

KÕIGE TÄHTSAM ENERGEETIKA

ARVI FREIBERG

Maailma asju liigutavat kaks jõudu – sugutung ja surmahirm. Ehkki mitte täiesti alusetu väide, pole see kaugeltki kogu tõde. Nii üks kui teine muutuvad oluliseks alles siis, kui kõht on vähemalt mõõdukalt täis.



Inimkond, üldisemalt kogu elusloodus, on pidevas toidunäljas. Toidu hankimise nimel on läbi ajaloo peetud lugematul arvil sõdu. Ja kardetavasti tuleb neid ette ka tulevikus. Sest pidevast energiavajadusest pole pääsu. Tehnilise progressi osaks on ja jääb vaid akuutset energianälga leevendada – olematuks ta seda teha ei saa. See käiks loodusseaduste vastu. Loodusseadused ju inimeste poolt kehtestatud reeglitest selle poolest erinevadki, et neid ei saa rikkuda. Kusjuures sellel pole midagi pistmist seadusekuulekuse või moraaliga. Hetkel tekitab kõige enam pingeid suurima rahvaarvuga Aasia riikide (Hiina, India, Indoneesia) kiire majanduskasv. Ka Aafrika seni tagasihoidliku elatustasemega riikides tõuseb pidevalt tarbimine. Arvatakse, et hiljutises Lahesõjas ei mänginud kindla kontrolli saavutamine Lähis-Ida rikkalike nafta- ja gaasimaardlate üle mitte kõige väiksemat osa. Terrorismitvastane võitlus ning demokraatia levitamine olid vaid selle eesmärgi poliitkorrektseks kattevarjuks.

Lugeja võib-olla märkab, et toidust alustades hakkasime üksiti energiast kõnelema. Järgneva loo kontekstis võib neid sõnu küll vaheldumisi kasutada, kuigi rangelt võttes pole see õige. Toidust rääkides mõtleme biosfääri. Energia mõiste on hoopis avaram, rakendudes ühevõrra hästi nii elus- kui ka eluta loodusele. Hommikul ärgates tunne nälga ja nälja leevendamiseks peame sööma. Sama tunne valdab meid mõne

tunni pärast jälle. Ja nii päevast päeva kuni elu lõpuni. Kui me ei sööks, siis järgneks paratamatu surm juba ühekahe kuu pärast. Selle ajaga ammenduvad meie sisemised energiavarud, organism sööb piltlikult öeldes ennast ise ära. Energia olemasolu ja selle pidev organismist läbivool on seega eluks hädavajalikud tingimused.

Käesolev kirjatükk püüabki selgitada elu ja energia vahelisi keerulisi seoseid, mida uurib teadus nimega bioenergeetika. Mõistagi saab siin tegemist olla vaid linnulennulise ülevaatega. Seda enam, et tiivustatuna bioloogia suurtest edusamudest areneb edasi ka bioenergeetika ning põhjalikku uurimist väärivaid küsimusi tekib aiva juurde.

MIS ON ENERGIA

Kummaline küll, kuid vaatamata selle sõna igapäevasele kasutamisele ei tea me päris täpselt, mis asi see energia ikkagi on. Vaatame, mida ütleb selle kohta kõiketeadja Eesti Entsüklopeedia. Energia on kõigi füüsikaliste objektide (osakeste, kehade, väljade) liikumise üldine mõõt; kitsamas mõttes suurus, millega mõõhtub objekti võime teha tööd. Kas sai selgemaks? Nii on see paraku paljude väga üldiste nähtustega, sh elu mõtte ja teadvuse olemuse määratlemisega. Parema puudumisel püütakse siis uuritava nähtuse olemisvormi võimalikult üksikasjalikult kirjeldada, lootuses, et see aitab kaasa tema olemuse sügavamale mõistmisele.

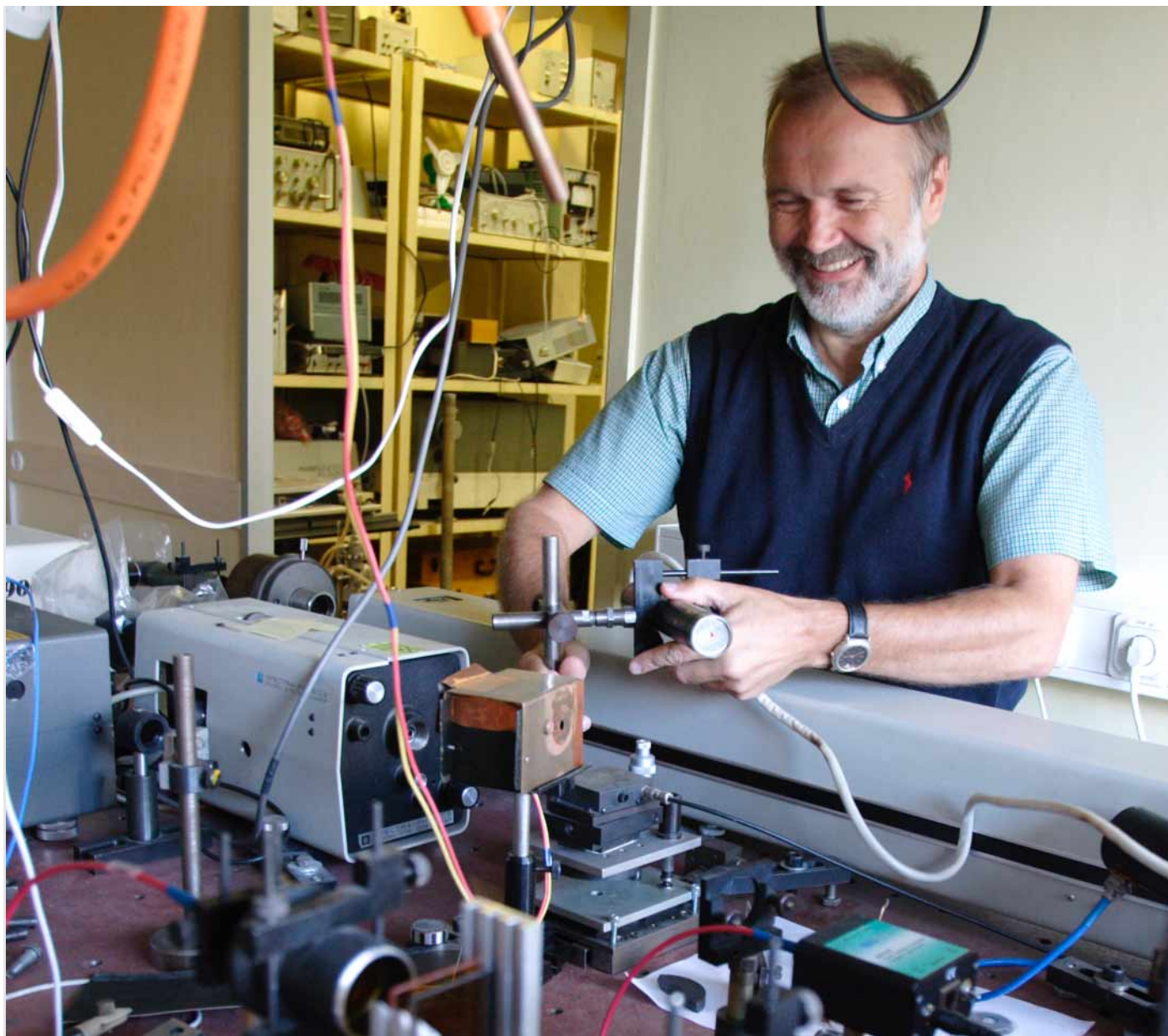
Arusaamine energiast on aegade jooksul pidevalt muutunud. Inglise füüsik, astronoom ja matemaatik Isaac Newtoni (1643–1727) mehaanika käsitleb energiat kui liikuvate masside omadust. 19. sajandil sai energiast ühenduslülil kolme tormiliselt areneva teadusharu – termodünaamika, keemia ja elektromagnetismi – vahel. Järgnev 20. sajand tõi kaasa veelgi põhjapanevamad avastused. Kõige



