



FOTOBIO MODULIACIJA

ŠVIESOS TERAPIJA SVEIKATAI IR REGENERACIAI

Fotobiomoduliacija: Šviesos Terapija Sveikatai Ir Regeneracijai

Iliustracijos: Sukurtos naudojant CHATGPT
dirbtinį intelektą

Vertimas:

1. O. Draper D., S. Jutte L. & L. Knight K. (2021). Therapeutic Modalities: The Art and Science Third Edition. *Wolters Kluwer Health*: United States.

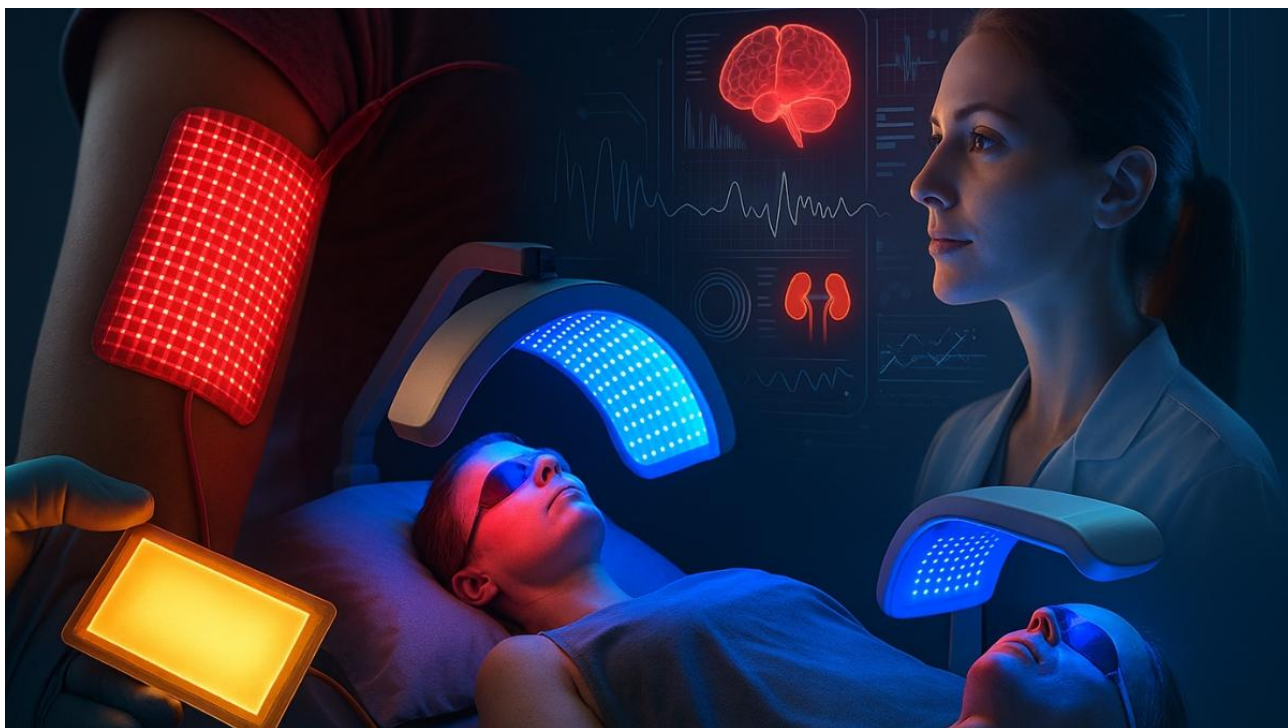
Leidėjas: Savileidybos leidinys

Autoriai: Darius Četyrko ir Renata Četyrko

2025. Visos teisės saugomos Masažo studija „Humanus“, MB

Turinys

1. **Įvadas į fotobiomoduliaciją (PBM)** – sąvoka, veikimo principas, terapinė nauda, atradimo istorija, terminologija (p. 1–3)
2. **Šviesos prigimtis ir fotono energija** – banga ir dalelė, energijos priklausomybė nuo bangos ilgio (p. 3–4)
3. **Šviesos charakteristikos** – divergentinė, kolimuota, monochromatinė, koherentinė ir nekoherentinė šviesa (p. 4–5)
4. **Šviesos šaltinių tipai** – lazeriai, jų savybės, sudėtinės dalys, puslaidininkiniai lazeriai (p. 5–7)
5. **LED ir OLED technologijos** – savybės, pritaikymas, skirtumai nuo lazerių (p. 7–8)
6. **Lazeriai ir nekoherentiniai šaltiniai** – veiksmingumo palyginimas, esminiai gydymo parametrų veiksniai (p. 8)
7. **PBM gydymo parametrai** – bangos ilgis, darbo ciklas, spindulio dydis, galia, apšvita, laikas, srautas, energija, taikymo technikos (p. 9–11)
8. **Bangos ilgių diapazonai ir jų veikimas audiniuose** (p. 11–12)
9. **Darbo ciklas, spindulio dydis, galia ir dozės skaičiavimas** (p. 12–13)
10. **PBM saugumas** – apsaugos priemonės, lazerių klasės (p. 13–15)
11. **PBM reglamentavimas JAV (FDA)** – leidimai, indikacijos, kontraindikacijos, naudojimas ne pagal etiketę (p. 15–16)
12. **Lazerio klasės ir saugumo taisyklės** (p. 16–17)
13. **PBM terapijos konfigūracijos** – zondai, klasteriai, panelės, pleistrai, lovos, jų privalumai ir trūkumai (p. 17–19)
14. **Audinių optinės savybės** – šviesos lūžis, sklaida, prasiskverbimo gylis, įtaka melanino ir nutukimo (p. 19–20)
15. **Fotobiomoduliacijos poveikis ląstelėms** – mitochondrijų aktyvinimas, ATP gamyba, azoto oksidas, ROS, genų ekspresija (p. 20–21)
16. **Klinikinis PBM pritaikymas** – skausmo mažinimas, žaizdų gijimas, odos ligos, neurologija, raumenų ir sporto medicina (p. 21–22)
17. **PBM ateitis** – technologijų plėtra, individualizuota terapija, integracija su kitais metodais, dirbtinio intelekto panaudojimas (p. 22–23)
18. **Išvados** – saugumas, veikimo mechanizmai, klinikinė nauda, perspektyvos (p. 23)



Fotobiomoduliacija: Šviesos Terapija Sveikatai Ir Regeneracijai

Fotobiomoduliacija (PBM) – tai šviesos terapijos metodas, kai naudojami nejonizuojantys šviesos šaltiniai (lazeriai, LED, plačiajuostė šviesa) matomoje ir infraraudonojoje spektro dalyse (O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Pagrindinis veikimo principas – šviesos sąveika su endogeniniais chromoforais, dėl kurios sukeliamas fotofizinis ir fotocheminis poveikis įvairiuose biologiniuose lygmenyse (O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



