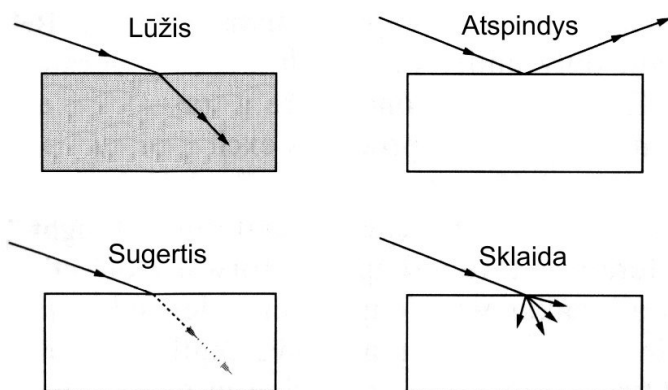


4. ŠVIESOS SAŲEIKA SU BIOLOGINIU AUDINIU

Optinė biopsija, įgalinanti charakterizuoti audinius ir diagnozuoti jų pokyčius, pagrįsta šviesos sąveika su biologiniais audiniais. Skirtingai negu ląstelės, kurias aplinkoje palaiko terpė, audiniai yra vientisa pati save palaikanti struktūra, kuriai nereikia terpės ir kurioje šviesą sugeriantys ir šviesą sklaidantys centrai išsidėstę atsitiktine tvarka. Šviesos sklaidimas audiniu, kaip ir kiekviena neskaidria aplinka, sukelia įvairius vyksmus: lūžį, atspindį, sklaidą ir sugertį (4.1 pav.). Šviesos lūžis ir atspindys yra glaudžiai susiję tarpusavyje ir aprašomi Frenelio dėsniais. Atspindys priklauso nuo šviesos kritimo kampo: kuo jis didesnis, tuo didesnis atspindys nuo paviršiaus. Taigi daugiausia šviesos prasiskverbs į audinį, jei ji kris 90^0 kampu (t. y. šviesos spindulys bus statmenas audinio paviršiui). Labiausiai pastebimas reiškinys yra šviesos *sklaida*, nes biologinis audinys yra labai sklaidanti terpė. Audinio drumstumas, jo nepralaidumas šviesai “susidaro” dėl sudėtinės sklaidos nuo heterogeninių audinio komponentų: makromolekulių, ląstelių organelių, mikroskopinių vandens sankaupų. Manoma, kad sklaida kyla dėl įvairių audinio komponentų nedidelių lūžio rodiklių skirtumų. Šie skirtumai šiek tiek keičia šviesos sklaidimo audiniu kryptis. Nors krypčių pokyčiai yra menki, jų visuma šviesai sklindant audiniu sukelia ženklus vyksmus.

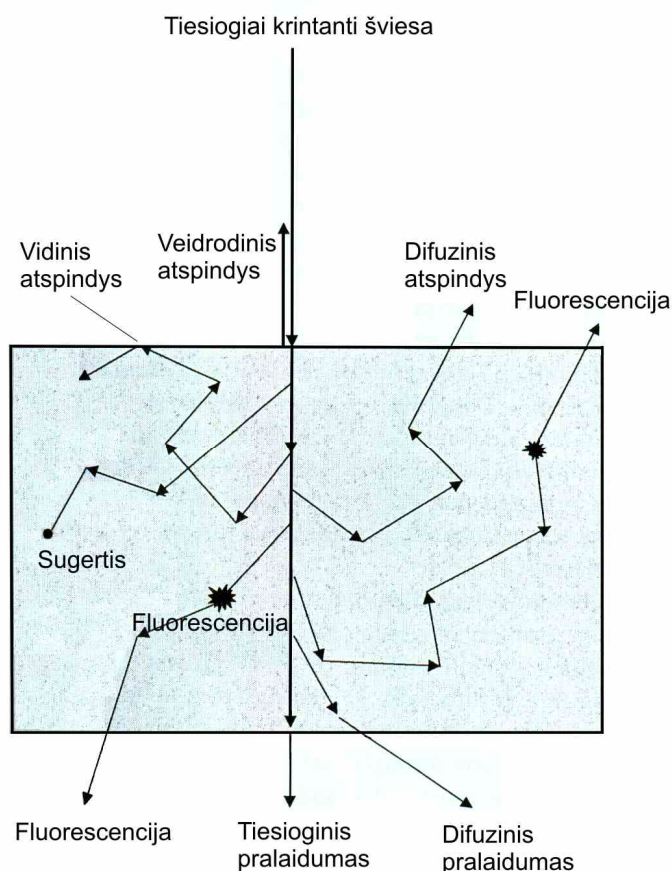


4.1 pav. Šviesos sąveikos su neskaidria aplinka sukelti vyksmai

Dėl audinio ir išorinės terpės lūžio rodiklių skirtumo susiformuoja atspindys ir lūžis ties terpių riba. Kai krintanti šviesa atspindi nuo audinio paviršiaus, įvyksta veidrodinis atspindys. Kai šviesa audinio viduje yra atspindima nuo paviršiaus

atgal į audinį, įvyksta vidinis atspindys. Šie reiškiniai pavaizduoti 4.2 paveiksle. Šviesą audinyje sugeria įvairūs ląstelių ir tarpląstelinės terpės komponentai. Tai gali būti

audiniuose esantys (endogeniniai) arba tikslingai į audinį įterpti (egzogeniniai) chromoforai, kurie sugertą šviesą gali išspinduliuoti fluorescencijos pavidalu (4.2 pav.).



4.2 pav. Schema, iliustruojanti šviesos sąveiką su audiniu ir šviesos judėjimą jame

Vyksmas šviesai sklindant neskaidria aplinka

Šviesos atspindys ir lūžis.

