

BIOFÜÜSIKA – VARJUST VALGUSE KÄTTE

Arvi Freiberg

Tartu Ülikooli Molekulaar- ja Rakubioloogia Instituut

Allpool kirjeldatud tulemused on saavutatud Tartu Ülikooli Füüsika Instituudis.

BIOFÜÜSIKA – MIS SEE ON

Nagu paljud siduserialad ei lase biofüüsika (e bioloogiline füüsika) ennast kergelt määratleda. Isegi küsimusele, kas biofüüsika kuulub bioloogia või füüsika alla, on raske üheselt vastata. Tihti saab siin määravaks vastaja maitse. Eesti Teadusfond on biofüüsikat määratlenud kui täppisteadust. Küllap peegeldab see enamiku Eesti biofüüsikute täppisteaduslikku tausta.

Biofüüsika tekkis vajadusest ühendada erinevate teadusharude jõud eluslooduse mõistmiseks. Ammustel aegadel oli teadus üks. Valgustusajast alates hakkas ta aga üha enam valdkondadeks hargnema. See iseenesest vajalik suundumus, mis võimaldas teaduse sügavuti arengut, ammendas enast olulisel määral juba eelmise sajandi esimesel poolel. Killustumine oli jõudnud nii kaugele, et erinevate erialade spetsialistid üksteisest ilma “tõlgi” abita vaid vaevu aru said. Aga aru saada oli vaja. Olnuks ju lihtsalt rumal naaberteadustes kogutud rikkalikku teadmistepagasit kasutamata jätta. Nii tekkis ridamisi teadusharusid ühendavaid erialasid: nt küberneetika matemaatika ja inseneriteaduste vallas, sotsioökonomika sotsioloogia ja majandusteaduste vahel ning biofüüsika bioloogia ja füüsika siirdealal. Reeglina kasvavad sellised siduserialad üsna kiiresti vahendaja rollist välja, hakates iseseisvudes kandma baaserialasid üldistavat missiooni. Selles mõttes on nad valdkondade ülesed, uut teavet loovad õpetused. Erandiks pole ka biofüüsika, mis rakendab füüsikalistest teadustest tuntud kvantitatiivseid meetodeid bioloogilisest ainekust arusaamisel molekulaarsel, raku ja tervete organismide tasandil.

Millal biofüüsika tekkis? Füüsikalise taustaga inimesed kalduvad arvama, et biofüüsika sai alguse E. Schrödingeri 1944. aastal avaldatud raamatuke-

sest “Mis on elu?” [Schrödinger, 1944]. Selles paljudesse keeltesse tõlgitud üllitises jõuab kvantmehaanika rajaja järeldusele, et kõiki elusorganismides aset leidvaid protsesse on vähemalt põhimõtteliselt võimalik kirjeldada füüsikast ja keemiast tuntud seaduspärasustega. Teistel on aga põhjust uskuda biofüüsika palju varasemat sündi. Biofüüsikale alusepanijate hulka annab lugeda nii Itaalia arsti ja bioelektri avastajat Luigi Galvanit (1737–1798) kui ka tema Saksa kolleegi Julius von Mayerit (1814–1878) ja Hermann von Helmholtzi (1821–1894), kes jagavad energia jäävuse seaduse avastamise au. Veidi hilisemast ajast võib nimetada juba tervet plejaadi biofüüsika hälli juures seisnud kuulsaid õpetlasi eesotsas Ameerika nobelisti Linus Paulingiga (1901–1994).

BIOFÜÜSIKA EESTIS

Biofüüsikast Eestis ennesõjaajal perioodil pole midagi teada. Nõukogude ajal sai lähiümbruses biofüüsikat õppida vaid Moskvas ja Leningradis, mida üksikud Eestist pärit noored ka kasutasid. Sinna nad kahjuks enamasti oma karjääri jätkama jäidki. Pakutavad tingimused olid suurtes keskuses lihtsalt avaramad. Sellele vaatamata, tõenäoliselt ka nende keskuses töötajate kaudu loodud kontaktide najal, edenes biofüüsikaline mõtte tasapisi Eestiski (vt E. Lippmaa ja A. Aaviksaare artikleid kogumikus [Kivi, 1979]). Ajastule kohaselt kandis selles liidrirolli Teaduste Akadeemia instituudid (Eksperimentaalbioloogia Instituut, Füüsika Instituut, Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut, Zooloogia ja Botaanika Instituut). Tegemist oli siiski üksikute entusiastidega, kes enamasti olid iseõppijad. Mingit suunatud teaduspoliitikat selle taga polnud. Asjaolu, et entusiastide leidus üheaegselt mitmes instituudis, on seletatav teaduse sisemiste arengureeglitega, “aja nõude” tunnetat

misega. Akadeemiliste instituutide reorganiseerimise tulemusel on vastav uurimistöö tänapäeval Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi kõrval koondunud suurematesse ülikoolidesse (Tartu Ülikool, Tallinna Tehnikaülikool, Maaülikool).