Terapinė nauda:

- skausmo ir uždegimo mažinimas,
- imuninės sistemos reguliacija,
- žaizdų gijimo ir audinių regeneracijos skatinimas,
- galimas poveikis neurologinėms būklėms (pvz., insultui, smegenų traumoms),
- pagalba raumenų atsistatymui.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

PBM atradėjas – dr. **Endre Mesteris** (1965 m.). Jis pastebėjo, kad rubino lazeriu (694 nm) apšvitintos pelės greičiau ataugino plaukus, o vėliau – kad šviesa pagreitina žaizdų gijimą. Iš pradžių metodas taikytas veterinarijoje, o 1990-aisiais JAV Maisto ir vaistų administracija (FDA) patvirtino pirmuosius PBM prietaisus žmonėms (O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

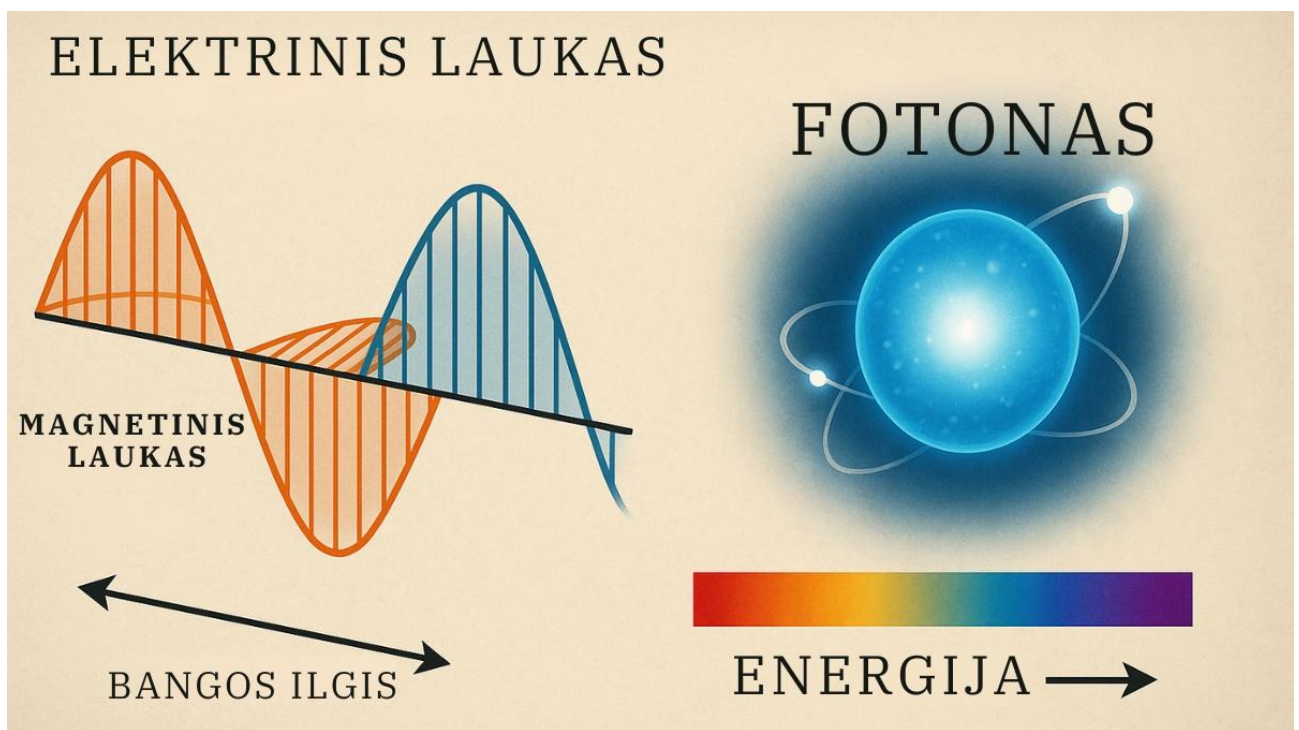
Terminologija

PBM istorijoje vartota daug skirtingų pavadinimų, kurie gali klaidinti:

- fototerapija,
- „šaltasis“ ar „minkštasis“ lazeris,
- LLLT (žemo lygio lazerio terapija),
- LPLT, LPLI, LIL ir kt.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Šiuo metu ekspertai rekomenduoja naudoti terminus **PBM** ir **PBMT** (fotobiomoduliacijos terapija) (O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



Šviesos prigimtis

Šviesa pasižymi dvejopa prigimtimi – ji yra ir **bang**a, ir **dalelė**.

- **Kaip banga:** šviesa sklinda kaip svyruojantys elektriniai ir magnetiniai laukai. Tai matome, kai ji keliauja iš vieno taško į kitą.
- **Kaip dalelė:** kai šviesa sugerama arba skleidžiama atomų, ji elgiasi kaip **fotonas** – elementarus energijos paketas.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