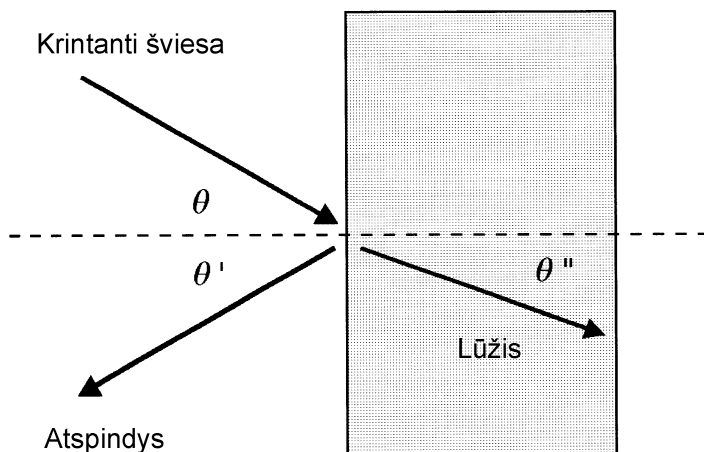
Šviesos atspindys suprantamas kaip elektromagnetinės spinduliuotės atsispindėjimas nuo paviršiaus, į kurį spinduliuotė krinta. Paprastai atspindintis paviršius esti skirtingus lūžio rodiklius turinčių dviejų medžiagų riba (pavyzdžiui, biologinis audinys ir oras). Pagal paprastą atspindžio dėsnį, krintantis ir atspindžio spinduliai ir atspindintis paviršius yra vienoje plokštumoje, atspindžio kampas θ' yra lygus kritimo

kampui θ (4.3 pav.):

$$\theta = \theta'. \quad (4.1)$$

Kai paviršius, į kurį krinta šviesa, yra glotnus, o nelygumai yra maži, palyginti su krintančios šviesos bangų ilgiu, vyksta *veidrodinis atspindys*.

Jei paviršiaus nelygumai yra palyginamo dydžio arba didesni nei krintančios šviesos bangos ilgis, vyksta *difuzinis atspindys*. Tada ne visi atspindimi spinduliai yra vienoje plokštumoje ir (4.1) lygybė nebegalioja. Difuzinis atspindys yra būdingas visiems



4.3 pav. Šviesos veidrodinio atspindžio ir lūžio geometrija

audiniams, nes jokie audiniai neturi tokio glotnaus paviršiaus, koks būdingas optiniams veidrodžiams.

Šviesos lūžis vyksta tada, kai atspindintis paviršius skiria dvi terpes, kurių lūžio rodikliai yra skirtingi. Lūžis vyksta dėl to, kad įvairiose terpėse

šviesos bangos sklidimo greitis yra skirtingas. Šviesa, praeidama ribą tarp skirtingų terpių, nukrypsta nuo pradinės sklidimo krypties. Matematiškai šį reiškinį aprašo Snelijaus dėsnis:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta''} = \frac{v}{v'}; \quad (4.2)$$

čia: θ'' yra lūžio kampas, v ir v' – šviesos greitis atitinkamai terpėse iki atspindinčio paviršiaus ir už jo. Kadangi terpių lūžio rodikliai yra:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (4.3)$$

$$n' = \frac{c}{v'},$$

kur c yra šviesos greitis vakuume, tai (4.2) formulė gali būti perrašyta taip:

$$n \sin \theta = n' \sin \theta''. \quad (4.4)$$

Kai $\sin \theta > n'/n$, (4.4) lygybė negalioja, t. y. šviesos lūžis nevyksta. Toks reiškinys vadinamas *visišku atspindžiu*. Jis pritaikytas kuriant lanksčias šviesos perdavimo sistemas – šviesolaidžius.

Paviršiaus *atspindžio geba* yra atspindėtos spinduliuotės matas. Jis išreiškiamas atspindėto ir krintančio elektrinio lauko amplitudžių santykiu. *Atspindžio koeficientas* yra atitinkamų intensyvumų santykis ir yra lygus atspindžio gebos kvadratui. Atspindžio

geba ir atspindžio koeficientas priklauso nuo šviesos kritimo kampo, šviesos poliarizacijos ir terpių lūžio rodiklių. Atspindžio gebos ir lūžio sąryšius nusako Frenelio dėsniai:

$$\frac{E_s'}{E_s} = -\frac{\sin(\theta - \theta'')}{\sin(\theta + \theta'')} \quad (4.5)$$

$$\frac{E_p'}{E_p} = \frac{\tan(\theta - \theta'')}{\tan(\theta + \theta'')} \quad (4.6)$$

$$\frac{E_s''}{E_s} = \frac{2 \sin \theta'' \cos \theta}{\sin(\theta + \theta'')} \quad (4.7)$$

$$\frac{E_p''}{E_p} = \frac{2 \sin \theta'' \cos \theta}{\sin(\theta + \theta'') \cos(\theta - \theta'')} \quad (4.8)$$

čia E , E' ir E'' yra atitinkamai krintančios, atspindėtos ir lūžusios šviesos elektrinio lauko vektorių amplitudės. Indeksai s ir p žymi dvi osciliacijos plokštumas: s – statmeną šviesos kritimo plokštumai (iš vokiško žodžio *senkrecht*) ir p – lygiagrečią (paralelią) šviesos kritimo plokštumai.