Käesoleva kirjatüki eesmärk on mõne iseloomuliku näite varal tutvustada biofüüsikalise mõtte arengut Eestis eelmise sajandi lõpukümnendil ning selle sajandi alguses. Ülalkirjeldatud eriala piiride hägususe tõttu ei võtnud siinkirjutaja enda peale riski hakata määrama kes on biofüüsik ja kes mitte. Jätsin selle teadlaste endi otsustada võttes aluseks Eesti Teadusfondi poolt eriala 1.5 (biofüüsika) raames eraldatud uurimistoetused. Alates 1993. a on kolmeteistkümnele taotlejale (J. Engelbrecht, A. Freiberg, A. Laisk, G. Liidja, K. Märing, V. Saks, J. Salm, I. Sevtšuk, P. Sikk, A. Suisalu, A. Sõber, R. Tammelo, K. Vanatalu) välja antud 23 granti. Neis osalejaid kokku lugedes võib aktiivselt uurimistööga tegelevate Eesti biofüüsikute arvuks hinnata 40–45 inimest. Seda on selgelt vähe, arvestades möödunud sajandi lõpukümnenditel alanud bioloogia tormilist arengut, mis ei näita mingeid vaibumismärke, ning baaserialade (st füüsika ja bioloogia) rahvusvaheliselt arvestatavat taset Eestis. Aga nüüd lubatud näidete juurde.

FOTOSÜNTEETILISE VALGUSHAARDE POLARONMEHHAANISM

Biosfäär eksisteerib tänu Päikeselt saadavale energiale. Keerulist protsesside jada, mille abil seda energiat ammutatakse, nimetatakse teatavasti fotosünteesiks. Tinglikult võib seega väita, et bioloogia algab valguse neeldumisega fotosünteesilises membraanis. Täpsemini neelatakse footon klorofüllil või karotenoidi molekulide poolt, mis paiknevad spetsialiseeritud membraanisestest valgukompleksides, nn antennides, nagu rosinad pirukas. Esmaste fotoprotsesside imetlusväärselt kõrge kvantsaagis on samuti hästi teada. Laias spektrivahemikus neelatud valgusenergia liigub minimaalsete kadudega nn tsentriklorofüllidele, põhjustades nende oksüdatsiooni. Just neid esmaseid fotoergastusi ja nende ülikiiret dünaamikat uuri-

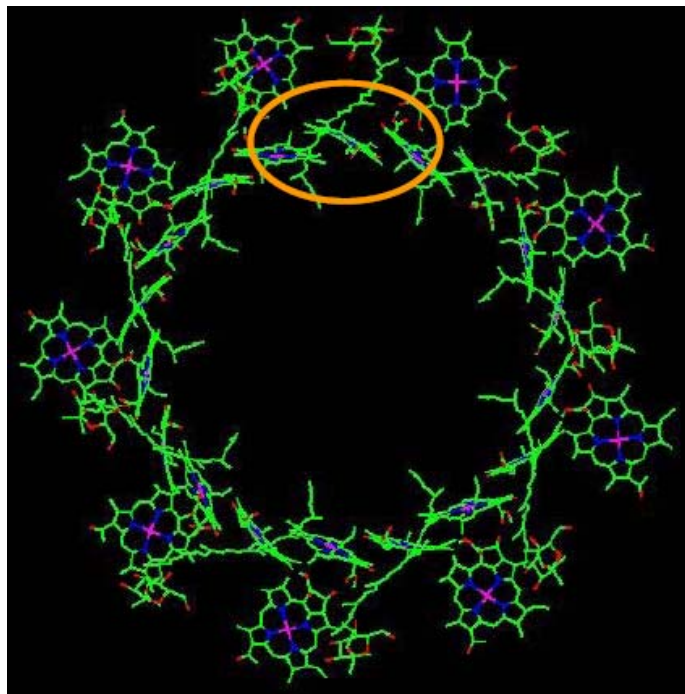
takse Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi biofüüsika laboris (juhataja prof A. Freiberg). Milline on esmase fotoergastuse iseloom? Kui kiiresti ergastusenergia antennikompleksis maha jahtub ehk relakseerub? Millise kiirusega levib ergastus fotosünteesilises membraanis ja milline on selle liikumise mehhanism? See on vaid väike valik küsimusi, millele on viimastel aastatel vastust otsitud.