Energia mõõtühik on J (džaul). Üks džaul on ligilähedaselt ekvivalentne tööga, mida peab tegema 100 g õuna tõstmiseks maast 1 m kõrgusele.

Elektromagnetlainete, sh valguse levimise kiirus (vaakumis $c \approx 300\,000\,000\text{ km/s}$) on füüsikaliste mõjude levimise suurim kiirus.

Plancki konstant ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$) seob füüsikalise objekti laine- ja korpuskulaarseid omadusi.



pealt sidus Saksa füüsik Albert Einstein (1879–1955, Nobeli preemia 1921) geniaalselt lihtsa erirelatiivsusteooria valemiga $E = mc^2$ energia (E) ja massi (m). Konstant c selles valemis märgib valguse kiirust vaakumis. Tegemist on väga olulise nihkega füüsilise maailma olemusest arusaamises. Varem mõeldi, et mis ka ei juhtuks, protsessis osalejate energia ja eraldi nende mass jäävad samaks. Tegelikult ei saa üht teistest eristada ning kehtib ühtne energia ja massi jäävuse seadus. Seejärel lõhkus Saksa füüsik Max Plancki (1858–1947, Nobeli preemia 1918) samavõrd geniaalne kvantmehaanika valem $E = h\nu$ tavaarusaama energia pidevusest. Tuleb välja, et energia esineb vaid portsjonite ehk kvantidena, mis on võrdeline energiavälja seisundeid iseloomustava

sagedusega ν . Võrdelisustegurit h nimetatakse Plancki konstandiks. Tänapäeval teab neid valemid iga koolipoiss või on neist vähemalt midagi kuulnud. Esimene valem on aluseks meie ettekujutustele makrokosmosest koos kõigi planeetide, tähtede ja galaktikatega, teine aga mikrokosmosest, st molekulide, aatomite ja veel väiksemate osakeste maailmast.

Energia eksisteerib kõige erinevates vormides. Näiteks gravitatsiooni, soojuse, valguse, tuumaenergia jne kujul. See on nähtavasti ka energia mõiste raske hoomatavuse üks peamisi põhjusi. Tuleb märkida, et keemiline energia, mis eluslooduse seisukohalt omab esmajärgulist tähtsust, mida ka antud loo pealkirjaga on tahetud rõhutada, on laiemast perspektiivist lähtudes üsna mar-

ginaalne energialiik. Universumis tervikuna domineerib gravitatsioon. Iga mass, ka kõige pisem, evib gravitatsioonienergiat. Piisavalt suure massi korral aga ületab gravitatsioon kaugelt kõikide teiste energialiikide panuse.

Gravitatsioonienergia võib massi kokkutõmbel ehk kollapseerumisel oma vormi muuta, muundudes näiteks valguseks või soojuseks. Vee langemist hüdroelektrijaama tammilt Maa keskmeele veidi lähemal asuvatele turbiinilabadele võib muuseumis käsitleda kui tammi kõrgusega reguleeritud gravitatsioonilist kokkutõmmet. Samas illustreerib langeva vee abil elektrienergia tootmine suurepärast ühe energiavormi (gravitatsiooni) teiseks (elektrienergiaks) muundumist. Olgu lisatud, et Päikese termo-

tuumareaktsioone toidab samuti gravitatsioon.

Katseliselt on tõestatud, et ükski reaalselt toimuv energiamuune pole täielik. Mingi osa energiast läheb ikka kasutult raisku. Umbes kolmsada aastat tagasi alanud tööstusrevolutsioon ja aurumasinate laialdane rakendamine teadvustasid esmakordselt selle probleemi.

TÖÖ JA SOOJUS

Igasuguse masina mõte on tööd teha. Niisamuti võiks öelda bioloogilise organismi kohta, sealjuures masinat ja organismi siiski samastamata. Tööks on vajalik millegi, näiteks aine osakeste sidusliikumine. Just elektronide, aatomite, molekulide jne liikumise kooskõralisus ehk koherentsus vastandab töö soojusele, mida iseloomustab osakeste igasuunaline ehk kaootiline liikumine.

tuuride suhtest. Mida kõrgem on töökeha, nt auto mootoris põlevate gaaside temperatuur, seda kõrgem on kasutegur ja vastupidi. Tulemus on ühtviisi hästi rakendatav nii ajaloolistele aurumasinatele kui ka ultramoodsatele Vormel 1 autode jõuallikatele. Tänapäevaste sise-põlemismootorite kasutegur ulatub harva üle 45 protsendi, olles määratud mootori valmistamiseks kasutatavate materjalide (tavaliselt metallide sulamid) termiliste omadustega.