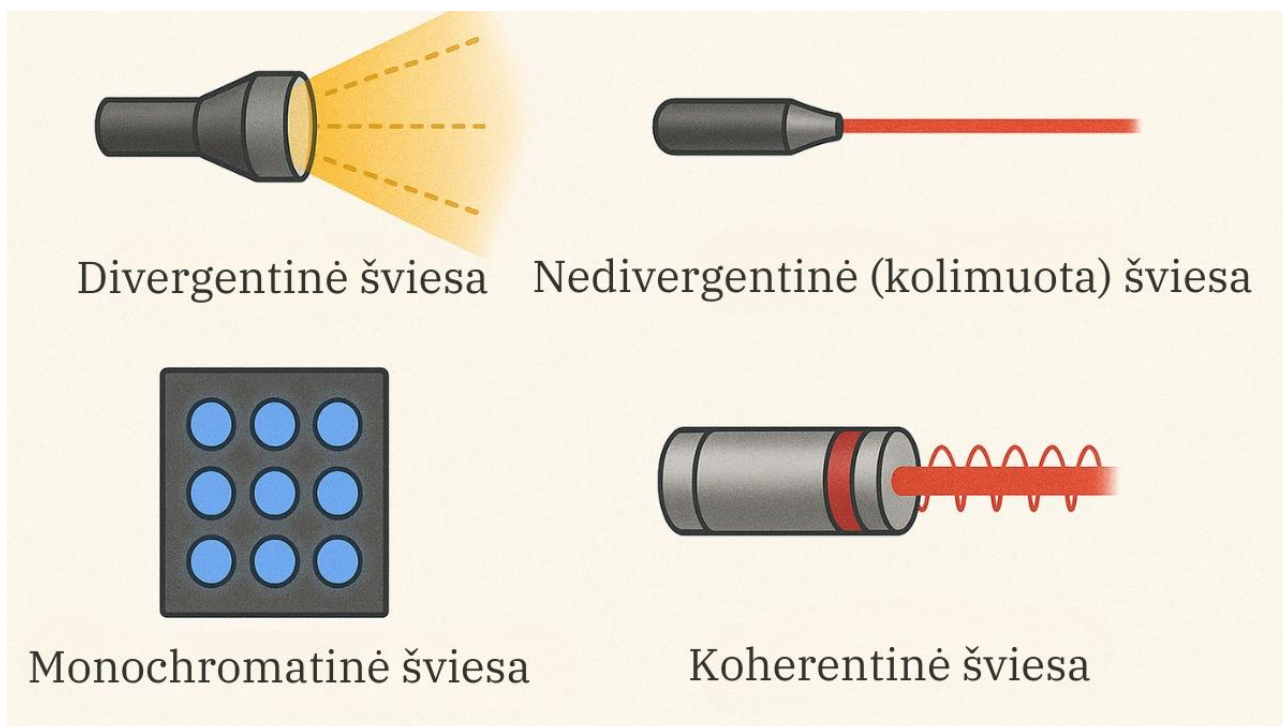
Fotono energija

Fotono energijos kiekis priklauso nuo bangos ilgio:

- kuo **trumpesnis bangos ilgis**, tuo **didesnė energija**;
- pavyzdžiui, 450 nm mėlyna šviesa yra žymiai energingesnė už 905 nm infraraudonąją.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Šis principas svarbus PBM terapijoje, nes tinkamas bangos ilgis parenkamas pagal **norimą efektą** ir **taikinio (audinio) vietą** (O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



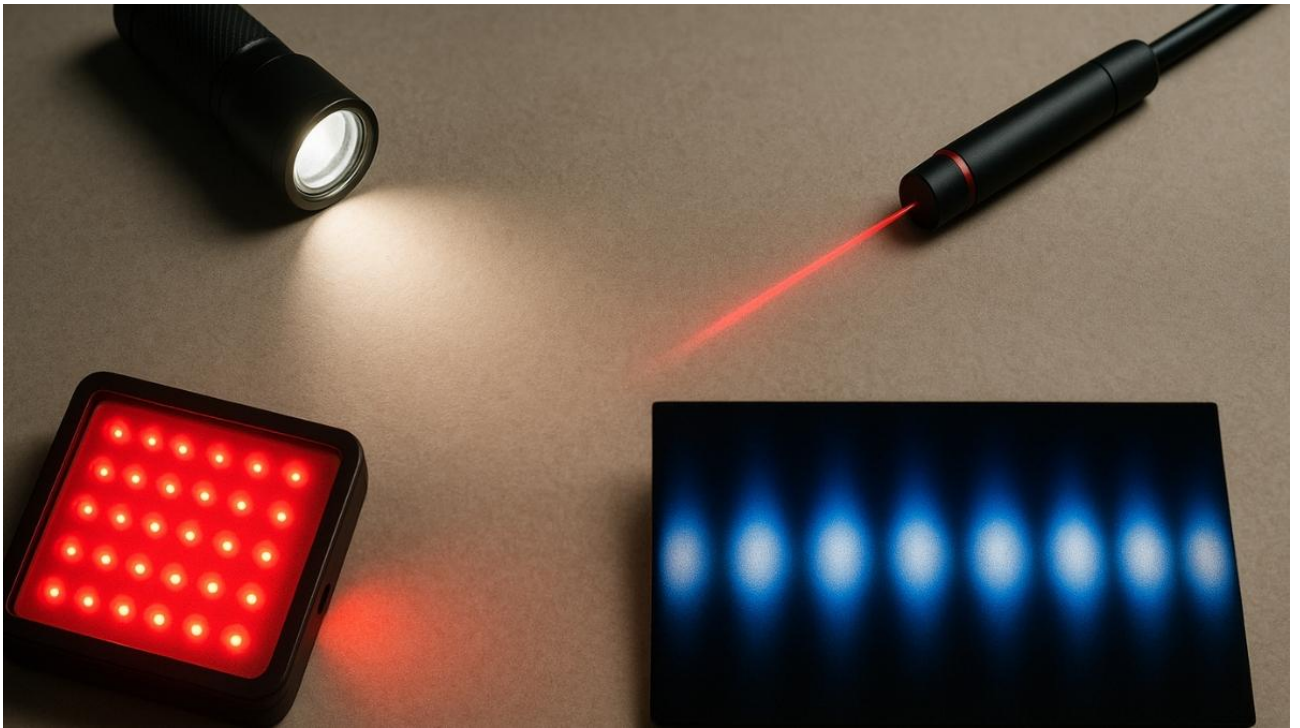
Šviesos charakteristikos

Fotobiomoduliacijoje (PBM) naudojami įvairūs šviesos šaltiniai – lazeriai, LED, superliuminescenciniai diodai (SLD), organiniai LED (OLED). Jų savybės lemia poveikį audiniams (O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Pagrindinės savybės:

- **Divergentinė šviesa** – šviesa, kuri išsisklaido.
Pvz., žibintuvėlio spindulys arba lazerinio diodo/LED šaltinis.
- **Nedivergentinė (kolimuota) šviesa** – spinduliai keliauja lygiagrečiai, neišsisklaido.
Pvz., lazerinio žymeklio spindulys.
- **Monochromatinė šviesa** – vieno bangos ilgio arba dažnio. Jei ji matomoje spektro dalyje, atrodo kaip viena spalva (pvz., raudona, mėlyna).
PBM dažnai apibūdinama pagal spalvą, nors ne visi terapijoje naudojami bangos ilgiai matomi plika akimi (pvz., infraraudonieji).
- **Koherentinė šviesa** – spinduliai yra fazėje, logiškai sutvarkyti, turintys tą patį bangos ilgį ir fiksuotą santykį. Tokia yra lazerio šviesa.
- **Nekoherentinė šviesa** – chaotiška, neturi tvarkingo fazių santykio.
Tokias savybes turi LED ir kiti nekoherentiniai šaltiniai.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



Šviesos šaltinių tipai

Lazeriai

- Lazeris (angl. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) pirmą kartą sukurtas 1960 m.
- Tai prietaisas, transformuojantis elektrinę ar kitą energiją į labai specifinę šviesą (matomą arba infraraudonąją).
- Skiriamieji bruožai:
 - **Koherencija** – spinduliai vienodo bangos ilgio ir fazėje.
 - **Monochromatiškumas** – vienos spalvos arba vieno bangos ilgio.
 - **Kolimacija** – galimybė išlikti susitelkusiam spinduliui be išsisklaidymo.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