Vastamiseks peab hästi mõistma (sh oskama mõõta) erinevaid protsesse mõjutavaid ja omavahel konkureerivaid vastastikmõjusid. Jämedates joontes on tegemist kahe olulise jõuga: üks mõjub klorofüllimolekulide endi vahel ning teine klorofüllil ja teda ümbritseva valguga vahel. Kummatis oli teave nende vastastikmõjude kohta veel mõned aastad tagasi üsna puudulik ja vastuoluline. Täna on see probleem teatud tüüpi fotosünteesiliste bakterite antennikomplekside näitel lahendatud. Eelkõige Tartus tehtud uuringud [Timpmann jt, 2005] selgitasid, et bakteriklorofüllil elektronid purpurbakterite antennis interakteeruvad väga tugevasti sõsarklorofüllil elektronidega, kordi jõulisemalt kui elektronid niisuguses tüüpilises molekulaarkristallis nagu antratseen.

Antratseeni fotoergastused on teadagi eksitonid, st üle paljude naabermolekulide levivad (delokaliseerunud) elektronergastused. Kas peaksime antenniergastusi samuti eksitonideks pidama? Paljud ongi selle seisukoha omaks võtnud. Tundub siiski, et ennatlikult. Tartu katsed, milles rakendati tundlikke, kohapeal välja arendatud selektiivspektroskoopilisi meetodeid, osutasid, et bakteriklorofüllil elektronid ei interakteeru tugevasti mitte ainult teiste elektronidega, vaid samuti neid siduvate tuumadega [Freiberg jt, 2003]. See nn elektronfoonon vastastikmõju põhjustab peale valguskvandi neeldumist valgustruktuuri lokaalse deformatsiooni, mida võiks jämedalt võrrelda maavärinaga. Teadusargoo väljendudes on tegemist mittelineaarse dünaamilise protsessiga, polaroni moodustumisega, mis peadib eksitoni pitsumisega (autolokalisatsiooniga) kahe, kõige enam kolme molekuli ulatusega potentsiaaliauku (joonis 1). Aega kulub selleks vaid 100–150 fs [Timpmann jt, 2001].

Joonis 1.

Fotosünteesiliste purpurbakterite perifeerse antennikompleksi struktuur. Bakteriklorofüllü molekule kooshoidev valgumõõn on ülevaatlikuse huvides eemaldatud. Ovaal kujutab autolokaliseerunud eksitoni ja vastava võreformatsiooni ligikaudset ulatust.



On põhjust arvata, et äsjakirjeldatud nähtuse puhul pole tegemist pelgalt juhusliku looduse kapriisiga, vaid et seda on tehtud “asja” pärast. Autolokalisatsioon põhjustab eksitoni kiirgusspektri laienemist ning tema spektraalset punanihet neeldumisspektri suhtes. Mõlemad muutused soodustavad energialevi. Laienenud kiirgusspekter kindlustab parema kattumise naaberkomplekside neeldumisspektritega, kiirendades eksitoni liikumist, samal ajal kui spektri punanihe annab energialevile kindla suuna – otse energeetiliselt allamäge asuva tsentri poole.

Tagantjärele tark olles võiks ju öelda, et kõik on loomulik ja teisiti see ei saanukski olla. Purpurbakterite antennid moodustavad membraani tasan-dis kauneid ringe (vt joonis 1), milles elektronide liikumine on esimeses lähenduses ühedimensio-naalne. Teooria järgi aga autolokaliseeruvad ühe-mõõtmelises süsteemis kõik elektronegrastused

igasuguse elektronide ja tuumade interaktsiooni korral. Tegelikkus on muidugi hulga keerulisem. Klorofüllide siirdeenergiad on keskkonnatingimuste varieerumise tõttu hägustunud. See kõike-hõlmav spektrite mittehomogeensus, mille uurimisele on Tartu koolkond samuti märkimisväärselt panustanud, mitte üksnes ei võimalda teooriate otsesõnu rakendamist, vaid põhjustab ka uusi ja ootamatuid füüsikalisi nähtusi. Näiteks deformeerub antennistruktuur kõige hõlpsamini seal, kus asuvad kõige madalama siirdeenergiaga klorofüllid. Ühtlasi jõuti nende uuringute käigus jälle juba aastakümneid diskuteeritud fotosünteesiliste pigmentide spektrite peentimmimise molekulaarsetele mehhanismidele. Ruuminappus ei võimalda neil töodel siin pikemalt peatuda. Lõpetuseks tasuks siiski nimetada, et polaronilaadseid ergastusi on samuti leitud taimede antennides [Ihalainen jt, 2003].