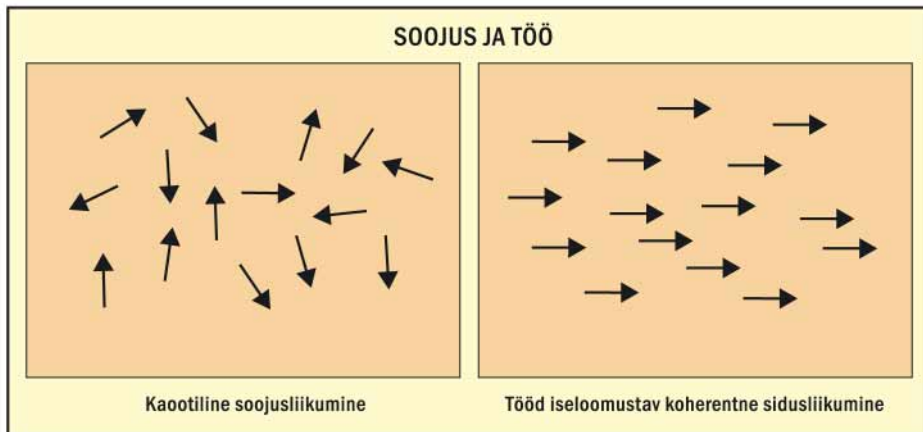
ENERGIA JA ENERGIA ON VAHE. ENTROOPIA

Kuigi viimasest lausest võiks välja lugeda varjatud etteheidet materjaliteaduse kehvale järjele – oleks meil paremad materjalid, võiksime kasuteguri kohe saja protsendi peale upitada! – pole see vähemalt antud kontekstis kuidagi

keeles – vabadusastmeid. Termodünaamiliste vabadusastmete arv on suurusjärjus $3N_A$, kus N_A on Avogadro (Itaalia füüsik Amedeo Avogadro, 1776–1858) arv. Mida rohkem on “asjade” võrdväärseid jaotusvõimalusi ruumis, seda hajuvam on “asi” ja vastavalt madalam tema kvaliteet. Madalamale kvaliteedile vastab kõrgem entroopia. Kõik protsessid universumis kulgevad entroopia kasvu suunas, mitte kunagi tagurpidi. Tasakaaluseisund on maksimaalse entroopiaga, st suurima tõenäosusega makroskoopiline olek, mis ajas ei muutu, ükskõik kui kaua me ka ei ootaks.

Entroopia mikroskoopilise tõlgenduse andis Austria füüsik Ludwig Boltzmann (1844–1906) valemiga $S = k_B \ln W$, mis muuseas on raiutud ka tema Viinis asuvale hauasambale. Selles valemis tähistab W süsteemi vabadusastmete arvu ja k_B on Boltzmanni konstant. Pangem tähele, kui hämmastavalt lihtsad on kõik suured füüsikavalemid – jälle vaid paar-kolm omavahel korrutatud sümbolit.

Erinevatest energialiikidest on kõige kõrgem kvaliteet gravitatsioonil. Soojusenergia on tunduvalt madalama väärtusega, mis aga tõuseb koos temperatuuriga. Kõrgema väärtusega energiat saab piiranguteta madalama tasemega energiat vastu välja vahetada, kuid mitte vastupidi. See ongi soojusmasinate ja teiste energiakonverterite piiratud töövoime tegelik põhjus.



Aurumasin teeb tööd, muutes aurukatlas põleva kütuse (puit, kivisüsi jms) keemilise energia silindris asuva kolvi liikumise mehaaniliseks energiaks. Loodus on soojusmasinate efektiivsusele seadnud ranged piirid. Noorelt surnud Prantsuse sõjaväeinsener Nicolas Carnot (1796–1832) tõestas, et soojusmasinate maksimaalne kasutegur on määratud valemiga

$$k = \left[1 - \frac{T_0}{T_k} \right] \times 100\%,$$

sõltudes vaid töökeha (T_k) ja ümbritseva keskkonna (T_0) absoluutsete tempera-

õigustatud. Piirangud energiamuundele on põhimõttelised, mitte tehnilist laadi.

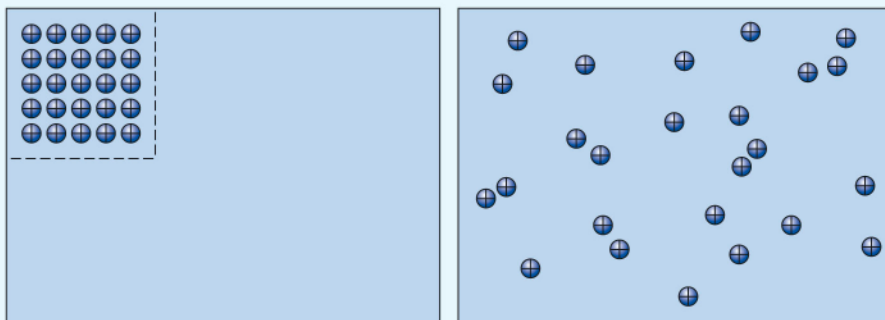
Termodünaamika sätestab, et lisaks hulga iseloomustab energiat ka tema kvaliteet. Seda kvaliteeti iseloomustavat suurust kutsutakse entroopiaks ja tähistatakse tähelga S . Entroopia ei ole “asi” sarnaselt ainele ja energiale, vaid arv (matemaatiline sümbol), mis mõõdab kuidas “asjad” on ruumis jaotunud. Ainult et ruumi tuleb siin hästi vabameelselt suhtuda. Sellel ruumil on erinevalt tavaruumi kolmest mõõtmest astronoomiliselt palju koordinaate, füüsikute

Soojusmasinad on sarnaselt aurumasinale masinad, mis töötavad temperatuuride vahe arvel. **Soojusmasina kasutegur** on kasulikuks tööks muundatav soojusenergia osa. **Absoluutne temperatuur** on temperatuur, mida loetakse absoluutsest nullpunktist. **Absoluutse temperatuuri T ja Celsiuse skaalaga määratud temperatuuri t vahel kehtib seos $T = t + 273,15$. Absoluutset temperatuuri mõõdetakse kelvinites (K).**

Mool on aine hulga ühik; aine hulk, mis sisaldab niisama palju struktuuriüksusi (nt aatomeid, molekule, ioone), kui on aatomeid 0,012 kg süsiniku isotoobis ^{12}C . **Avogadro arv**, $N_A \approx 6 \cdot 10^{23}$, tähistab osakeste arvu ühes moolis aines. **Boltzmanni konstant**, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, avaldub universaalse gaasikonstandi R (mis võrdub ühe mooli gaasi paisumistõuga isobaarilisel soojendamisel ühe K võrra) ja Avogadro arvu jagatisena. **Kontsentratsioon** on intensiivne mõiste, mis mõõdab millegi hulka ruumalaühikus (nt energia puhul J/m^3).