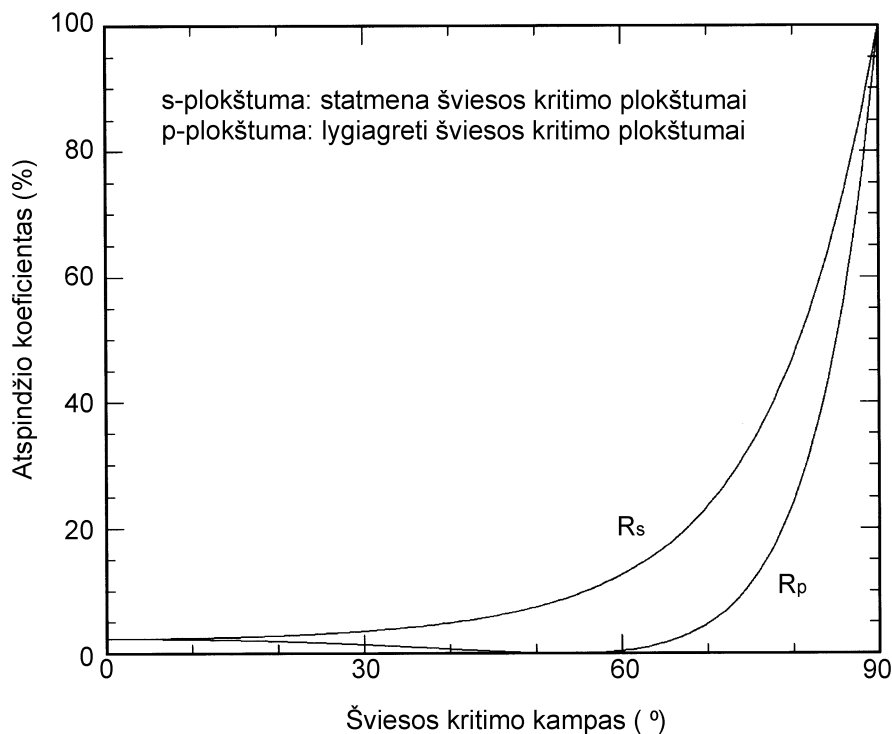
Tolesnė krintančios šviesos sąveika su medžiaga susijusi tik su lūžusio spindulio sklidimu. Būtų galima tikėtis, kad lūžusio ir atspindėto spindulių intensyvumų suma turėtų būti lygi krintančios šviesos intensyvumui. Tačiau taip nėra, nes intensyvumas yra galia, tenkanti ploto vienetui, o lūžusio spindulio skerspjūvis yra kitoks negu krintančio ir atspindėto spindulių. Tik šių spindulių bendra energija išlieka nepakitusi. Kiekvienos plokštumos atspindžio koeficientai yra:

$$R_s = \left(\frac{E_s'}{E_s} \right)^2 \quad (4.9)$$

$$R_p = \left(\frac{E_p'}{E_p} \right)^2 \quad (4.10)$$

Veidrodinį atspindį nuo drėgno paviršiaus vaizduojančios kreivės pateikiamos 4.4 paveiksle. Čia parodyta atspindžio koeficientų R_s ir R_p priklausomybė nuo šviesos kritimo kampo. Laikoma, kad lūžis vyksta ties dviejų terpių – oro ir vandens – riba. Oro lūžio rodiklis $n = 1$, o vandens – $n' = 1,33$.

Šviesos kritimo kampas, kai $R_p = 0$, yra vadinamas *Briusterio kampu*. Vandens atveju jis lygus 53° . Esant statmenam šviesos kritimui, kai kritimo kampas $\theta = 0$, abiejų



4.4 pav. Vandens ($n = 1,33$) atspindžio koeficientai

plokštumų atspindžio koeficientai apytikriai yra apie 2%. Ši vertė nėra tiesiogiai gaunama iš (4.5) ir (4.6) formulių, kadangi įstačius $\theta = \theta'' = 0$ gaunamas neapibrėžtas rezultatas. Tačiau rezultatą galima gauti atlikus tam tikrus pakeitimus. Kadangi artėjant prie statmeno šviesos kritimo kampai θ ir θ'' tampa labai maži, formulėje (4.6) tangentes galima pakeisti sinusais ir tada gaunama:

$$R_p \approx R_s = \frac{\sin^2(\theta - \theta'')}{\sin^2(\theta + \theta'')} = \left(\frac{\sin\theta \cos\theta'' - \cos\theta \sin\theta''}{\sin\theta \cos\theta'' + \cos\theta \sin\theta''} \right)^2. \quad (4.11)$$

Padalijus (4.11) formulės skaitiklį ir vardiklį iš $\sin\theta''$, pakeitus $\sin\theta/\sin\theta''$ į n' ir laikant, kad oro lūžio rodiklis $n = 1$, gaunama:

$$R_p \approx R_s = \left(\frac{n' \cos\theta'' - \cos\theta}{n' \cos\theta'' + \cos\theta} \right)^2 \cong \left(\frac{n' - 1}{n' + 1} \right)^2 \quad (4.12)$$

Apytikrė lygtis tampa tiksli statmeno šviesos kritimo atveju. Įstačius vandens lūžio rodiklį $n' = 1,33$, gaunama:

$$R_p \approx R_s \approx 2\%.$$

Kartais ir tokios, atrodytų, nedidelės atspindėtos šviesos dalies nereiktų ignoruoti. Ypač svarbu nuo atspindėtos šviesos saugoti akis dirbant su lazeriais.

Vandens lūžio rodikliai ir atspindžio koeficientai ties įvairiais bangų ilgiais pateikiami 4.1 lentelėje. Vandens sugerties spektre yra dvi intensyvios juostos ties 2,9 μm ir 6,0 μm .

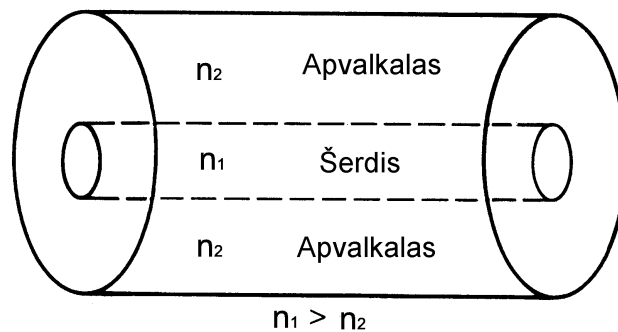
4.1 lentelė. Vandens lūžio rodikliai ir atspindžio koeficientai (pagal Hale ir Querry, 1973)

Bangos ilgis, λ (μm)	Lūžio rodiklis, n	Atspindžio koeficientas
0,2	1,396	0,027
0,3	1,349	0,022
0,4	1,339	0,021
0,5	1,335	0,021
0,6	1,332	0,020
0,7	1,331	0,020
0,8	1,329	0,020
0,9	1,328	0,020
1,0	1,327	0,020
1,6	1,317	0,019
2,0	1,306	0,018
2,6	1,242	0,012
2,7	1,188	0,007
2,8	1,142	0,004
2,9	1,201	0,008
3,0	1,371	0,024
3,1	1,467	0,036
3,2	1,478	0,037
3,3	1,450	0,034
3,4	1,420	0,030
3,5	1,400	0,028
4,0	1,351	0,022
5,0	1,325	0,020
6,0	1,265	0,014
7,0	1,317	0,019
8,0	1,291	0,016
9,0	1,262	0,013
10,0	1,218	0,010

Nors regimosios šviesos ruože keičiantis bangos ilgiui lūžio rodiklis kinta menkai, jį reikia turėti galvoje siekiant nuspėjamų rezultatų. Dėl šviesos sugerties ir sklaidos

įvairių rūšių audinių lūžio rodiklių indeksus išmatuoti yra labai sudėtinga, o atspindį nuo audinių galima įvertinti tik empiriškai.