VALKUDE STRUKTUUR JA DÜNAAMIKA: *In vitro versus in silico* EKSPERIMENT

Roheliselt fluorestseeruv valk (GFP, vt joonis 2) ja tema erivärvilised muteeritud derivaadid – kollane, kuldne või sinine – on markeritena leidnud laialdast rakendamist raku- ja molekulaarbioloogias. Sobivalt valitud fluorestseeruvate valgumolekulide vahel toimuv resonantne energiaülekanne võimaldab kauguste täppismääramist nanomeeterskaalal. Tartu Ülikooli füüsikainstituudi laser-spektroskoopia laboris (dr Koit Muring) aga leiti, et looduslikult valku kätketud kromofoor, mis annabki neile omaduse silmaga nähtavalt fluorestseeruda, osutub ühtlasi informatiivseks sondiks teada ümbritseva valgukeskkonna omadustest teavitamisel.

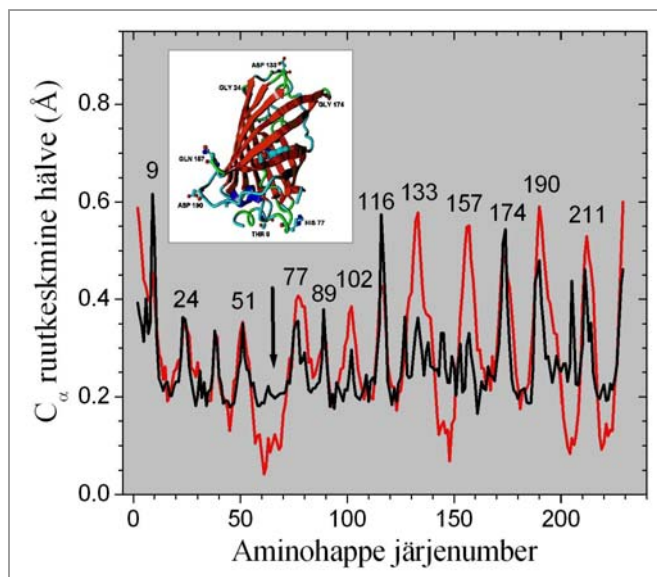
Uurides temperatuuri ja rõhu mõju valgu fluorestsentsi intensiivsusele ning ergastatud seisundi elueale, tuvastati siniselt fluorestseeruva valgu BFP kaks erinevat konformatsiooni, mida eristab vesiniksideme olemasolu või puudumine kromofoori ja ümbritsevate aminohapete vahel [Muring jt, 2005]. Temperatuuri alandamisel või rõhu tõstmisel vesiniksidemega konformatsioonide osakaal kasvab, millega ühtlasi kaasneb fluorestsentsi intensiivsuse ning keskmise eluea kasv.

Joonis 2.

GFP peaahela C_{α} aatomite ruutkeskmised hälbed. Musta joonega tähistatud hälbed on arvatatud võnkeülesande lahendamisel leitud normaalvormidest, punase joonega on aga näidatud eksperimentaalsetest temperatuurifaktoritest saadud väärtused (proteiini andmepanga röntgenstruktuuri-analüüsi fail 1GFL.pdb). Nool osutab GFP silindrikujulise struktuuri keskmisele asuva rohelist fluorestseeruva kromofoori hälbele. Suurima amplituudiga fluktuatsioonide aminohapete nimed on toodud abipildil.

Küsimusele, miks vesiniksidemeta kromofoor on mittefluorestseeruv, annab vastuse otsene kvantkeemiline arvutus. Osutub, et kromofoor satub valguskvandi neelamise tagajärjel väga ebastabiilsesse ergastatud seisundisse, kus elektroniühenduse ümberjaotumisest tekkinud jõud püüavad kromofoori deformeerida. Sellega kaasneb ergastatud ja põhiseisundi energiapiindade lähenemine või isegi lõikumine, mis põhjustabki fluorestsentsi kustutamist. Vesiniksidemega jäigastatud kromofoori väändedeformatsioon on aga takistatud kõrge energiabarjääriga, mistõttu molekul kiirgab hästi. Seda fluorestsentsi sõltuvust temperatuurist ja rõhust saab muuhulgas rakendada vastavates mõõteandurites.

Fluorestseeruvate ja “pimedate” molekulide tasakaalu kontrollib vaba energia. Entroopia ja entalpia vahetamiseks selles arvutati valgumolekuli normaalvõnkumiste spekter, mis katab laia energiapiirkonna 6 kuni 3750 cm^{-1} [Krasnenko jt, 2005]. Võnkumistes osalevate aatomite ruutkeskmised hälbed on näidatud joonisel 2. Analüüs näitab, et temperatuuridel alla 250 K määrab tasakaalu põhiliselt entalpia, kõrgemal temperatuuril aga entroopia.