Asjakohane näide entroopiateema kinnistamiseks on esitatud joonisel – tegemist võib olla kas aine (nt parfüümi molekulide) või temperatuuri (mis iseloomustab osakeste liikumise keskmist kineetilist energiat) ebaühtlase ruumilise algjaotuse hajumisega. Ruumi on siin lihtsustatult kujutatud kahemõõt-

AINE JA ENERGIA JAOTUMINE RUUMIS



“Aeg parandab kõik haavad,” ütleb rahvatarkus. Ja tõsi see on, aine ja energia, mis algselt on koondunud ruumi ülemisse nurka (vasakpoolne pilt), hajub iseenesest aja jooksul ruumis ühtlaselt laiali (paremal).

melisena. Laialivalgumine on pöördumatu selles mõttes, et ebahütlase jaotusega (st madalama entroopiaga) algseisund enam kunagi ei taastu. See vastab meie praktilisele kogemusele, et elektrivõrgust välja tõmmatud triikraud alati jahutub. Mitte keegi, mitte kusagil ja mitte iialgi ei ole ootamatult kätt põletanud juba jahutunud triikrauaga. Pole ka vähimatki põhjust karta, et see võiks meiega kunagi juhtuda. Kirjeldatud iseenesliku hajumist kutsutakse difusiooniks. Difusioon on kiireim suurima aine ja energia kontrastiga ruumipunktides.

MIDA ME IKKAGI TARBIME

Me oleme harjunud rääkima energia tarbimisest. Samuti pillasime kusagil väite, et igasugusel energiamuundel läheb osa energiast paratamatult raisku. Kas see ei käi vastu koolis korduvalt rõhutatud ja seepärast loodetavasti hästi meelde jäänud tõele, et energiat ei teki üheski protsessis juurde, aga seda ei saa ka ära kaduda (muidugi ühes Einsteini tehtud üldistusega massi suhtes)? Vastuolu siin siiski ei ole. Energia hulk universumis tõepoolest ei muutu. Kuid ükski seadus ei keela selle lokaalset – nii koha kui ka aja mõttes – vähenemist või suurenemist, kui just ei ole tegemist tasakaalulise olukorraga. Just äsja nägime, et kontsentratsioonide erinevuste silumine toimub spontaanselt, ilma igasuguse välise surveteta. Kontsentratsioonide ühtlustumise käigus aga lisandub teatud piirkonda-desse energiat ja ainet, samas teisel vähenedes.

Täiskasvanud elusorganismid reeglina vaid töötlevad, mitte ei tarbi energiat. Seda on korduvalt kontrollitud. Toiduga omandatud energia on ilma välist tööd tegemata täpselt võrdne organismi laguproduktide ja hajunud kehasoojuse summaarse energiaga. Energia tarbimise

all tuleb niisiis eelkõige mõista energia kvaliteedi, s.o entroopia tarbimist, sest keskkonda tagastatava energia väärtus on toidu omast madalam.

Heidame pilgu toodud skeemile. Energia voolab pilgu toodud skeemile. Energia voolab meist läbi nagu vesi jõesängist. Kui aga vett näiteks tammiga tõkestada, samal ajal pealevoolu reguleerimata, tekib üleujutus. Samas võib veele täiendavaid äravooluvõimalusi pakkudes jõe päris kuivaks lasta. Kahjuks on seda põllumaade niisutamise tuhinas ka juhtunud. Vajadusest rohkem süües kasvab seepärast paratamatult ka meie kaal. Üleliigne energia talletub organismis energiarikaste suhkrute, rasvade ja valkude kujul. Nälgides võime neist ladestutest jälle lahti saada. See ongi kogu tööde kaalu jälgimisest.

Üks märkus ka elutegevuse jääkide kohta. Ei ole õige neid täiesti kasutuks

pidada, ehkki jääkide kvaliteet on vastavalt entroopia kasvu seadusele alati esialgse toidu väärtusest madalam. Võtame näiteks vanade autode müügi või Eestis praegu ülipopulaarsed “kaltsukad” – kasutatud riiete poed. Samuti nagu autodel ja riietel on kellegi jaoks oluline jääkväärtus, leidub ka looduses erineva kvaliteediga toiduga kohastunud isendite kooslusi, kes seeläbi on oma ökoloogilise niši leidnud. Loodus valehäbi ei tunne. Tegemist on säästliku majandamisega parimas mõttes.

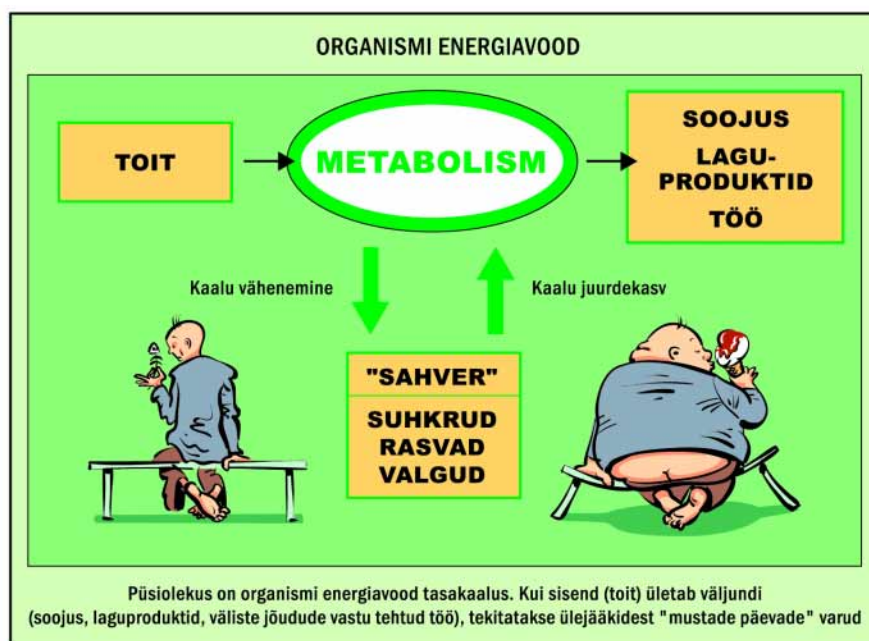
Biosfäär ehk elukeskkond on Maa sfäär (sh õhk, pinnas ja vesi), mida asustavad organismid.

Metabolismiks ehk ainevahetuseks nimetatakse protsessi, mille abil loomad ja taimed omastavad toitu ja vabastavad neis sisalduva energia.