Pagrindinės lazerio sudedamosios dalys:

1. **Rezonuojanti ertmė**, kurioje vyksta spinduliuotės stiprinimas.
2. **Lazerinė terpė** – dujos, skystis, kristalas arba puslaidininkis (dažniausiai puslaidininkis PBM prietaisuose).
3. **Išorinis energijos šaltinis** (pvz., elektra).
4. **Veidrodžių sistema**, viena pusiau pralaidi, kad dalis spindulio išeitų į audinį.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Puslaidininkiniai diodiniai lazeriai – dažniausiai naudojami PBM terapijoje. Jie gamina fotonus tam tikru bangos ilgiu, o dėl atspindžių ertmėje atsiranda koherencija (O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



LED ir OLED

- **LED (šviesos diodas)** – puslaidininkinis prietaisas, skleidžiantis šviesą nuo ultravioletinės iki infraraudonosios srities.
 - Panašus į lazerį, bet **neturi koherencijos** (chaotiška šviesa).
 - Šiuolaikiniai LED beveik prilygsta lazeriams pagal galią.
 - LED galima montuoti ant lanksčių paviršių – sukurti „šviesos pleistrus“, klijuojamus ant odos.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

- **OLED (organiniai šviesos diodai)** – lanksčios organinės plėvelės, kurios gali skleisti įvairių spalvų šviesą (be kadmio).
 - Naudojami kuriant naujus PBM prietaisus – patogesnius, nešiojamus, lankstus.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



Lazeriai ir nekoherentiniai šaltiniai

- Anksčiau manyta, kad tik lazeriai veiksmingi (dėl koherencijos).
- Dabar įrodyta, kad **LED ir OLED taip pat veiksmingi** – šviesai patekus į audinius, koherencija vis tiek prarandama dėl sklaidos.
- Esminis dalykas – ne šaltinio tipas, o **gydymo parametrai** (bangos ilgis, galia, laikas ir t. t.).

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



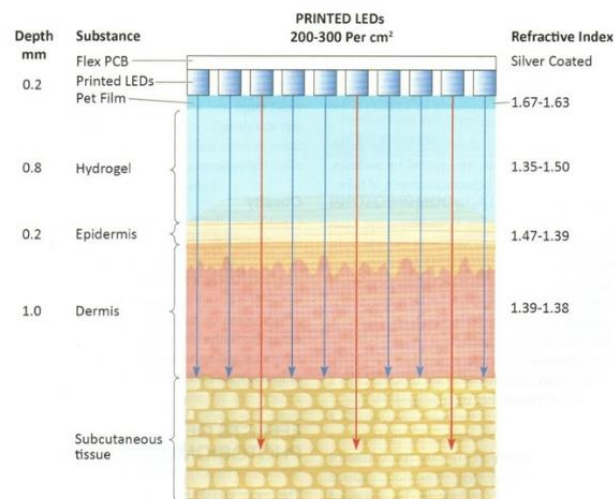
Fotobiomoduliacijos gydymo parametrai

Kaip ir bet kuri terapija, PBM veiksmingumas priklauso nuo tinkamai parinktų parametru. Netinkama dozė ar neteisingi nustatymai gali sumažinti arba panaikinti terapinį efektą (O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

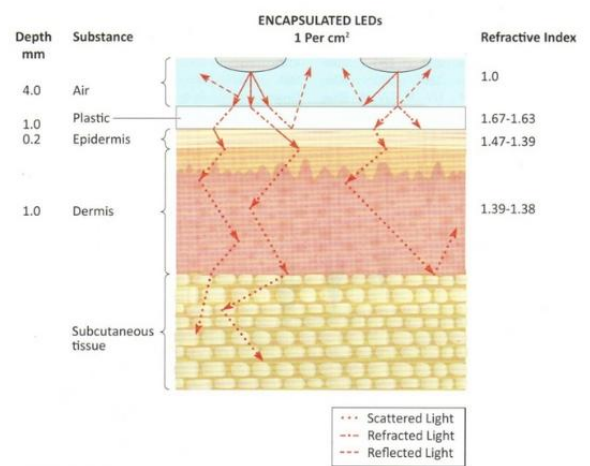
Pagrindiniai parametrai:

- **Bangos ilgis (nm)** – lemia šviesos spalvą ir prasiskverbimo gylį.
- **Darbo ciklas (%) ir dažnis (Hz)** – ar šviesa yra nuolatinė, ar impulsinė.
- **Spindulio dydis (cm²)** – kokio ploto audinį dengia šviesa.
- **Galia (W) ir apšvita (W/cm²)** – energijos kiekis, patenkantis į audinį.
- **Gydymo laikas (s)** – procedūros trukmė.
- **Srautas (J/cm²)** – fotonų dozė, tenkanti konkrečiam audinio plotui.
- **Bendra energija (J)** – visa perduota energija.
- **Taikymo technika** – kaip šviesa skleidžiama: vienoje vietoje, keliuose taškuose (tinklelio metodas) ar judant (skenavimas).
- **Gydymo grafikas** – procedūrų dažnis ir skaičius.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



Šviesos charakteristikos, jai sąveikaujant su įvairiais objektais ir audiniais lygiagrečiu, nedivergentiniu šviesos plotu.



Šviesos charakteristikos jai sąveikaujant su įvairiais objektais ir audiniais naudojant divergentinį diodą.

(Šaltinis: Draper, O. D., Jutte, L. S. & Knight, K. L. (2021) *Therapeutic Modalities The Art and Science Third Edition*, p. 425)

Bangos ilgis

- Skirtingi bangos ilgiai skirtingai veikia audinius.
- Pvz., mėlyna (450 nm) turi daug energijos, bet prasiskverbia mažai; raudona (600–650 nm) ir infraraudonoji (650–1000 nm) pasiekia gilesnius sluoksnius.
- Visada svarbu nurodyti konkretų bangos ilgį, o ne tik spalvą.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Bangos ilgių diapazonai:

- 150–380 nm – ultravioletinė,
- 390–470 nm – violetinė iki giliai mėlynos,
- 475–545 nm – mėlyna iki žalios,
- 545–600 nm – geltona iki oranžinės,
- 600–650 nm – raudona,
- 650–1000 nm – tamsiai raudona iki infraraudonos,
- 1000–1350 nm – artima ir vidutinė infraraudona,
- 1350–12 000 nm – infraraudona.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Darbo ciklas ir dažnis

- **Nuolatinė šviesa** – energija sklinda 100 % laiko.
- **Impulsinė šviesa** – energija įsijungia/išsijungia tam tikru ritmu.
- Impulsinė šviesa dažnai prasiskverbia giliau ir gali būti efektyvesnė už nuolatinę.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Spindulio dydis

- Mažas spindulio plotas → didesnė apšvita.
- Svarbu atsižvelgti, kad šviesa, patekus į audinį, išsisklaido.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Galia ir apšvita

- Apskaičiuojama pagal formulę: **galia (W) / spindulio dydis (cm²)**.
- Pvz., 0,02 W ir 0,5 cm² → 0,04 W/cm².