ENERGEETILISED ÜHIKUD LIHASRAKKUDES

Kaasaegne arusaam raku metabolismist e ainevahetusest põhineb ensüümide mikrokompartmentsatsioonil e mikrotarastamisel ja metaboliitide kanaliseerimisel. Rakku ei vaadelda enam homogeensena, vaid arvestatakse, et ensüümreaktsioonid toimuvad neid vahetult ümbritsevates struktuurides. Rakus võib eristada makrotarastatud piirkondi, mille mõõdud on molekulaarsest dimensioonist palju suuremad, ja mikrotarandeid, mille mõõdud lähenevad metaboliitide molekulide mõõtudele.

Mikrotarastamist mõistetakse mõnikord metaboliitide kanalisatsiooni sünonüümina, arvestades et metaboliitide molekulid võivad vahetult liikuda ensüümilt ensüümile, ilma et nad seguneksid raku üldises või isegi makrotarastatud ruumalas. Mikrotarastamine ja sellega seotud metaboliitide kanaliseerumine põhjustavad nn funktsionaalse paardumise, st mingi metaboolse raja lõpus asuvad reaktsioonid toimuvad palju varem ja kiiremini kui võiks oletada rajas osalevate ensüümide ja metaboliitide hulgast lähtuvalt. Paljude kanaliseeritud metabolismiradade kooseksisteerimine ongi raku kõrgesti organiseeritud metaboolne süsteem – elukeemia. Nende protsesside olemuse ja regulatsiooni sügav kvantitatiivne mõistmine on raku biofüüsika eesmärk.

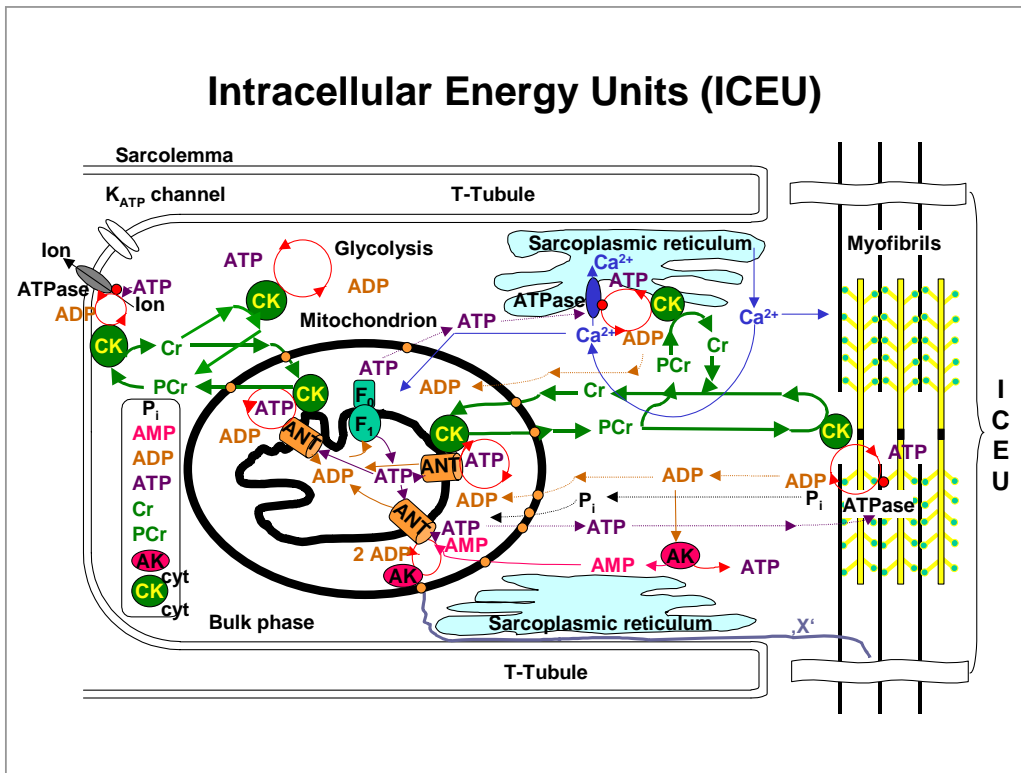
Üks niisugune on lihastes ja ajurakkudes toimiv energia ülekande süsteem, mille uurimises osalevad bioenergeetika laboratoorium Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudis akad Valdur Saksa juhtimisel, patofüsioloogia õppetool Tartu Ülikoolis (prof Enn Seppet), mehaanika ja rakendusmatemaatika osakond Küberneetika Instituudis (akad Jüri Engelbrecht) ja Tallinna Tehnikaülikooli biotehnoloogia õppetool (prof Raivo Vilu). Konfokaal- ja elektronmikroskoopia osutavad, et nt lihaskududes on kõrgesti organiseeritud makromolekulaarsed struktuurid, mis seovad mitokondreid (kui energeetiliste metaboliitide algallikaid) ja lihaste kontraktiivseid valke (kui energeetiliste metaboliitide lõpptarbijaid) selliselt, et

kindlustada energia võimalikult kiire liikumise mitokondritest lihaskiududeni.