Karbohidraadid ehk süsivesikud ehk sahhariidid on suhkru ja suhkrusarnaste ühendite üldnimi (nt glükoos keemilise valemiga $C_6H_{12}O_6$). Esimesena lagundas tärklise suhkruks Vene keemik Gottlieb Kirchoff 1812. a. Tärklis avastati Indias 400 a eKr, levis araablaste kaudu Läände ja toodi alles ristsüüdiate poolt Euroopasse.

Lipiidid (nende hulka kuuluvad ka rasvad) on vees lahustamatud ained, mida kõrgemad organismid kasutavad biosünteesis energiaallikana või keha ehitusmaterjalina (nt $C_{57}H_{104}O_6$).


Valgud ehk proteiinid on aminohapetest koosnevad biopolümeerid (nt $C_{1864}H_{3012}O_{576}N_{468}S_{21}$).



MILLEKS KULUB MEIE ENERGIA

Heatahtlik lugeja, kes siiani on vapralt vastu pidanud, arvatavasti juba teab, et elus püsimiseks tuleb vahetpidamata pingutada, st energiat kulutada. Lisatud tabel kirjeldab umbes 80-kilogrammise massiga inimese keskmist energiatarvet erinevate tegevuste puhul. Mida me sellest tabelist peaksime kõrva taha panema? Kõigepealt seda, ja see kinnitab ülalöeldut, et isegi puhkus nõuab märkimisväärselt palju energiat. Kui me päeva jooksul midagi ei teeks ja üksnes magaksime, saaksime toidu arvelt vaid veerandi kokku hoida. Üsna ootuspäraselt tõuseb energiatarve füüsilise aktiivsuse korral märgatavalt – käimise puhul näiteks peaaegu kolm korda. Jagades energiakulu sekundite arvuga ööpäevas, saame $9\,450\,000\text{ J}/86\,400\text{ s} = 109,4\text{ W}$, mis näitab, et inimese võimsus vastab umbes 100-vatise elektripirni võimsusele. Hobune on inimesega võrreldes pea seitse korda jõudsam ($1\text{hj} \approx 736\text{ W}$).

MEIE IGAPÄEVANE ENERGIAKULU



| Tegevus | Kestvus tundides | Energiakulu (kJ) |
|--------------|------------------|------------------|
| Lamamine | 9 | 2700 |
| Istumine | 10 | 3540 |
| Selsmine | 2,5 | 1200 |
| Käimine | 2,5 | 2010 |
| KOKKU | 24 | 9450 |

Mis töö see on, mida ei saa hetkekski edasi lükata ja mille tegemiseks peab une ajalgi rabama? Kõigepealt tuleb pidevalt töös hoida nn suured pumbad – süda ja kopsud. Need ringitavad verd ja kindlustavad organismi gaasivahetust. Veri kannab toitaineid ja hapnikku kõikide keharakkudeni ning ühtlasi vabastab nad ainevahetuse jääkproduktidest. Samuti peavad kogu aeg “lööma” väikesed pumbad, mis reguleerivad ionide

konsentratsiooni rakkudes ja närvi kanalites. Edasi tuleb ikka ja uuesti mitmesuguseid aineid sünteesida. Hommikul ärghates pole meie keha kunagi päris seesama, mis eelmisel öhtul magama heites. Iga päev saavad tuhanded DNA-ahela nukleotiidid erinevatel põhjustel kannatada ja vajavad kohest väljavahetamist. Lisaks uuendatakse igapäevaselt ligi kaheksa protsenti kõikidest valkudest. Kord kahe nädala tagant oleme seega nagu uuesti sündinud. Seegi pole veel kõik. Organismi keerukus nõuab kõrgel tasemel juhtimist ning häireteta infoteenindust. Raku jaoks on see üks (energia)kulukamaid tegevusi.

RAKU ENERGIALLIKAD

Kust võetakse selleks tööks vajalik kõrge väärtusega (loe: konsentratsiooniga) energiat? Erinevalt soojusmasinatest ei saa rakud ja ka suuremad organismid tööd teha soojuse ülekande arvel, sest nende kõik osad omavad lähedast temperatuuri. Sellise tegevuse kasutegur oleks nullilähedane. Ei tule arvesse ka töö rõhkude vahe arvelt, sest atmosfääri rõhk on organismi piires praktiliselt ühesugune.

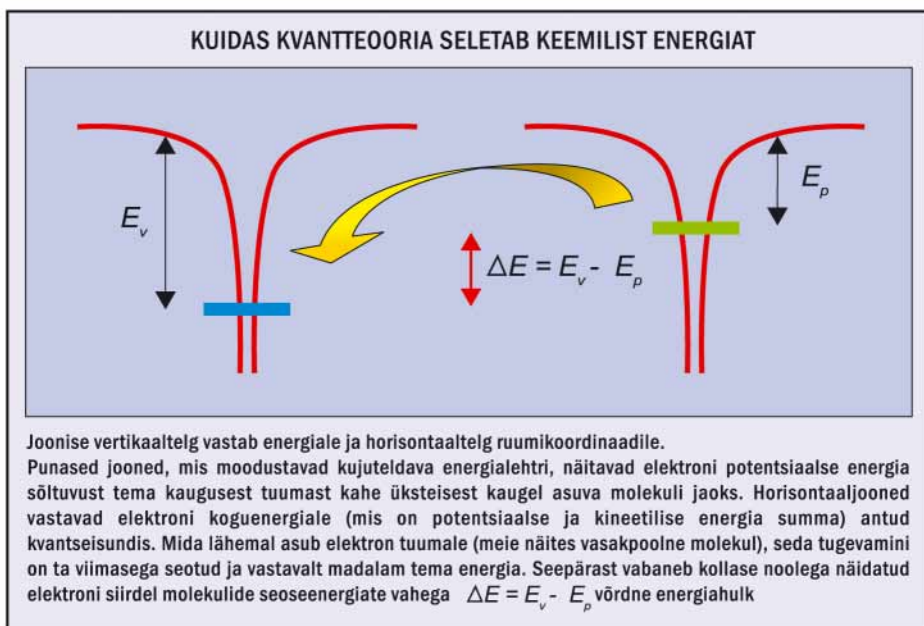
Tegelikult me juba teame, et see energia tuleb toidust. Imetajate, sh inimeste toidu põhikomponentideks (vett arvestamata) on suhkur, rasv ja valgud. Nendes ühendites akumulierenud energia vabaneb hapnikuga reageerimisel ehk põlemisel. Nüüd saab ka selgeks, miks me vahetpidamata õhku peame sisse hingama. Ikka selleks, et hapnikku ammutada. Toidu põlemist võib kirjeldada järgmise



kokkuvõtva võrrandiga
 $\text{toit} + \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{energia}$.