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Gydymo laikas

- Nustatomas pagal procedūros metodą: vienam taškui arba visai sričiai (O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Srautas (dozė)

- Skaičiuojama: **Apšvita (W/cm²) × Laikas (s) = J/cm²**.
- Nuo jo priklauso fotonų kiekis, pasiekiantis audinius.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Bendra energija

- **Galia (W) × Laikas (s) = J**.
- Kartais skaičiuojama ir pagal **Srautą × spindulio dydį**.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

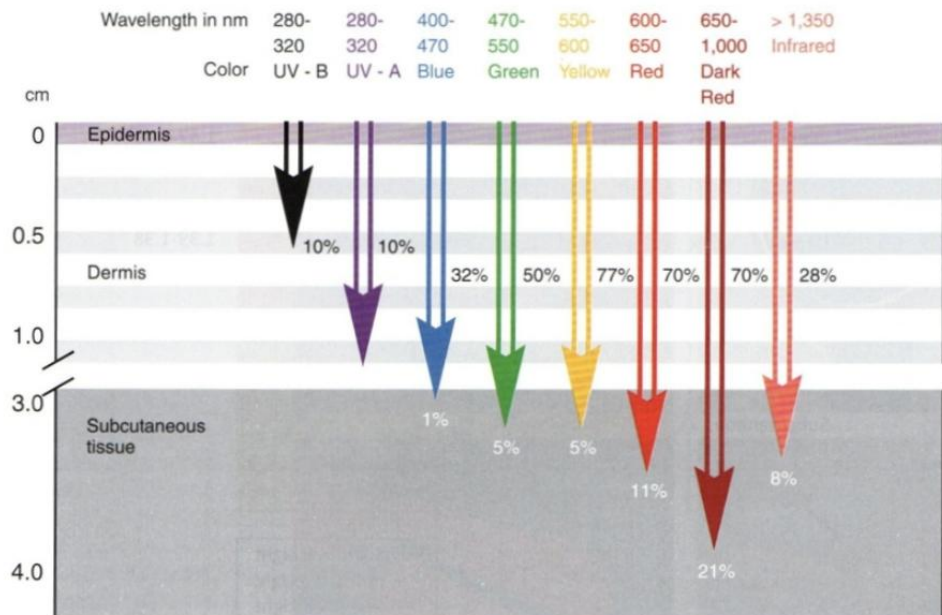
Taikymo technikos

- **Tinklelio metodas** – nuosekliai apšvitinami keli taškai.
- **Skenavimas** – aplikatorius judinamas pirmyn-atgal per sritį.
- **Pleistrai ar panelės** – užklijuojami tiesiogiai ant odos.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Saugumas

- Naudojant IIIb ir IV klasės lazerius, būtina dėvėti apsauginius akinius tiek gydytojui, tiek pacientui (O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



Šviesos prasiskverbimo gylio, pagrįsto bangos ilgiu ir kvadratinio dėsnio arba pusinės vertės sluoksnio skaičiavimu, pavyzdys.

(Šaltinis: Draper, O. D., Jutte, L. S. & Knight, K. L. (2021) *Therapeutic Modalities The Art and Science Third Edition*, p. 426)

Fotobiomoduliacijos terapija: reglamentavimas

Reglamentavimas JAV

- Jungtinėse Amerikos Valstijose fotobiomoduliacijos (PBM) prietaisus prižiūri **Maisto ir vaistų administracija (FDA)** per **Prietaisų ir radiologinės sveikatos centrą (CDRH)**.
- Reglamentavimas grindžiamas **optinėmis prietaiso savybėmis** ir **numatytu panaudojimu**.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

LED ir lazeriai

- LED prietaisams nėra atskiros klasifikacijos, tačiau tiek LED, tiek lazeriai turi atitikti **tarptautinius saugos standartus** (IEC 62471).
- Tai apima ultravioletinės, mėlynos, matomos ir infraraudonosios šviesos poveikio ribas.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



FDA leidimai

- Svarbu žinoti: **FDA ne „patvirtina“, o suteikia leidimą** naudoti konkrečius modelius.
- Leidimas dažniausiai taikomas:
 - raumenų ir kaulų sistemos problemoms,
 - dermatologiniams sutrikimams.
- Kiekvienas prietaisas turi instrukcijas: indikacijas, kontraindikacijas, įspėjimus ir atsargumo priemones.
- **Naudojimas ne pagal etiketę** galimas, bet neturi pažeisti etikos ir pacientų saugumo.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Lazerio klasės ir sauga

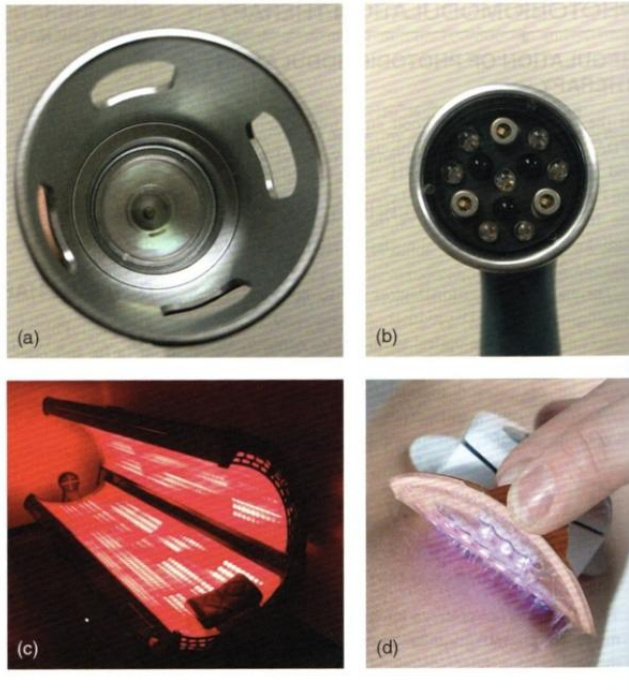
Prietaisai skirstomi į klases pagal bangos ilgį, galią ir pavojingumą:

Klasė	Bangos ilgis	Galia (mW)	Saugos aspektai
I	UV, matoma, IR	< 0,5	Biologinės žalos nenustatyta
IIa	400–710 nm	< 1	Saugu, jei ekspozicija <1000 s; pvz., prekybos skeneriai
II	400–710 nm	< 1	Pavojus ilgai žiūrint tiesiogiai
IIIa	400–710 nm	< 5	Pavojus ilgai žiūrint tiesiogiai
IIIb	UV, matoma, IR	5–500	Gali pažeisti akis ir odą
IV	UV, matoma, IR	> 500	Pavojus dėl tiesioginės spinduliuotės ir net išsklaidytos refleksijos

(Šaltinis: Draper, O. D., Jutte, L. S. & Knight, K. L. (2021) *Therapeutic Modalities The Art and Science Third Edition*, p. 423)

Saugumo taisyklė

- Naudojant **IIIb ir IV klasės lazerius, privaloma** dėvėti apsauginius akinius tiek gydytojui, tiek pacientui (O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



Įvairūs fotobiomoduliacijos taikymo tipai. (a) Vienas lazerinis aplikatorius, (b) lazerio ir LED klasterio zondas, (c) šviesos lova ir (d) šviesos lopinėlis.