Südamelihase rakkudes paigutuvad mitokondrid väga regulaarselt, peaaegu kristallisarnaselt. Sellises keskkonnas ei saa ATP kui universaalne energiakandja liikuda vaba difusiooni teel. Tema fosfaatrühmad kantakse rakus edasi teatud struktuuriselt paigutatud ensüümide jadade abil (vt joonis 3). Lihaskududes on mitokondrite asukoht fikseeritud tsütoskeleti valkude poolt, nii et need moodustavad kompleksi müofibrillide ja sarkoplasmaatilise retiikulumi. Sellest struktuurist tingituna on hingamisreaktsioonide kiirus mitokondris vahetult ära määratud ATP tarbimise kiirusega lihaskiududel [Saks jt, 2003, 2004; Vendelin jt, 2005].

Kui tervikliku sisestruktuuriga, kuid eemaldatud rakumembraaniga lihaskiude püüti stimuleerida välise ADP lisamisega, siis efekt saavutati suhteliselt kõrge ADP kontsentratsiooniga (300–400 μM). Kui aga ADP tekitati rakusiselt, siis piisas palju madalamast metaboliidi kontsentratsioonist (40 μM). Need katsed näitasidki, et rakusisene ADP kontsentratsioon ei tasakaalustu lahuses olevaga isegi juhul, kui rakumembraan on kunstlikult kõrvaldatud. See saab ainult tähendada, et rakus on ADP ümbritsetud rakusiseste difusioonitaranditega, milleks, nagu selgus, on sarkoplasmaatilise retiikulumi, sarkomeerid ja müofibrillid.

Joonis 3 võtab kokku paljude erinevate uuringute tulemusel loodud rakusiseste energeetiliste ühikute kontseptsiooni [Saks jt, 2003]. Raku tsütoskelett paigaldab mitokondrid ja sarkoplasmaatilise retiikulumi kindlasse asendisse lihaskiudude suhtes. Sarkoplasmaatilise retiikulumi vabanenud kaltsium aktiveerib nii mitokondriaalsed dehüdrogenaasid kui ka lihaskiudude kokkutõmbe. Fosfaatrühmade kanaliseeritud ülekande toimub mitokondrite, sarkoplasmaatilise retiikulumi ja lihaskiudude ATPaaside vahel kreatiinkinaasi ja müokinaasi vahendusel. Energeetilise metabolismi kiirus on reguleeritud lokaalsete ATP/ADP kontsentratsioonide suhtega müofibrillide mikrodoomenidel ja rakusisestel membraanstruktuuridel.



Joonis 3.

Raku energeetiline ühik (*Intracellular Energetic Unit*) – kreatiin- (CK) ja adenülaatkinaaside (AK) seotud struktuur, mis tagab efektiivse energia ülekande mitokondritelt lihaskiududele.

FOTOSÜNTEESI KIIRUST PIIRAVAD TEGURID

Jätkame fotosünteesiprotsesside kirjeldust sealt, kus me esimeses näites pooleli jäime. Tsentriklorofüllidele oksüdatsiooni käigus eraldunud elektronid liiguvad vahekandjate abil edasi kohtadesse, kus neid viimaks kasutatakse süsihappegaasi taandamisel suhkruks. Oksüdeerunud klorofüll aga haarab omakorda elektroni vee molekulidelt, põhjustades viimaste lagunemise ja hapniku eraldumise. Nii muundatakse footoni energia lõpuks kõrgeenergeetiliste molekulide keemiliste sidemete seotud potentsiaalseks energiaks.

Akadeemik Agu Laisa juhtitud Tartu Ülikooli taimefüsioloogia õppetooli fotosünteesi uurimisrühma eesmärk on juba aastaid olnud mõista fotosünteesi summaarset kiirust määravaid ja piiravaid faktoreid. Nende uuringute omapäraks on detailised kineetilised uuringud elusatel lehtedel, täiendamaks maailmas laialt levinud *in vitro* katseid erinevatel preparaatidel.

Juba 1960ndate aastate lõpus õnnestus näidata, et fotosünteesi kiirus on seotud süsihappegaasi kontsentratsiooniga lehe rakkudes, mitte välisõhus, ning, et fotosünteesis hapnik mitte ainult ei eraldu, vaid ka neeldub, konkureerides nii süsihappegaasiga. Veidi hiljem hakati koos süsihappegaasi

neeldumisega paralleelselt mõõtma ka lehe klorofüllü fluorestsentsi. See võimaldas eristada elektronide liigutamiseks kasutatavat kasulikku valgusenergiat tema kadudeks minevast osast, mis eraldub lehest kas nähtava fluorestsentsina või nähtamatu soojuskiirgusena. Nende eelnenud uuringute tulemused on kokku võetud monograafias [Laisk, Oja, 1998].