Samamoodi põlevad kõik orgaanilised kütused, sh puud meie kaminaahjus. Muuseas vabaneb igasuguse toidu põlemisel ligikaudu ühepalju energiat ühe liitri kasutatud hapniku kohta. See võimaldab hapniku tarbimise kaudu suhteliselt lihtsalt organismi summaarset energiakasutust hinnata.

Toodud brutovõrrand ei ütle midagi energia mikroskoopilise olemuse kohta. Siin tuleb appi kvantteooria. Energiat vabaneb, kui elektronid reaktsiooni käigus liiguvad kõrgema energiaga molekulidelt madalama energiaga molekulidele (vt joonisel siis paremalt vasakule). Selle siirde käigus vabaneb osa molekulide keemilistes sidemetes salvestunud energiast. Seepärast kutsutaksegi seda energiat suupäraselt keemiliseks energiaks. Vastupidises protsessis, st kui elektron liigub madalamalt kõrgemale nivoole, energia neeldub. See on n-ö idee tasemel käsitlus, tegelikult on kõik muidugi palju keerulisem.



TOIDUAINETE JA KÜTUSTE KÜTTEVÄÄRTUSI



Energiasisaldus (kJ/kg)

| | |
|--------------------|----------|
| Rasvad | 40 000 |
| Valgud | 24 000 |
| Suhkur | 17 000 |
| Leib | 9000 |
| Liha | 7500 |
| Piim | 3000 |
| Aed- ja juurviljad | 600-2000 |
| Vesinik | 143 000 |
| Maagaas | 55 000 |
| Kivisüsi | 33 000 |
| Etüülalkohol | 30 000 |

Tabelis on võrreldud erinevate toiduainete ja kütuste ühe massiühiku (1 kg) energiasisaldust. Näeme, et dietoloogide soovitusel süüa vähem rasvarikast toitu ning rohkem rõhuda aed- ja köögiviljadele on tõepõhi all. Rasvade energiasisaldus on isegi kivisüsi omast suurem. Arvestades ööpäevast energiakulu, võime ilma tüsenemist kartmata süüa üle viie kilogrammi aed- ja juurvilju, kuid üksnes umbes veerand kilo Krakovi vorsti.

Põlemise jääkproduktideks on vesi ja süsihappegaas. Kui vesi on kahjutu, siis süsihappegaas on mürgine ning tuleb organismist kiiresti välja viia. Süsihappegaas on ka nn kasvuhoonegaas. Seepärast kujutab fossiilsete kütuste, sh põlevkivi intensiivne põletamine kasvuhooneefekti näol keskkonnale suurt ohtu. Seda probleemi on eesti keeles hiljuti ülevaatlikult käsitletud Kalju Eerme (vt loe veel). Muide, energiatootmisega seotud süsihappegaasi kontsentratsiooni kasvust tingitud kasvuhooneefekti ennustas juba enam kui sada aastat tagasi teoreetiliselt ette rootslasest füsikokeemik Svante Arrhenius (1859–1927, Nobeli preemia 1903). Järjekordne näide süvateaduse suurest rakendusväärtusest, mida aga millegipärast ikka ja jälle kiputakse ära unustama.

Energia hankimine on vaid pool muret. Elukogenud talumees teab, et

signa veristades ei või kogu liha kohe pannile panna ja ära süüa. Osa tuleb pütti soolata, kust seda siis vajadusel leivakõrvaseks lauale võetakse. Rakk toimib sama targalt. Märkimisväärne osa toidust saadud keemilisest energiast kasutatakse kõrge siseenergiaga molekulide sünteesiks. Tuntumaid neist on adenosiin-trifosfaadi molekul (ATP), aga on ka teisi, nt taimedes oluline NADPH. Ühe mooli ATP hüdrolyüsil ehk vee toimel lagunemisel vabaneb umbes 30 kJ energiat. Põhiliselt seda energiat kasutabki rakk kõivõimalike elutähtsate protsesside käivitamiseks, mis toimuvad n-õ vastumärgel.

Kuidas sellest aru saada? Kaljunukilt murenendud kivi kukub ilma nähtava välise abita kuristikku. See on selle protsessi kulgemise loomulik suund. Seevastu kivi kuristikust üles vinnates peame pingutama ja tööd tegema. Mõistagi, kivid vastumärgel ei veere. Aga vahel on kive ka mäe otsas vaja. Näiteks kui tahame sinna maja ehitada. Niisamuti on rakul vajadusi, mis iseenesest ei realiseeru. Sellistel puhkudel kulubki märjaks ära ATP energia.

Võtame näiteks protsessi, mida nimetatakse raku energiseerimiseks. See seisneb ioonide ja molekulide pumpamises läbi rakumembraani vastu nende kontsentratsiooni gradienti, st suurema kontsentratsiooni suunas. Me juba teame, et loomuldasa aine vaid hajub, pürgides ühtlase ruumilise jaotuse poole. Selle suuna vääramine nõuab vaeva ehk energiat. Energiseerimise tulemusel sal-

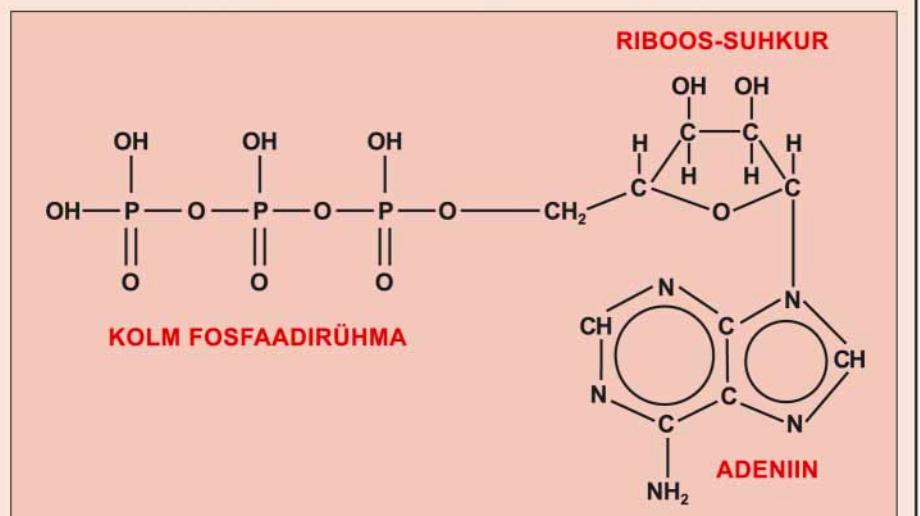
ENERGIA OLEMASOLU JA SELLE PIDEV LÄBIVOOL ORGANISMIST ON ELUKS HÄDAVAJALIKUD TINGIMUSED.

vestatud raku energia vabaneb hiljem juba loomulikus, st kontsentratsiooni vähenemise suunas toimuvates reaktsioonides, tehes omakorda tööd teiste vajalike mittesontaansete protsesside vedamisel.

