijedi:

$$S_1 + S_2 = S$$



- Entropiju uvodimo kao logaritam vjerojatnosti nalaženja sustava u određenom stanju:

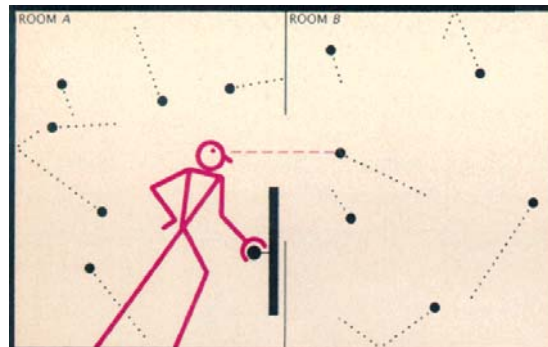
$$S = k \ln(W), k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$$

- Primjer određivanja entropije.
- Količina informacije je povezana s entropijom.
- Npr., informaciju koju može nositi novčić je manja nego skup igračih karata

$$I = k \ln(P)$$

- U Biofizici, npr. moguće je računati količinu informacije koju proteini nose.
- Sljedeća prikaz ilustrira vezu entropije i informacije

- Sortirati čestice je moguće samo ako postoji informacija o parametrima čestica po kojima se sortiraju
- Inače bi bio perpetum-mobile.
- Entropija se povećava za sve izolirane sustave (II. zakona termodinamike)
- Biološke stanice selektiraju molekule na račun povećanja entropije okolnog sustava
- Kako je nastala jedna takva prva makromolekula?



Pitanja

Termodinamika bioloških sustava

- Temeljni koncepti termodinamike
- Sustavi, skup elemenata s nekom međusobnom vezom
- Izolirani sustavi, ne izmjenjuju niti energiju niti materiju s okolinom
- Zatvoreni sustavi, mogu izmjenjivati energiju, ali ne materiju
- Otvoreni sustav, mogu izmjenjivati i energiju i materiju

- Fizikalne veličine
- Intenzivne veličine, nisu aditivni, ne ovise o veličini sustava (temperatura, tlak, ...)
- Ekstenzivne veličine, aditivne veličine (masa, obujam, ...)

- Prvi zakon termodinamike

$$dU = dQ + dW$$

- Entropija:

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T}$$

- Rad plina kod promjene obujma

$$dW_p = -pdV$$

- Rad kod djelovanja sile:

$$dW_l = Fdl$$

- Rad u stanici za prijenos nekog broja molekula (dn , μ je kemijski potencijal)

$$dW_n = \mu dn$$

- Rad za prijenos naboja u odnosu na električni potencijal

$$dW_q = \psi dq$$

- Ukupni rad u nekom sustavu može biti kombinacija svega navedenog:

$$dW = -pdV + Fdl + \sum_{i=1}^m \mu_i dn_i + \psi dq$$

- Odnosno, za unutrašnju energiju (diferencijalni oblik Gibbsove jed.)

$$dU = TdS - pdV + Fdl + \sum_{i=1}^m \mu_i dn_i + \psi dq$$

- Pod određenim uvjetima, prethodna jednadžba može se integrirati i zapisati na sljedeći način:

$$U = TS - pV + Fl + \sum_{i=1}^m \mu_i n_i + \psi q$$

- To znači da mora vrijedi sljedeća jednadžba:

$$SdT - Vdp + l dF + \sum_{i=1}^m n_i d\mu_i + q d\psi = 0$$

- Definiraju se sljedeće veličine:

- Entalpija $H = U + pV$
- Helmholtzova slobodna energija $F = U - TS$
- Gibbsova slobodna energija $G = H - TS$

- Mjerne jedinice za: tlak (1 Pa); temperaturu (1 K, 1 °C);

- Kombinacijom, mogu se dobiti sljedeći izrazi za uvedene veličine:

$$dH = SdT + Vdp + Fdl + \sum_{i=1}^m \mu_i dn_i + \psi dq$$

$$dF = -SdT - pdV + Fdl + \sum_{i=1}^m \mu_i dn_i + \psi dq$$

$$dG = -SdT + Vdp + Fdl + \sum_{i=1}^m \mu_i dn_i + \psi dq$$

- U biološkim sustavima, procesi su obično izobarni ($dp = 0$), i izotermni ($dT = 0$), što primjenu entalpije i Gibbsove slobodne energije čini važnijom za primjenu u biološkim sustavima
- Silu koja uzrokuje neko gibanje određuje se na sljedeći način:

$$\vec{F} = -\nabla U$$

- Već prije spomenuti kemijski potencijal, μ_i , može biti određen iz kemijske aktivnosti, a_i :