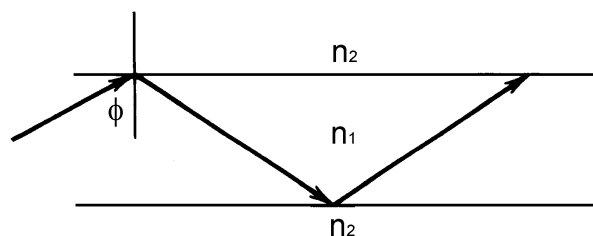
Šviesolaidžiai. Optiniai šviesolaidžiai yra ilgos, plonos ir lanksčios skaidulos, kurių skersmuo gali būti nuo kelių iki kelių šimtų mikronų. Šviesolaidis sudarytas iš dviejų sluoksnių: šerdies, kurios lūžio rodiklis n_1 , ir apvalkalo, kurio lūžio rodiklis n_2 (4.5 pav.). Šerdies lūžio rodiklis yra šiek tiek didesnis už apvalkalo lūžio rodiklį. Šviesa sklinda šviesolaidžio šerdimi dėl visiško vidinio atspindžio šerdies ir apvalkalo riboje (4.6 pav.). Kaskart atsispindėdama ir nepatirdama beveik jokių nuostolių, šviesa sklinda



4.5 pav. Šviesolaidis: šerdis ir apvalkalas

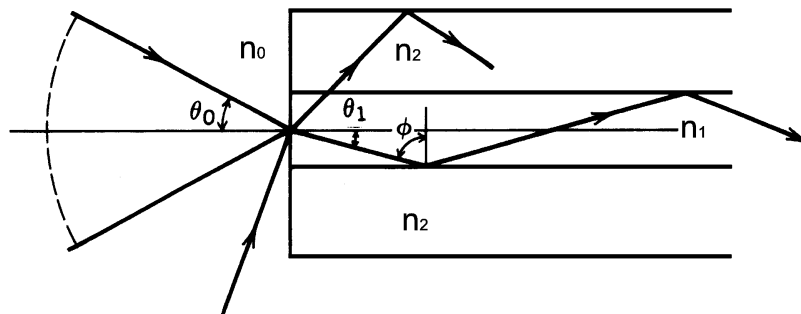
šerdimi tik tuo atveju, kai ji krinta į šviesolaidį kampu, ne didesniu už kritinį kampą.

Šviesolaidyje svarbios dvi ribos: šerdies ir apvalkalo bei apvalkalo ir išorės. Kaip šviesos spinduliai sukaupiami ir sklinda šviesolaidžiu, vaizduoja 4.7 paveikslas. Jei šviesos kritimo į šerdį kampas yra mažesnis už kritinį, šviesos pluoštas patiria visišką atspindį nuo šerdies ir apvalkalo ribos ir šviesa sklinda šviesolaidžiu. Šviesai krintant didesniu už kritinį kampą, be atspindėto pluošto, atsiranda ir lūžęs pluoštas, kuris sklinda šerdies ir apvalkalo riba. Šviesos nuostoliai apvalkale paprastai esti daug didesni negu šerdyje ir apvalkalu sklindantis šviesos pluoštas dėl sugerties sklinda tik nedideliu atstumu, o visa informacija yra perduodama tik su šviesa, sklindančia šerdimi.



4.6 pav. Visiškas vidinis atspindys

Vienu šviesolaidžiu negalima perduoti vaizdo. Šviesolaidis gali perduoti tiksliai



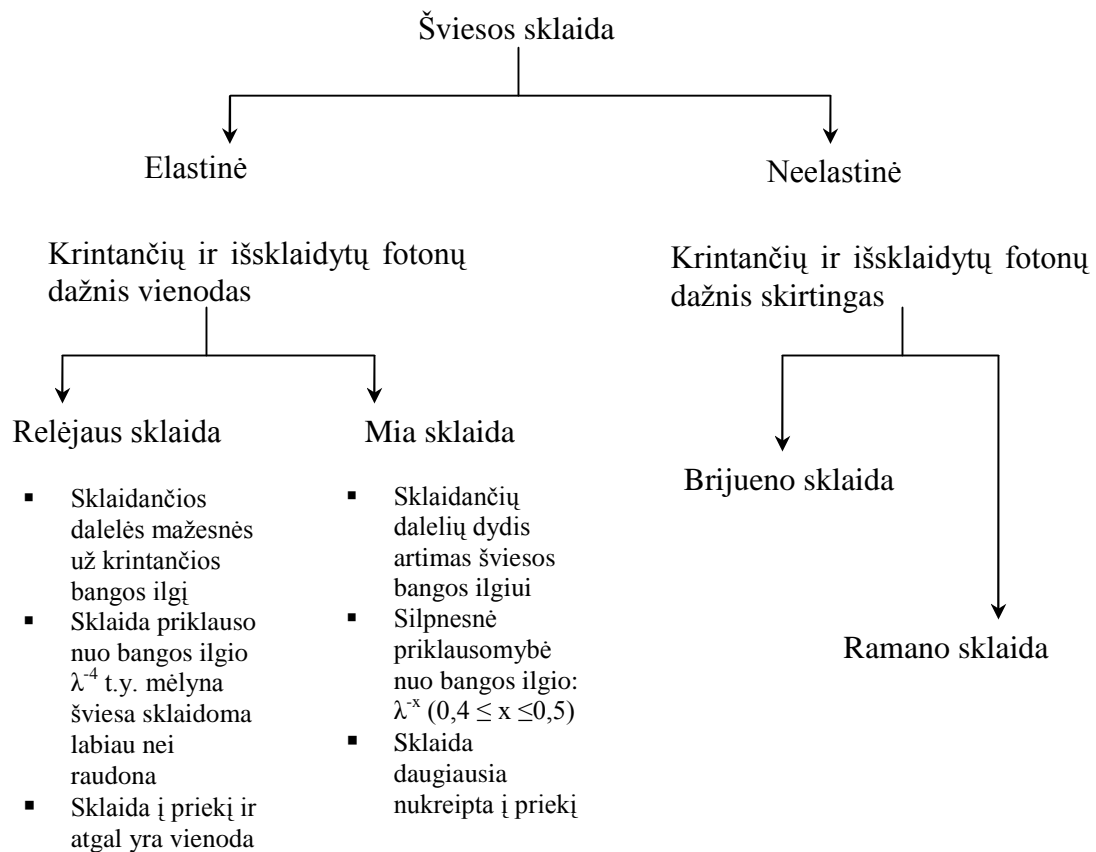
4.7 pav. Šviesos sklidimas šviesolaidžiu