ATP molekulile võib niisiis võrrelda universaalse valuutaga, mida biokeemilisel rahaturul aktiivselt erinevate vääringute vastu konverteeritakse. Mis saab aga siis, kui raku akuutne energianälj saab rahuldatud ja energiat ülegi jääb? Ei saa ju lasta seda raisku minna, st soojuseks hajuda. Muidugi mitte, neist jääkidest kombineerib rakk jälle suhkru, rasva ja valgu molekulite. Viimased, õigemini nende keemiliste sidemete energia, moodustavad siis raku pikaajalised energivarud. Nende varude dünaamikat võib igaüks oma kehakaalu muutuste kaudu jälgida. Jooksvateks kuludeks on aga mugavam kasutada ATP molekulides ja membraanipotentsiaalina salvestatud energiat.

Kirjeldatud hapnikukeskkonnas toimuv ehk aeroobne metabolism pole ainuke viis, kuidas rakk energiat hangib. Lisaks toimub kõikides keharakkudes toitainete fermentatiivne lõhustumine, mille käigus samuti energiat vabaneb. Veini käärimine on näide sellisest anaeroobsest metabolismist.

ADENOSIIN-TRIFOSFAADI MOLEKUL



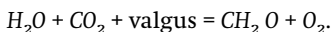
Adenosiin-trifosfaadi (ATP) molekul on raku põhiline energiaallikas, mis koosneb kolmest osast: kolmest fosfaadirühmast, riboos-suhkrust ja DNA molekulist tuttavast adeniinist. Energiat salvestavad eelkõige fosfaadirühmi ühendavad kovalents-sidemed.

BIOSFÄÄRI ENERGIAALLIKAD

Biosfääri energiaallikate, välja arvatud radioaktiivsed tuumkütused, ühiseks lähteks on Päike. Seda ka kitsalt inimese seisukohalt lähtudes. Fossiilsed kütused (nafta, gaas, süsi), nn taastuvad energiaressursid (biomassi, hüdro-, tuule-, jne energia) ja uraan moodustasid 1987. aasta andmetel maailma energiaallikates vastavalt 75, 20 ja 5 protsenti.

Kuidas imetajad päikesepaistest osa saavad, seda illustreerib skeem (vt kõrval). Rohelised taimed toodavad fotosünteesis Päikese kiirguseenergia toel veest ja süsihappegaasist orgaanilisi aineid, eelkõige suhkruid, ja hapnikku. Tõenäoliselt pärinebki kogu Maa atmosfääris leiduv hapnik fotosünteesist. Suhkru põletamisel saadud energia arvel sünteesitakse ATP ja kõik teised kõrgmolekulaarsed ühendid. Aga sellest me eespool juba rääkisime. Taimetoidulised loomad, ka joonisel kujutatud jänes, omastavad taimi süües seal leiduvaid ühendeid ning ammutavad nendest enda elutegevuseks vajalikku energiat. "Looduse kroon" inimene tarbib nii taime- kui ka lihatoitu. Orgaanilise aine ülejäägid ladestuvad maakoos. Nii on aegade jooksul tekkinud kõik fossiilsed kütused, ka Eesti maapõues leiduv põlevkivi.

Naaseme nüüd algusesse ja peatume veidi pikemalt fotosünteesil kui ühel biosfääri tähtsaimal protsessil. Fotosünteesi üldvõrrand on

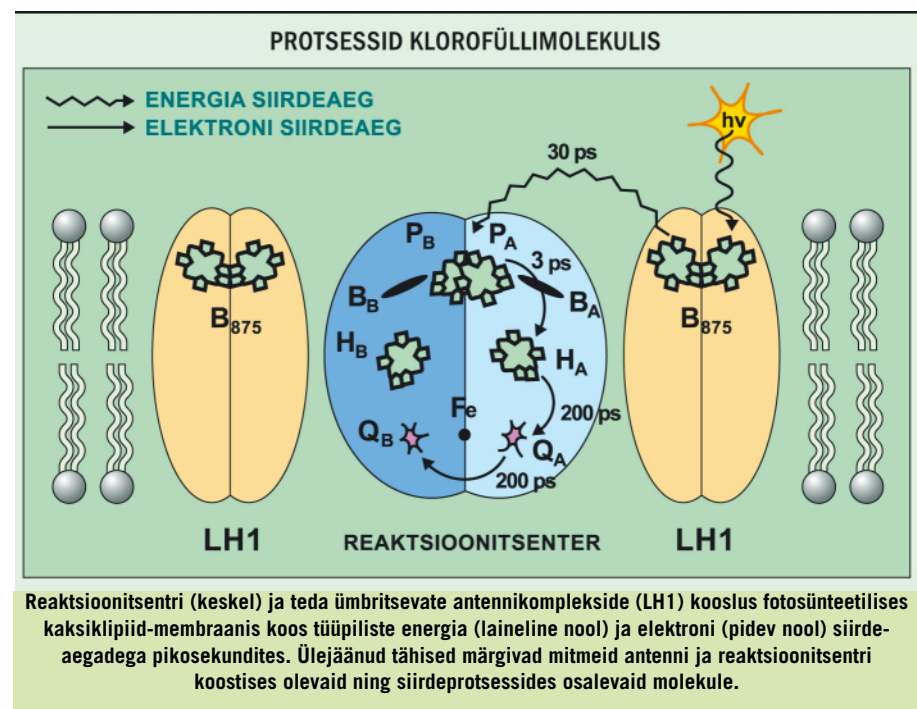
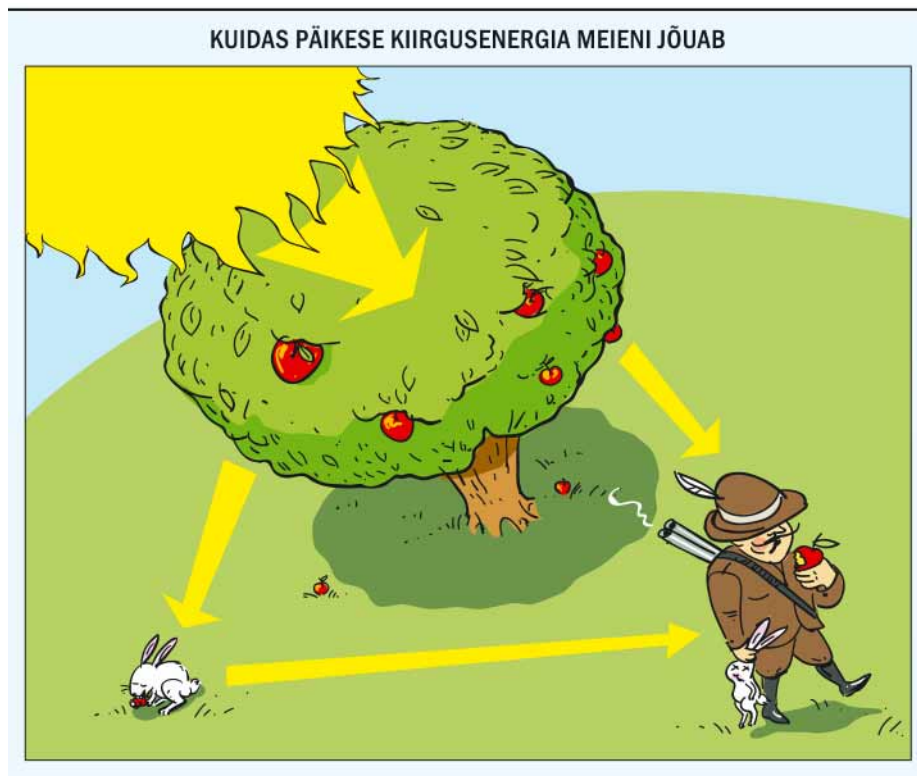