(Šaltinis: Draper, O. D., Jutte, L. S. & Knight, K. L. (2021) *Therapeutic Modalities The Art and Science Third Edition*, p. 424)

Fotobiomoduliacijos terapijos konfigūracijos

Šviesos šaltiniai PBM terapijoje gali būti įvairūs:

- pavieniai optinio pluošto zondai,
- daugiafunkciai kietojo kūno lazeriai ar LED klasteriai,
- šviesos panelės ir lovos,
- guminiai pleistrai su LED ar lazeriais,
- **spausdinti LED**, klijuojami tiesiogiai ant odos biologiškai suderinamais klijais.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Kiekviena konfigūracija turi savų privalumų ir trūkumų (O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Audinių optinės savybės

- Šviesos spindulys, patekęs į audinį, gali **lūžti, atsispindėti ar išsisklaidyti**.
- Dėl šių procesų mažėja šviesos koherencija ir prasiskverbimo gylis.
- **Gilesnį įsiskverbimą** užtikrina:
 - kolimuoti (lygiagrečiai nukreipti) spinduliai,
 - tinkamas šviesos šaltinio ir audinio lūžio rodiklių suderinimas.
- Todėl **spausdinti LED** ar geriau fokusuoti lazeriai gali pasiekti gilesnius sluoksnius efektyviau nei įprasti divergentiniai šaltiniai.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Fotobiomoduliacijos konfigūracijų privalumai ir trūkumai

Šviesos šaltinis	Privalumai	Trūkumai
Šviesolaidis / viengubas ar daugialazeris zondas	- Didelis galios tankis - Tinka taškinei akupunktūrai - Sukelia terminį poveikį (skausmo kontrolei, nervų blokui) - Mažas gydymo plotas: 0,01–1 cm ²	- Netinka didesnėms sritims - Reikalingas tiesioginis specialisto darbas - Dozė priklauso nuo technikos - IIIb/IV klasės lazeriai gali greitai sukelti terminį poveikį
Kietojo kūno lazeriai ir LED klasteriai	- Tinka didesniems plotams (5–15 cm ²) - Galima kombinuoti kelis bangos ilgius - Didesnė galia → trumpesnis laikas	- Reikalingas specialisto darbas - Dozė priklauso nuo technikos - IIIb/IV klasės lazeriai – terminio poveikio rizika
Šviesos panelės, pleistrai, lovos	- Gali apšviesti didelį plotą - Pastovi dozė - Patogu naudoti	- Brangu - Sudėtingesnė infekcijų kontrolė
Spausdinta šviesa (pleistrai)	- Klijuojama tiesiai ant odos - Lankstu, patogiu dėvėti - Labai ekonomiška - Pastovi dozė	- Vienetas brangesnis - Nesukelia didelio terminio poveikio (mažiau veiksminga nervų blokui, palyginti su IV klasės lazeriais)

(Šaltinis: Draper, O. D., Jutte, L. S. & Knight, K. L. (2021) Therapeutic Modalities The Art and Science Third Edition, p. 424)

Fotobiomoduliacijos absorbcija

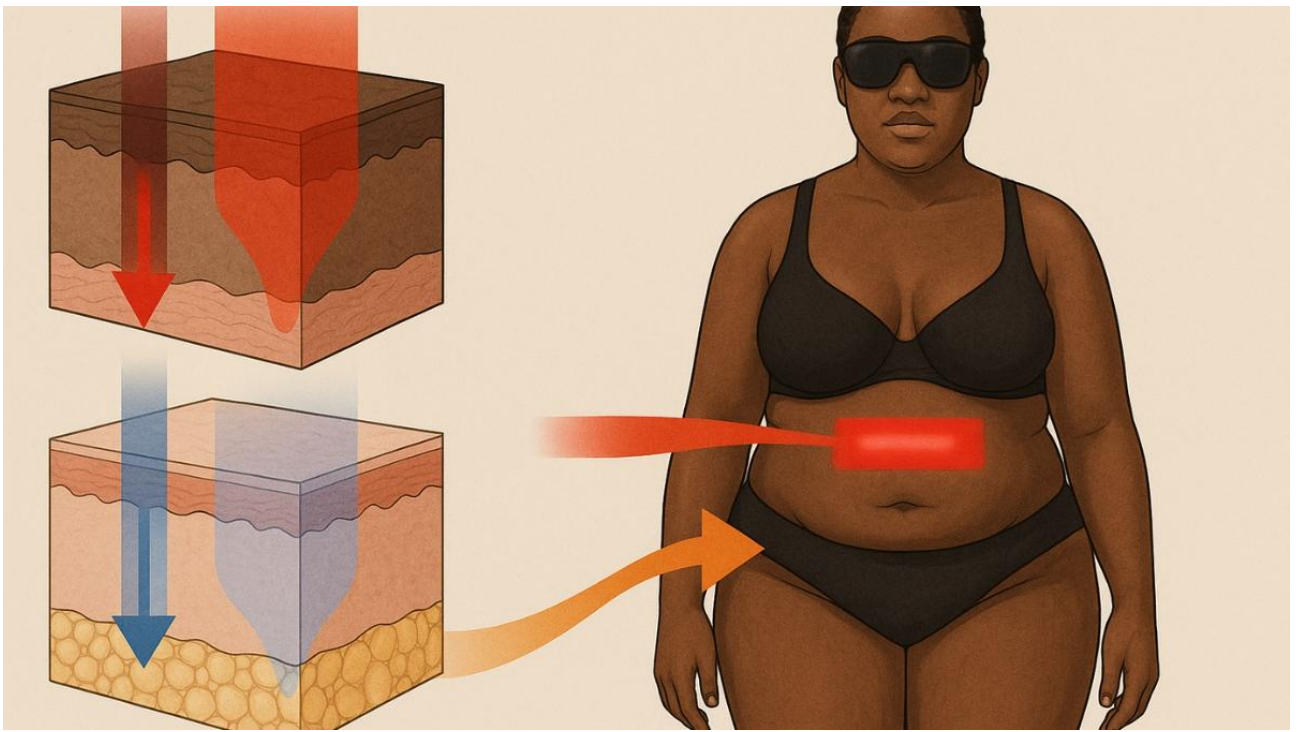
- Skirtingi bangos ilgiai audiniuose sugeriami nevienodai.
- Šviesos silpnėjimas audiniuose vyksta pagal **kvadratinį dėsnį** ir **pusinės vertės sluoksnį** (gylis, kuriame sugeriama 50 % šviesos energijos).
- Pvz., mėlyna šviesa (<1 %) vos prasiskverbia giliau nei 1 cm, o raudona ar artima infraraudonoji – 11–21 %.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Veiksniai, lemiantys prasiskverbimą