informaciją tik apie tam tikro objekto vieną elementą. Viso objekto vaizdo perdavimui naudojamos šviesolaidžių pynės, sudarytos iš daugelio šviesolaidžių. Kiekvienas šviesolaidis pynėje perduoda informaciją apie atitinkamus objekto taškus. Šviesolaidinė pynė vaizdas suskaidomas į segmentus ir perduodamas į kitą pynės galą. Antrame pynės gale susidaro tas pats vaizdas, jeigu abiejuose pynės galuose šviesolaidžiai vienas kito atžvilgiu išsidėstę vienodai. Šviesolaidžių pranašumas tas, kad jie yra lankstūs ir mažo skersmens, todėl gali būti įstatomi į endoskopų ar kateterių sistemas ir taikomi vidaus organų apžiūrai.

Sklaida. Kai elektromagnetinė banga susiduria su kliūtimi (dalele), gali vykti sugertis arba sklaida. Sugerties atveju dalelė įgauna perteklinės energijos, kurią gali atiduoti šilumos pavidalu arba išspinduliuoti elektromagnetinę bangą, kurios dažnis bus mažesnis nei sugertos bangos (vyksta fluorescencija). Sklaidos atveju elektromagnetinė banga indukuoja dipolio momentą, kuris osciliuoja tokiu pat dažniu kaip ir banga. Tokio indukuoto dipolio virpesiai ir sukelia išsklaidytą bangą. Sklaidos vyksmai audiniuose yra sudėtingi ir įvairūs. Neelastinė sklaida biologiniuose audiniuose yra labai silpna ir čia nebus nagrinėjama.

Sklaidos priežastis – optiškai nevienalytė šviesos kelio aplinka. Tokia aplinka susidaro, kai terpėje yra daug dalelių, kuriuose šviesos lūžio rodiklis yra kitoks nei terpės. Šviesos banga, susidūrusi su tokia dalele, difraguoja ir keičia sklaidimo kryptį. Kai dalelės dydis apytikriai lygus $0,1-0,2 \lambda$, difragavusi šviesa maždaug tolygiai sklinda visomis kryptimis. Jeigu dalelės didesnės, šviesos difrakcija aprašoma sudėtingiau. Tada

difragavusios šviesos sklaidimas įvairiomis kryptimis priklauso nuo dalelių dydžio, formos



4.8 pav. Sklaidos vyksmai audiniuose

ir lūžio rodiklio. Šviesos sklaidos vyksmai apibendrinti 4.8 paveiksle.

Vykstant elastinei sklaidai elektromagnetinės bangos sukelti virpesiai yra tokio pat dažnio kaip ir juos sukėlusios bangos, t. y. krintančių ir išsklaidytų fotonų energija yra vienoda. Atskira elastinės sklaidos rūšis yra *Reilėjaus sklaida*, vykstanti tada, kai sklaidanti dalelė yra mažesnė už krintančios šviesos bangos ilgį. Reilėjaus sklaidos geometrinė schema pavaizduota 4.9 paveiksle. Plokščia elektromagnetinė banga krinta į sklaidančios terpės sluoksnelį, kurio storis L . Tam tikru laiko momentu krintančios bangos elektrinis laukas gali būti išreikštas kaip

$$E(z) = E_0 \exp(ikz),$$

čia E_0 yra krintančios šviesos elektrinio lauko amplitudė, k – banginis vektorius, z nurodo optinę ašį. Pirmu priartėjimu tariame, kad tam tikrą optinės ašies tašką P pasiekusi banga bus sudaryta iš pradinės bangos ir nedidelio sklaidos įnašo. Dėl sklaidos sumažėjęs intensyvumas gali būti išreiškiamas lygtimi:

$$I(z) = I_0 \exp(-\alpha_s z) \quad (4.13)$$

čia α yra sklaidos koeficientas. Intensyvumo pokytį sklindant bangai skaidria aplinka z kryptimi galima apskaičiuoti diferencijuojant (4.13) lygtį:

$$dI = -\alpha_s I dz.$$

Taigi plono sluoksnio išsklaidytas šviesos intensyvumas yra proporcingas sklaidos koeficientui α_s ir sluoksnio storiui L :

$$I_s \sim \alpha_s L. \quad (4.14)$$

Tarkime, kad viename sklaidančios terpės vienetu yra NL sklaidančių dalelių, tada dydis N nurodys sklaidančių dalelių tankį. Vieno dalelės išsklaidytos šviesos intensyvumas gali būti išreikštas santykiu:

$$I_1 \sim \frac{\alpha_s L}{NL} = \frac{\alpha_s}{N}.$$

Kadangi elektromagnetinės bangos elektrinės dedamosios vertė yra proporcinga intensyvumo kvadratui, tai vienos dalelės išsklaidytos bangos elektrinio lauko amplitudė yra:

$$E_1 \sim \sqrt{\frac{\alpha_s}{N}}.$$

Bendra išsklaidytų bangų elektrinio vektoriaus amplitudė išreiškiama taip:

$$E_s \sim NL \sqrt{\frac{\alpha_s}{N}} = L \sqrt{\alpha_s N}.$$

Sklandant plokščiai elektromagnetinei bangai sklaidančia aplinka, jos amplitudė taške z ant optinės ašies gaunama prie krintančios plokščiosios bangos amplitudės pridedant visų išsklaidytų sferinių bangų amplitudes:

$$E(z) = E_0 \left(e^{ikz} + L \sqrt{\alpha_s N} \int_0^\infty \frac{e^{ikR}}{R} 2\pi r dr \right). \quad (4.15)$$