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i$$

$$a_i = f_i c_i$$

- gdje su f_i faktori aktivnosti

Entropija i stabilnost

- Drugi zakon termodinamike kaže da svaki izolirani sustav spontano mijenja stanje tako da se stvara njegova maksimalna entropija.
- Kada se dogodi maksimalna entropija, kažemo da se postigla termodinamička ravnoteža.
- Uvodimo veličinu: prirast entropije

$$\sigma = \frac{dS}{dt}$$

- To znači da je prirast entropije za izolirane sustave uvijek pozitivan, osim kad je sustav u termodinamičkoj ravnoteži (tada je jednak nuli).
- Za reverzibilne procese, prirast entropije je nula.
- Reverzibilni procesi su oni koji se mogu ponavljati bez uložene energije
- Za otvorene sustave, smanjenje entropije je moguće.
- Primjeri...

- Uvodimo pojam stacionarnih stanja kojima označavamo stanja sustava u kojem se struktura sustava i parametri koji ga određuju ne mijenjaju s vremenom.
- Stacionarna stanja dijelimo na stanja:
 - Za koji je prirast entropije jednak nuli, i nazivamo termodinamička ravnoteža
 - Za koji je prirast entropije veći od nule, i nazivamo dinamička ravnoteža
- Termodinamička ravnoteža može postojati u uvjetima:
 - Globalne ravnoteže
 - Lokalne ravnoteže
- Primjeri

Električno polje u biološkim sustavima

- Poznato da je električna svojstva postoje u živim organizmima, što mjerimo različitim mjernim uređajima (npr. elektromiogramima, ...)
- Riječ je o malim vrijednostima napona između različitih dijelova organizma – nekoliko milivolti ili manji (danas se mjere i nanovolti između dviju točaka) te malih vrijednosti električne struje
- U organizmima se javljaju istosmjerne i izmjenične struje
- Za bolje razumijevanje takvih procesa u živim organizmima, dalje uvodimo osnovne veličine i zakone iz elektromagnetizma, te primjere.

- Električne su pojave povezane s atomskom strukturom tvari
- Atom se sastoji od električki pozitivno nabijene jezgre (protoni pozitivno nabijeni i neutroni neutralni), te električki negativno nabijenih elektrona
- Atom u osnovnom stanju električki je neutralan
- Najmanji naboj koji neko tijelo može imati je naboj elektrona, odnosno protona. To znači da neko tijelo ima naboj onda kad ima višak ili manjak elektrona u odnosu na osnovno stanje.
- Naboj jednog elektrona (i protona) je $1.6 \cdot 10^{-19}$ C (Coulomb).
-
- Između tijela koja imaju naboje djeluje Coulombova sila, iznosa:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}$$

- Coulombovo međudjelovanje objašnjava se električnim poljem, a pod djelovanjem na slobodne elektrone ili druge ione može nastati električna struja (protok naboja kroz površinu u vremenu):

$$i = \frac{dq}{dt}$$

- Električna struja može nastaje u slučaju gibanja jedne vrste naboja, ali može i zbog istovremenog gibanja više vrsta, čak i pozitivnih i negativnih istovremeno

- Električno polje u nekom vodiču prenosi silu na naboje u tom vodiču stvarajući električnu struju ovisno o svojstvima tog vodiča i električnom polju u tom vodiču
- Zakon kojim se prikazuje povezanost struje (i), otpora vodiča (R) i napona (U) na krajevima vodiča je Ohmov zakon:

$$i = \frac{U}{R}$$

- gdje se napon U , određuje iz električnog polja i duljine između krajeva vodiča kojim teče struja

$$U = E \cdot l$$

- a otpor R iz duljine vodiča, poprečnog presjeka i vrsti materijala (električnoj otpornosti tog vodiča)

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

- Živi organizmi nisu niti dobri vodiči, niti izolatori pa se gornji izrazi prilagođavaju

- Električnu struju mjerimo u amperima (1 A)
- Otpor u ohmima (1 Ω)
- Napon u voltima (1 V)
- Prolazeći kroz neki vodič otpora R , struja (i) će u nekom intervalu vremena Δt oslobađati toplinu Q :

$$Q = i^2 R \Delta t$$

- odnosno događa se zagrijavanje tkiva.
- Toplino Q mjerimo u joulima (1 J).