1. **Bangos ilgis** – ilgesni bangos ilgiai (raudona, infraraudona) prasiskverbia giliau.
2. **Audinio tipas** – melaninas, kraujas ir vanduo sugeria šviesą.
3. **Spindulio kokybė** – koherencija, kolimacija ir lūžio rodiklis lemia, kiek šviesos patenka gilyn.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



Odos spalvos įtaka

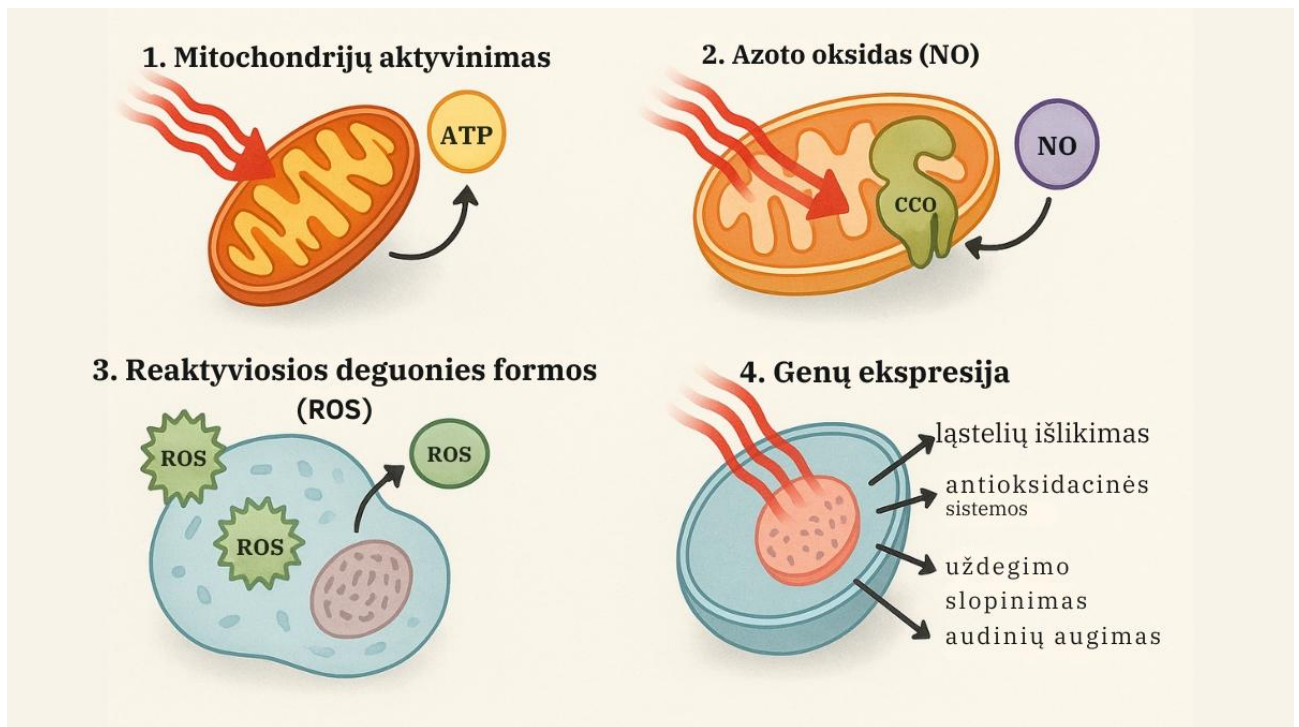
- **Melaninas** labai sugeria matomos šviesos spindulius.
- Tamsesnės odos pacientai sugeria daugiau šviesos paviršiniuose sluoksniuose, todėl gilesni audiniai gauna mažiau energijos.
- Trumpesni bangos ilgiai (pvz., mėlyni, violetiniai) yra labiau veikiami melanino.
- Ilgesni bangos ilgiai (infraraudonieji) mažiau priklauso nuo odos pigmentacijos.
- UV ir kai kurie PBM bangos ilgiai gali skatinti melanocitų aktyvumą, todėl oda patamsėja ar gali formuotis randai.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Nutukimo įtaka

- **Storas poodinių riebalų sluoksnis** riboja šviesos skverbimąsi į gilesnius audinius.
- Diskutuojama, ar terapinė šviesa gali pasiekti pakankamą gylį pacientams su dideliu riebaliniu sluoksniu.
- Net jei gilesni audiniai gauna mažiau šviesos, manoma, kad **signalinių molekulių aktyvacija paviršiniuose sluoksniuose** gali turėti sisteminių poveikį.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



Fotobiomoduliacijos poveikis ląstelėms

PBM veikia **ląsteles ir audinius** per šviesos sugertį tam tikrų molekulių, vadinamų **chromoforais**. Svarbiausi biologiniai procesai vyksta mitochondrijose, fermentuose ir azoto oksido apykaitoje (O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

1. Mitochondrijų aktyvinimas

- Pagrindinis PBM taikinytis – **mitochondrijų kvėpavimo grandinė**.
- Ypač svarbus fermentas – **citochromo c oksidazė (CCO)**.
- Sugėrusi šviesą, ši sistema pagreitina elektronų pernašą → padidėja **ATP gamyba**.
- Daugiau ATP = daugiau energijos ląstelėms augti, taisyti pažeidimus, regeneruoti.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

2. Azoto oksidas (NO)

- NO yra natūralus kvėpavimo grandinės inhibitorius, prisijungiantis prie CCO.
- Šviesos energija gali atskirti NO nuo CCO, taip atlaisvindama kvėpavimo grandinę.
- NO taip pat veikia kaip signalinė molekulė: plečia kraujagysles, gerina kraujotaką ir mažina uždegimą.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