Ryšys tarp vektorių r ir z pagal Pitagoro teoremą išreiškiamas taip:

$$R^2 = z^2 + r^2.$$

Galima priimti, kad kam tikram

$$r dr = R dR,$$

tada (4.15) lygtis supaprastėja:

$$E(z) = E_0 \left(e^{ikz} + L \sqrt{\alpha_s N} 2\pi \int_z^\infty e^{ikR} dR \right). \quad (4.16)$$

Kadangi bangų seka yra baigtinio ilgio, sklaidą kai $R \rightarrow \infty$ galima atmesti. Tada matematiškai pertvarkyta (4.16) formulė tampa

$$E(z) = E_0 \left(e^{ikz} - L \sqrt{\alpha_s N} \frac{2\pi}{ik} e^{ikz} \right),$$

o įstačius bangos ilgio išraišką $\lambda = 2\pi/k$,

$$E(z) = E_0 e^{ikz} \left(1 + i\lambda L \sqrt{\alpha_s N} \right). \quad (4.17)$$

Pagal priimtą prielaidą sklaidos įnašas, t. y. antrasis narys skliaustuose, yra gana mažas palyginti su pirmuoju. Taigi jie gali būti pirmais dviem išplėtimo nariais:

$$E(z) = E_0 \exp \left[i \left(kz + \lambda L \sqrt{\alpha_s N} \right) \right].$$

Taigi krintančios bangos fazė dėl sklaidos pakinta dydžiu $\lambda L \sqrt{\alpha_s N}$. Ši vertė turi būti lygi gerai žinomai fazės vėlinimo, įvykstančio, kai šviesa patenka į terpę, kurios lūžio rodiklis n, išraiškai:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n - 1)L.$$

Taigi

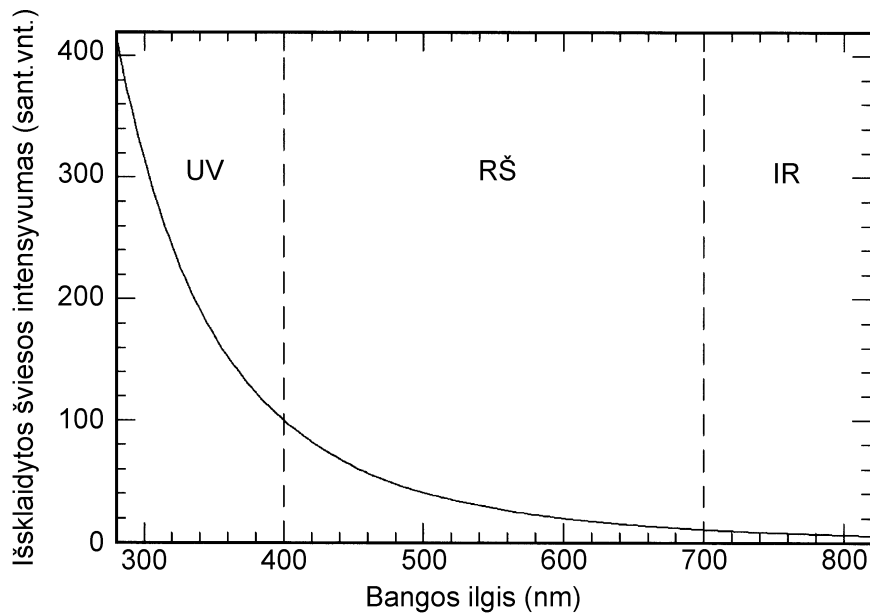
$$\lambda L \sqrt{\alpha_s N} = \frac{2\pi}{\lambda} (n - 1)L,$$

$$n - 1 = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sqrt{\alpha_s N}. \quad (4.18)$$

Iš (4.14) ir (4.18), laikant, kad lūžio rodiklis nepriklauso nuo bangos ilgio, gaunama *Reilėjaus dėsnio* išraiška – išsklaidytos šviesos intensyvumas atvirkščiai proporcingas bangos ilgiui ketvirtuoju laipsniu:

$$I_s \sim \frac{1}{\lambda^4}. \quad (4.19)$$

Pasitelkiant sklaidos kampą θ , gaunama:



4.10 pav. Įvairių bangos ilgių šviesos sklaida (Relėjaus dėsnio iliustracija)

$$I_s(\theta) \sim \frac{1 + \cos^2(\theta)}{\lambda^4} \quad (4.20)$$

Reilėjaus sklaidos dėsnį iliustruoja 4.10 paveikslas. Regimosios šviesos ruože trumpesnės bangos (mėlynos) sklaidomos labiau nei ilgosios (raudonos).

Kai sklaidanti dalelė yra didesnė nei krintančios bangos matmenys, vyksta Mia sklaida. Mia sklaida nuo Reilėjaus skiriasi dviem pagrindiniais aspektais: silpnesne priklausomybe nuo bangos ilgio ($\sim \lambda^{-x}$, kai $0,4 \leq x \leq 0,5$) ir Mia sklaidos atveju dalelės

dažniausiai yra sklaidomos nedideliais kampais, t. y. nedaug nukrypsta nuo pradinės krypties. Pagal Relėjaus dėsnį, išsklaidytos šviesos intensyvumas proporcingas $1 + \cos^2 \theta$, taigi spinduliuotės, išsklaidytos į priekį ir atgal, intensyvumai yra vienodi. Dalelių sklaida Reilėjaus ir Mia atvejais pavaizduota 4.11 paveiksle.