Viimastel aastatel on koostöös füüsikainstituudiga lisandunud võimalused valgustada lehte laservalgusega, mis on suurendanud mõõtmiste tundlikkust. Ootamatult selgus, et pikalainelised infrapunase kiirguse kvandid, mille energiast ei peaks klorofüllü ioniseerimiseks piisama, on siiski võimalised seda tegema, põhjustades hapniku eraldumist lehest [Pettai jt, 2005]. Siin on oma osa molekulide soojusliikumise energial, mis ergastusenergia puudujääki kompenseerib. Ühtlasi demonstreeriti, et hapniku eraldumise kiirus võib lühiaeg-

selt kuni kümnekordselt ületada tavalist fotosünteesi kiirust, vabastades fotosüsteem II iga-sugustest kahtlustest fotosünteesi kiirust piirava agendina. Nii ongi rühma tähelepanu hetkel koondu-nud hoopiski fotosüsteem I-le, eriti sellega seotud nn tsüklilisele elektrontranspordile. Seejuures on kahtluse alla seatud üldiselt levinud seisukoht, et tsüklilise elektrontranspordi käigus sünteesitakse ATP [Laisk jt, 2005].

Kõigi nende saavutuste taga on pidev, innovatiivne aparaadiehitus, mille tulemusena on loodud unikaalne kompleks taimelhe fotosünteesi kineetika uurimiseks (foto), millele võrdväärset teistes laborites ei ole. Viimase uudisena on välja töötatud ülitundlik spektrofotomeeter, mis võimaldab uurida fotosüsteemi I doonorklorofüllü P700 oksüdatsiooni ja elektronide liikumise kiirust läbi fotosüsteemi. Aparaa-te on jõudumööda ka turustatud, sh USAs.

Raaljuhitav aparaatuur elusa taimelhe fotosünteesi kineetika uurimiseks. Süsteem kontrollib üheaegselt lehe temperatuuri, pealelangeva valguse intensiivsust ja spektraalkoosseisu ning CO₂, O₂ ja veeauru kontsentratsiooni keskkonnas. Nendel etteantud parameetritel jälgitakse CO₂ neeldumise ning O₂ ja veeauru eraldumise kiirust, klorofüllü fluorestsentsi ning lehe optilist neeldumist.



KOKKUVÕTE JA VAADE TULEVIKKU

Asjatundlik lugeja kahtlemata märkas, et toodud näidetega on kaetud peaaegu kõik klassikalise biofüüsika alad alates molekulaarsest tasandist ja lõpetades organite ning organismidega. Võib jääda mulje, et Eestis on biofüüsikaga kõik korras. See mulje on kahjuks petlik. Selleks on otsingute front liiga auklik, tegijaid liiga vähe ning viimasedki kahjuks enamikus juba oma parimast loomeeast väljas. Kriitilist massi ületava tegijate arvuga võivad kiidelda vaid üksikud laborid. Tagatipuks ei mahu biofüüsika kraadiõppe tasandil endiselt ühegi ülikooli õppekavva. Selle olukorra taustaks on ülikoolide teaduskondadepõhine ülesehitus ja seda toetav rahastamissüsteem, mis ei soosi siduserialasid. Lisaks kurb tõsiasi, et biofüüsikat ei pea omaks ei füüsikud ega bioloogid.

Vähesed kahtlevad, et multidistsiplinaarsus on 21. sajandi teaduse võtmesõna [Greene, 1997]. Ülaltoodud raku energeetilise ühiku mudel on heaks näiteks sellest, kui kunstlik ja väheviljakas on igasugune teaduse tarastamine. Raku tervikliku kvantitatiivse kirjeldamise eesmärgi nimel on tulemuslikult oma jõud ühendanud nii erinevate valdkondade nagu biofüüsika, molekulaarbioloogia, raku füsioloogia ja matemaatika esindajad. Tekkinud sünergiast on välja kasvamas uus, tormiliselt arenev, teadusharu nimega molekulaarne süsteemioloogia (*molecular system biology*) [Noble, 2002; Kitano, 2002].