3. Reaktyviosios deguonies formos (ROS)

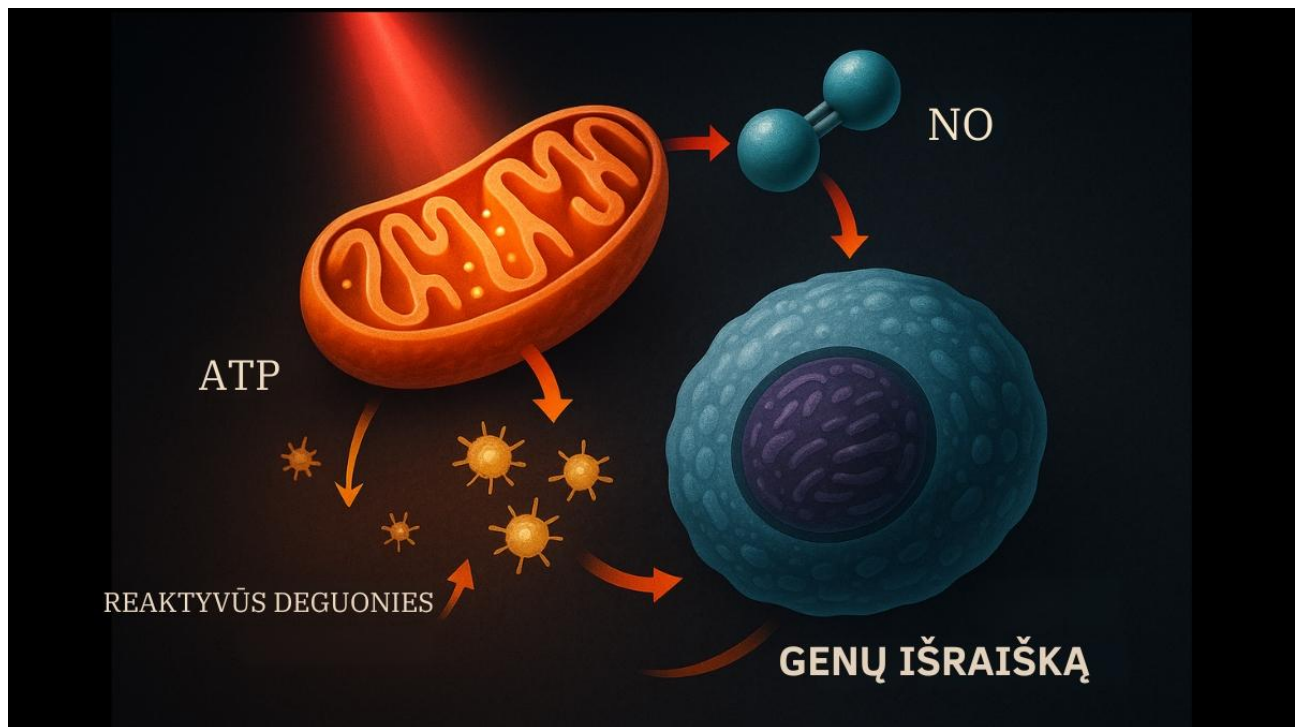
- Nedidelis ROS padidėjimas aktyvina **ląstelių signalizaciją**, skatina apsauginius mechanizmus ir regeneraciją.
- Svarbu – per didelis ROS kiekis gali būti žalingas, todėl PBM turi būti dozuojama tinkamai.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

4. Genų ekspresija

- PBM veikia **ląstelių branduolį**, įjungdama genus, susijusius su:
 - ląstelių išlikimu,
 - antioksidacinėmis sistemomis,
 - uždegimo slopinimu,
 - audinių augimu.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



Fotobiomoduliacijos klinikinis pritaikymas

PBM taikomas įvairiose medicinos ir sveikatos srityse. Poveikis grindžiamas biologiniais mechanizmais – ATP gamybos skatinimu, kraujotakos pagerinimu, uždegimo mažinimu ir audinių regeneracija (O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

1. Skausmo mažinimas

- PBM mažina tiek ūminį, tiek lėtinį skausmą.
- Mechanizmai: uždegimo slopinimas, nervinių impulsų laidumo pokyčiai, endorfinų išsiskyrimas.
- Naudojama gydant raumenų, sąnarių, nervų skausmus.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

2. Žaizdų gijimas

- PBM spartina:
 - epitelizaciją,
 - kolageno sintezę,
 - angiogenezę (naujų kraujagyslių formavimąsi).
- Efektyvu esant nudegimams, opoms, chirurginėms žaizdoms.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

3. Odos ligos

- Naudojama gydant:
 - aknę (dėl antibakterinio poveikio),
 - psoriazę,
 - randų formavimąsi.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

4. Neurologija

- PBM tyrinėjamas gydant:
 - insulto pasekmes,
 - galvos traumas,
 - neurodegeneracines ligas (Alzheimerio, Parkinsono).
- Mechanizmai: pagerėjusi mitochondrijų veikla, neuroprotekciniai procesai, sumažėjęs uždegimas.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

5. Raumenų ir sporto medicina

- PBM gali pagerinti **raumenų atsistatymą** po krūvio.
- Nauda sportininkams: mažesnis uždegimas, mažiau oksidacinio streso, greitesnis atsistatymas.
- Naudojamas prieš treniruotes ir po jų.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).



Fotobiomoduliacijos ateitis

Fotobiomoduliacija sparčiai vystosi dėl technologijų pažangos ir augančio mokslinių tyrimų kiekio.

- **Naujos technologijos:** OLED, spausdinti LED pleistrai, viso kūno panelės ir lovos.
- **Tikslinė terapija:** individualiai parenkami bangos ilgiai, dozės ir procedūrų schemos.
- **Integracija su kitomis terapijomis:** derinama su vaistais, kineziterapija, rehabilitacija.
- **Dirbtinis intelektas ir sensoriai** gali padėti sekti gydymo eigą ir pritaikyti parametrus realiu laiku.

(O. Draper, S. Jutte & L. Knight, 2021).

Išvados

- PBM yra saugi, neinvazinė terapija.
- Jos poveikis pagrįstas biocheminiais mechanizmais (ATP, NO, ROS, genų aktyvacija).
- Klinikiniai tyrimai patvirtina naudą: skausmo mažinimą, žaizdų gijimą, neurologinių funkcijų gerinimą, sporto reabilitaciją.
- Norint maksimalaus efektyvumo, svarbu tinkamai parinkti parametrus (bangos ilgi, galią, laiką).
- Ateityje PBM gali tapti dar svarbesne dalimi medicinos, reabilitacijos ir sporto praktikos.

Šaltiniai:

1. O. Draper D., S. Jutte L. & L. Knight K. (2021). Therapeutic Modalities: The Art and Science Third Edition. *Wolters Kluwer Health*: United States.