Biologiniuose audiniuose sklaida vyksta dviejų skirtingo optinio tankio terpių sandūroje – skirtingų ląstelių sluoksnių, citozolio ir ląstelės membranos, citoplazmos ir ląstelės organelių. Sklaidą audinyje apibūdinti yra gana sudėtinga, nes ji priklauso ir nuo



4.11 pav. Išsklaidytų dalelių kryptys Reilėjaus bei Mia sklaidos atvejais

audinio morfologijos, ir nuo ląstelių formos, ir nuo jose esančių organelių. Pastebėta, kad daugelyje biologinių audinių šviesa sklaidoma nedideliais kampais, taigi atrodytų, kad audiniuose vyrauja Mia sklaida, tačiau nustatyta sklaidos kampo priklausomybė nuo bangos ilgio yra kur kas artimesnė Reilėjaus sklaidai. Dažniausiai į audinį patekusi šviesa yra sklaidoma visų minėtų sklaidos elementų, kurių dydžiai labai įvairūs, todėl audiniuose vyksta tiek Reilėjaus, tiek Mia sklaida.

Siekiant aprašyti sklaidą audiniuose, pasitelkiama fazinė funkcija $p(\theta)$, kuri nusako tikimybę fotonui būti išsklaidytam kampu θ . Dažniausiai naudojama Henėjaus–Grynšteino fazinė funkcija:

$$p(\theta) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}. \quad (4.21)$$

Jei $p(\theta)$ nepriklauso nuo θ , vyksta izotropinė sklaida, jei priklauso – anizotropinė. Sklaidančios terpės anizotropija yra apibūdinama anizotropijos koeficientu g , kuris apytiksliai lygus sklaidos kampo θ kosinusui. Kai $g = 1$ vyksta sklaida į priekį (spinduliuotės sklaidimo kryptimi), kai $g = -1$ sklaida vyksta atgal (kryptimi, priešinga spinduliuotės sklaidimui), o kai $g = 0$ sklaida gali vykti bet kokiais kampais (izotropinė

sklaida). Audiniuose g kinta nuo 0,7 iki 0,99, ir tai reiškia, kad sklaida dažniausiai vyksta $8^\circ - 45^\circ$ kampais.

Šviesos sugertis. Audiniuose taip pat vyksta ir konkuruojantis procesas – sugertis, todėl reikia atsižvelgti ir į šį spinduliuotės silpimo procesą.

Tiksliai aprašyti fotono kelią dėl sudėtingo sklaidančiųjų bei sugeriančiųjų elementų erdvinio išsidėstymo, taip pat ir vykstančios įvairių tipų sklaidos yra sudėtinga. Sprendimui palengvinti pasitelkiamas dydis *optinis albedo* a , kuris apibrėžiamas taip:

$$a = \frac{\alpha_{sk}}{\alpha_{sk} + \alpha_{sg}}; \quad (4.22)$$

čia α_{sk} atitinka sklaidos koeficientą, o α_{sg} – sugerties koeficientą. Kai $a = 0$ šviesos silpimas vyksta tik dėl sugerties, o kai $a = 1$ – dėl sklaidos.

Į neskaidrią terpę krintančios elektromagnetinės bangos intensyvumas silpnėja dėl to, kad dalį šviesos sugeria terpė. Šviesos sugertis apibrėžiama sugertos ir krintančios šviesos intensyvumų santykiu. Sugertis vyksta dėl to, kad dalis šviesos energijos virsta šiluma arba sugeriančios terpės molekulių vibracijomis. Visiškai skaidri terpė šviesos visai nesugeria, t. y. visa į terpę krintančios spinduliuotės energija lygi iš terpės išeinančios spinduliuotės energijai. Iš biologinių audinių tik akies ragena ir lęšis yra skaidrūs regimajai šviesai.

Terpės geba sugerti elektromagnetinę spinduliuotę priklauso nuo įvairių veiksnių – nuo terpę sudarančių atomų ir molekulių elektroninės struktūros, nuo spinduliuotės bangų ilgio, sugeriančio sluoksnio storio, nuo šviesą sugeriančių medžiagų (endogeninių chromoforų) koncentracijos.

Jei žadinimui naudojama šviesa, kurią gerai sugeria terpės endogeniniai chromoforai, šviesos intensyvumo I eksponentinį silpnėjimą nusako Lamberto-Bero dėsnis (4.12 pav.), t. y. sugertos elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumas eksponentiškai priklauso nuo sugeriančių dalelių koncentracijos ir nuo šviesą sugeriančio sluoksnio storio:

$$I(\nu) = I_0 e^{-k(\nu)bc} = I_0(\nu) 10^{-\varepsilon(\nu)bc}. \quad (4.23)$$

Koeficientas $\varepsilon(\nu)$ priklauso nuo medžiagos prigimties ir krintančios šviesos bangos ilgio (dažnio); jis vadinamas moliniu ekstinkcijos koeficientu ir yra išreiškiamas

l/mol cm. Dydis b (reiškiamas centimetrais) yra optinio kelio ilgis – atstumas, kurį sugeriančioje terpėje nueina šviesa.

Formulę (4.23) pertvarkius į dešimtainį logaritmą ir pažymėjus santykį

$$\lg I_0(\nu)/I(\nu) = A \text{ (optinis tankis),}$$

gaunama paprastesnė išraiška:

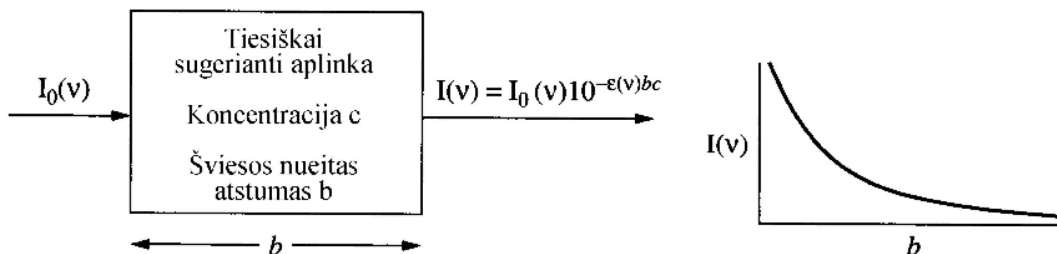
$$A = \varepsilon(\nu) c b. \quad (4.24)$$

Tirpalo optinis tankis tiesiogiai proporcingas šviesą sugeriančių dalelių koncentracijai ir sugeriančio sluoksnio storiui. Tirpalo molinio ekstinkcijos koeficiento arba optinio tankio priklausomybė nuo bangos ilgio (λ) vadinama sugerties spektru.