- Struja koja može prolaziti kroz različite vodiče, pa tako i kroz tkiva može biti istosmjerna ili izmjenična.
- U slučajevima istosmjerne struje, govorimo samo o tzv. omskim otporima, dok kod izmjeničnih struja, govorimo o omskim i kapacitivnim otporima na kojima dolazi do oslobađanja energije električne struje.
- Omski otpori ne ovise o frekvenciji izmjenične struje, dok kapacitivni otpori ovise.
- Kapacitet mjerimo u faradima (1 F)

Pitanja

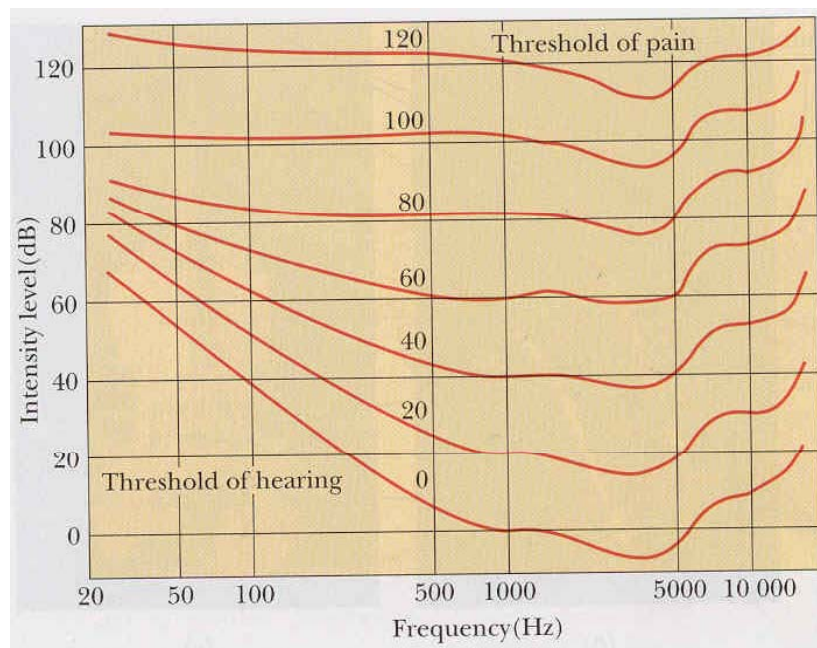
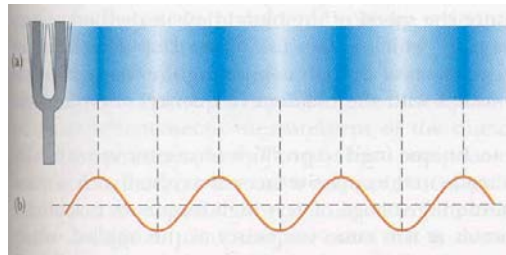
Osnove fizike okoliša