On aeg nendele väljakutsele ka siinmail tegusalt vastata. Eelkõige tuleb kaotada kunstlikud takistused siduserialade teelt. Biofüüsika pole pelgalt üks järjekordne teadusharu, vaid pakub noortele ka huvitavaid ja mitmekesiseid karjäärivõimalusi. Meie järjest komplitseeritumas maailmas leiavad laia ettevalmistusega biofüüsikud tööd nii uurimislaborites kui meditsiinikeskustes, farmaatsia- ja biotehnoloogiafirmades, ülikoolidest ja valitsusasutustest rääkimata. Kõikjal, kus ülimalt spetsialiseeritud erialade esindajad hätta jäävad. Arvestades Eesti biofüüsika seniseid suundumusi ning silmas pidades potentsiaalsete doonorerialade (bioloogia, füüsika, teoreetiline keemia, kübernee-

tika, arstiteaduse mõned erialad) märkimisväärset taset, võiks meil enim arenguruumi olla järgmistes uurimissuundades: fotosünteesi biofüüsika, biofotoonika, teoreetiline (raali)bioloogia, juhtimis- ja regulatsiooniprotsesside biofüüsika ja meditsiinifüüsika. Aga see on tänane vaatepunkt, kust tuleviku põnevad rajad on halvasti nähtavad.

TÄNUAVALDUS

Autor tänab Agu Laiska, Koit Muringut, Valdur Saksa ja Marje Sulakatkot vastavaid teemasid käsitlevate tekstikatkete ja illustreeriva materjali eest.

VIITEID

Freiberg, A., Rätsep, M., Timpmann, K., Trinkunas, G., Woodbury, W. N. 2003. Self-trapped excitons in LH2 antenna complexes between 5 K and ambient temperature. *J. Phys. Chem. B*, 10, 11510-11519.

Greene, M. T. 1997. What cannot be said in science? *Nature*, 388, 619-620.

Ihalainen, J. A., Rätsep, M., Jensen, P. E., Scheller, H. V., Groce, R., Bassi, R., Korppi-Tommola, J. E. I., Freiberg, A. 2003. Red spectral forms of chlorophylls in green plant PSI-A site-selective and high-pressure spectroscopy study. *J. Phys. Chem. B*, 107, 9086-9093.

Kitano, H. 2002. System biology: a brief overview. *Science*, 295, 1662-1664.

Kivi, J. 1979. Teadus ja tänapäev. Eesti Raamat, Tallinn.

Krasnenko, V., Tkaczyk, A. H., Tkaczyk, E. R., Farkas, Ö., Muring, K. 2005. Vibrations-determined properties of green fluorescent protein. *Biopolymers*, 78, 140-146.

Laisk, A., Eichelmann, H., Oja, V., Peterson, R. B. 2005. Control of cytochrome b_6f at low and high light intensity and cyclic electron transport in leaves. *Biochim. Biophys. Acta*, 1708, 79-90.

Laisk, A., Oja, V. 1998. Dynamic gas exchange of leaf photosynthesis. Measurement and interpretation, CSIRO, Canberra.

- Mauring, K., Deich, J., Rosell, F. I., McAnaney, T. B., Moerner, W. E., Boxer, S. G. 2005. Enhancement of the fluorescence of the blue fluorescent proteins by high pressure or low temperature. *J. Phys. Chem. B*, 109, 12976-12981.
- Noble, D. 2002. Modeling the heart - from genes to cells to the whole organ. *Science*, 2002, 295, 1678-1682.
- Pettai, H., Oja, V., Freiberg, A., Laisk, A. 2005. Photosynthetic activity of far-red light in green plants. *Biochim. Biophys. Acta*, 1708, 311-321.
- Saks, V., Kuznetsov, A., Andrienko, T., Usson, Y., Appaix, F., Guerrero, K., Kaambre, T., Sikk, P., Lemba, M., Vendelin, M. 2003. Heterogeneity of ADP diffusion and regulation of respiration in cardiac cells. *Biophys. J.*, 84, 3436-3456.
- Saks, V. A., Kuznetsov, A. V., Vendelin, M., Guerrero, K., Kay, L., Seppet, E. K. 2004. Functional coupling as a basic mechanism of feedback regulation of cardiac energy metabolism. *Mol. Cell. Biochem.*, 256/257, 185-199.
- Schrödinger, E. 1944. *What is Life?* Cambridge University Press.
- Timpmann, K., Katiliene, Z., Woodbury, N. W., Freiberg, A. 2001. Exciton self-trapping in one-dimensional photosynthetic antennas. *J. Phys. Chem. B*, 105, 12223-12225.
- Timpmann, K., Trinkunas, G., Qian, P., Hunter, C. N., Freiberg, A. 2005. Excitons in core LH1 antenna complexes of photosynthetic bacteria: Evidence for strong resonant coupling and off-diagonal disorder. *Chem. Phys. Lett.*, 414, 359-363.
- Vendelin, M., Beraud, N., Guerrero, K., Andrienko, T., Kuznetsov, A. V., Olivares, J., Saks, V. A. 2005. Mitochondrial regular arrangement in muscle cells: a "crystal-like" pattern. *Am. J. Physiol. Cell. Physiol.*, 288, C757-C767.