Biologiniuose audiniuose šviesą sugeria vanduo ir makromolekulės, daugiausia baltymai ir įvairūs pigmentai. Vandens molekulės sugeria IR ruožo šviesą, o baltymai ir pigmentai – UV ir regimąją šviesą. Baltymų sugerties maksimumas yra maždaug ties 280 nm (Boulnois, 1986). Odos pigmento melanino sugertis didėja mažėjant bangos ilgiui (4.13 pav.)

Šviesai sklindant audiniu intensyvumas eksponentiškai silpnėja ne tik dėl sugerties, bet ir dėl sklaidos. Todėl bendras šviesos intensyvumo sumažėjimas išreiškiamas taip:

$$I(z) = I_0 e^{-(\alpha + \alpha_s)z}. \quad (4.25)$$

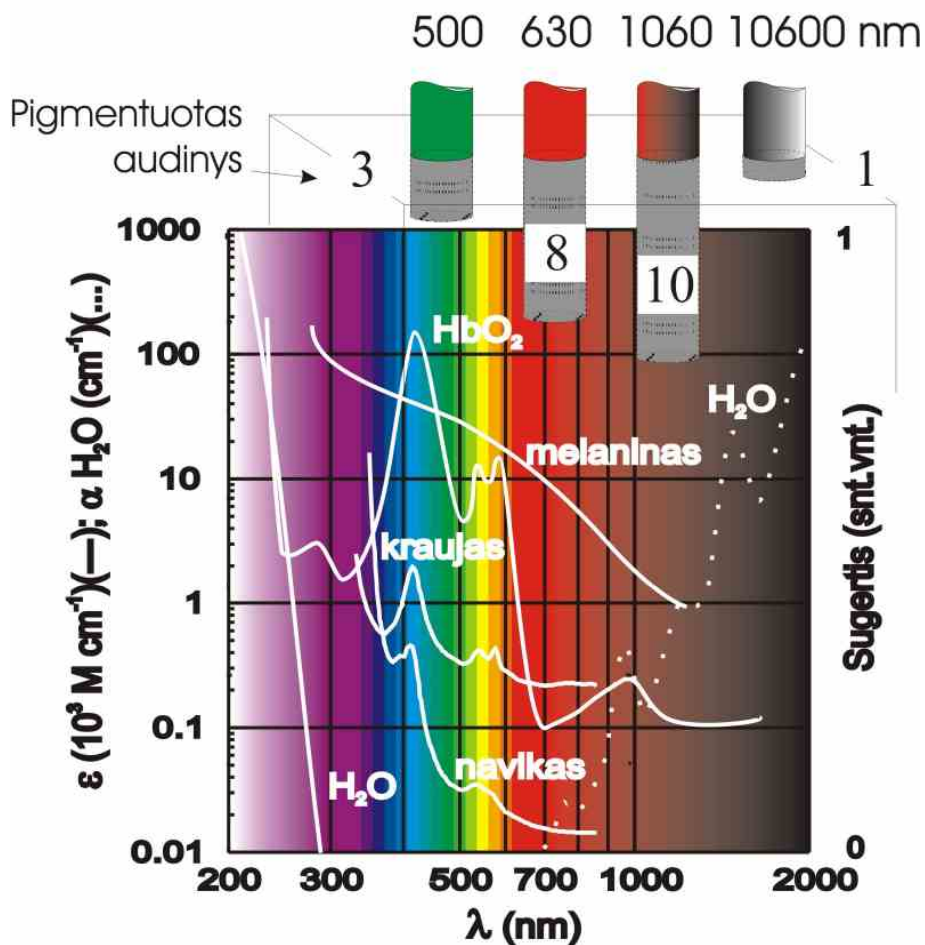


4.12 pav. Tiesinė šviesos sugertis

$I(z)$ yra šviesos intensyvumas audinio gylyje z ; I_0 yra į audinį krintančios šviesos stipris; α ir α_s yra atitinkamai sugerties ir sklaidos koeficientai. Taigi dydis $\alpha + \alpha_s$ rodo visą šviesos praradimą audinyje. Kitas dydis, naudojamas audinio optiniam pralaidumui apibūdinti, yra optinės skvarbos gylis, δ , kuris nusako atstumą z audinyje, kuriame šviesos intensyvumas yra e kartų mažesnis negu krintančios šviesos intensyvumas. Dydis

δ nurodo, kaip giliai šviesa gali įsiskverbti į audinį. Pradinis šviesos intensyvumas I_0 sumažėja maždaug 90% šviesai įsiskverbus į audinį 2δ gyliu. Kuo didesnė audinio vaskuliarizacija (daugiau kraujo audinyje), tuo δ mažesnis, nes kraujo komponentas hemoglobinas gerai sugeria šviesą. Taip pat δ priklauso nuo šviesos bangos ilgio ir yra daug mažesnis mėlynai šviesai (trumpesnių bangų) negu raudonai. Kadangi hemoglobino sugertis smarkiai susilpnėja, kai bangos ilgis didesnis nei 550 nm (4.13 pav.), šviesos skvarbumo į audinius gylis padvigubėja didėjant bangos ilgiui nuo 550 nm iki 630 nm. Ilgesnės šviesos bangos (iki 700 nm) įsiskverbia į audinius dar dukart giliau. Silpniausiai audinių komponentų sugeriama šviesos sritis yra nuo 650 nm iki 1300 nm, ji vadinama “audinių optinio skaidrumo langu” arba “terapiniu langu” (4.13 pav.).

Šviesos prasiskverbimo gylis, mm



4.13 pav. Vandens, hemoglobino (HbO₂), kraujo, melanino ir navikinio audinio sugerties, sklaidos ir atspindžio spektrai. Įvairaus bangos ilgio šviesos įsiskverbimo į pigmentinį audinį gylis