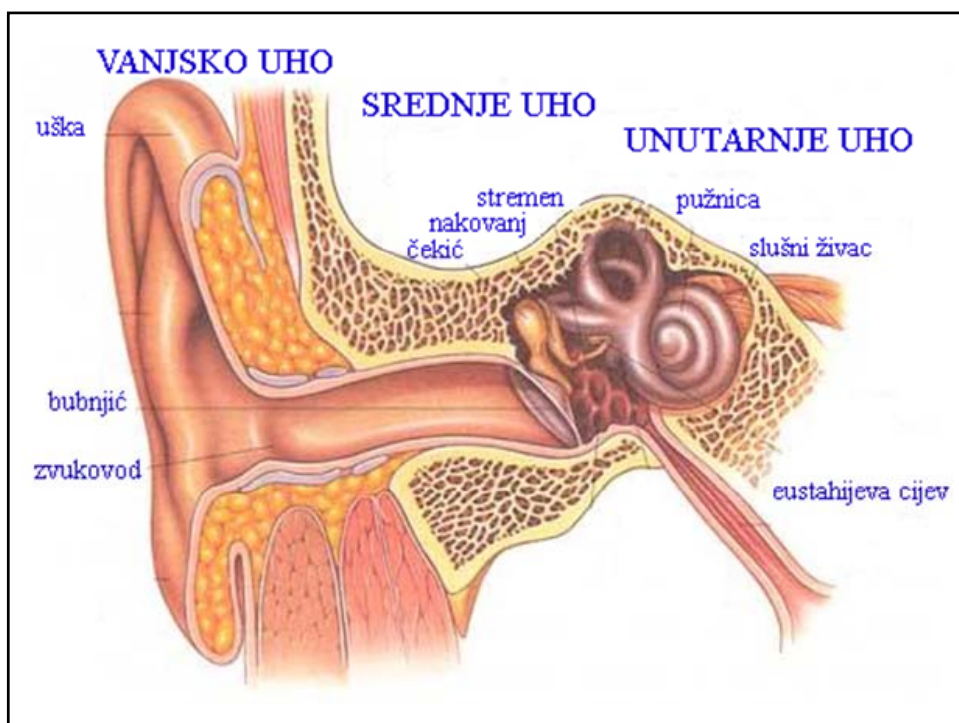
- Primjer:
 - Zvuk
 - Svjetlost
- Zvuk je primjer longitudinalnih valova, a može se širiti kroz različita mehanička sredstva (plinovi, tekućine, krutine).
- Zvučni valovi nastaju zgušnjavanjem i razrjeđivanjem mehaničkog sredstva, odnosno povećavanjem i smanjivanjem tlaka u sredstvu.
- Zvuk, odnosno zvučne valove, dijelimo na:
 - Infrazvuk, frekvencije manje od 20 Hz
 - Čujne zvučne valove, frekvencije od 20 Hz do 20000 Hz
 - Ultrazvuk, frekvencije veće od 20000 Hz
- Jačina zvuka određena je intenzitetom zvučnog vala, tj. energijom koju zvučni val prenese u jedinici vremena kroz jediničnu površinu okomito na smjer širenja vala

- Ljudsko uho je najosjetljivije na zvučne valove koji imaju frekvenciju od 1000 do 4000 Hz
- Najmanja jačina zvuka koju još čujemo naziva se prag čujnosti, i iznosi oko 10^{-12} W/m^2
- Prag bola osjeća se za intenzitet od oko 10 W/m^2
- Kako je razlika između praga bola i praga čujnosti ogromna, to se uvodi logaritamska skala, i naziva nivo jačine zvučnog vala:

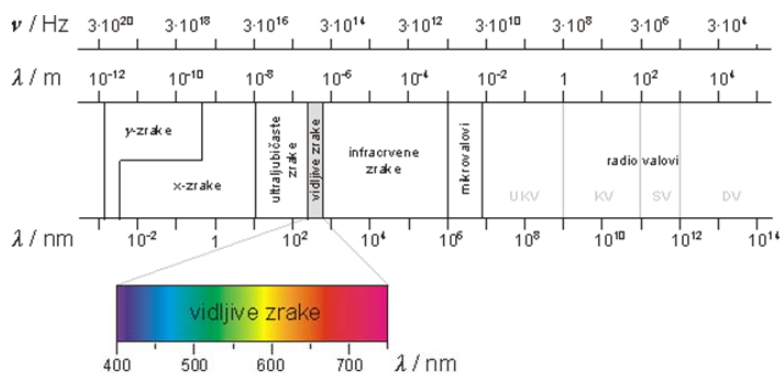
$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}, \quad I_0 \text{ je prag čujnosti}$$

- Nivo jačine zvučnog vala mjerimo u desibelima (dB)
- Prag čujnosti postaje 0 dB, a prag bola 130 dB
- Primjer: dva izvora zvuka od 100 dB. Koliki je ukupni nivo?





- Svjetlost pripada skupu elektromagnetskih valova, čija je valna duljina od oko 400 do 760 nm
- Različitu valnu duljinu (odnosno frekvenciju) doživljavamo različitom spektralnom bojom



- Zbog postojanja tri različite vrste čunjića u oku, sve boje koje oko razaznaje možemo prikazati kroz tzv. tri osnovne boje (s maksimumom osjetljivosti za crvenu, zelenu i plavu boju)