Tähelepanelik lugeja kindlasti juba märkas toidu põlemist ja fotosünteesi kirjeldavate võrrandite suurt sarnasust. Kui lugeda, et toit = CH_2O ja valgus = energia, siis on need kaks võrrandit identsed, kuigi vastupidises järjestuses kirjutatud. Seepärast võime lihtsalt kirjutada

$H_2O + CO_2 + \text{energia} \leftrightarrow \text{toit} + O_2,$ kus vastassuundades osutav nool \leftrightarrow tähistab reaktsiooni pööratavust ehk mõlemale poole kulgemise võimalikkust.

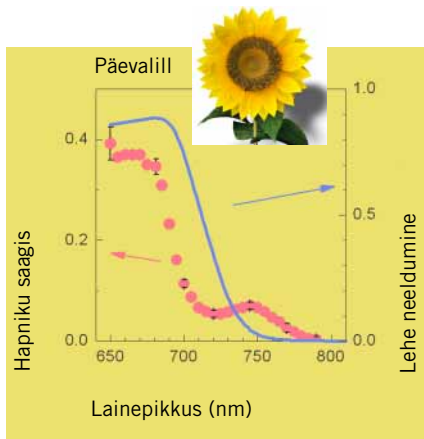
Huvitav on tõdeda, et fotosünteesiks kasutatakse tegelikult üllatavalt väike osa (üksnes $\approx 0,025$ protsenti) Maale jõudnud päikesekiirgusest. Suurem osa neeldub ookeanides ja maapinnas, kus ta soojusena hajub. Ei julgeks küll väita, et kasutult, sest ilma selle soojuseta oleks ookeanid põhjani läbi külmunud ja Maa elamiseks täiesti kõlbmatu paik.

Fotosüntees käivitub hetkest, mil valguskvant ehk foton taimi või siis fotosünteesilise bakteri raku poolt neelatakse. Parima tulemuse saavutamiseks peab valgus neelduma laias spektrivahemikus, et võimalikult suuremat tükki Päi-

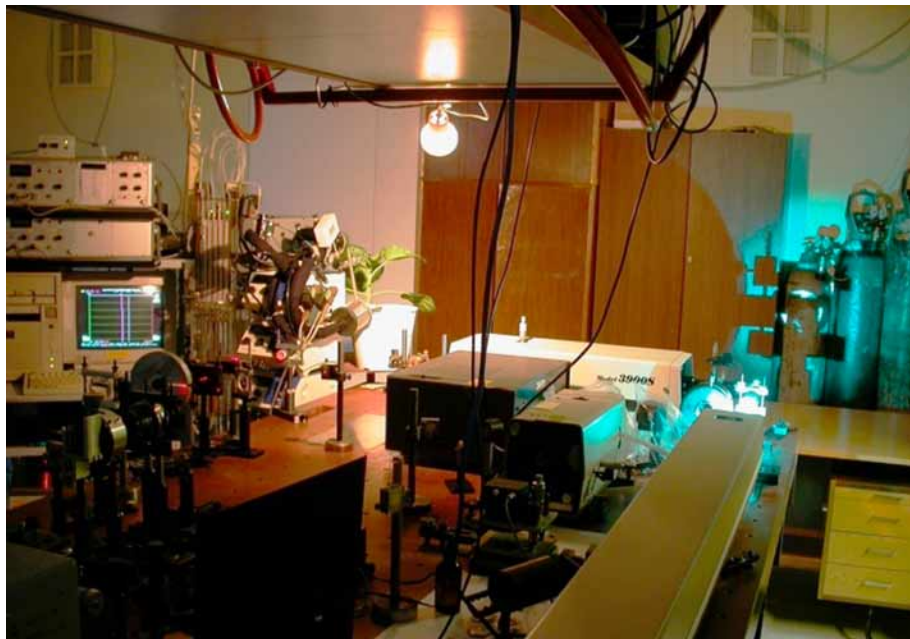


kese kiirguseenergiast ära kasutada. Klorofüllil molekul on taimerakus nagu antenn, mida kasutatakse fotonite kinipüüdmiseks. Nagu satelliittelevisiooni vastuvõtja antenn püüab kinni raadiosignaali ning saadab selle võimendisse, nii toimetab klorofülliantenn fotonite energia fotosünteesilises membraanis asuvasse erilisse kohta, mida nimetatakse reaktsioonitsentriks.

Miks sinna? Aga sellepärast, et klorofüll suudab ergastatud olekut säilitada ainult väga lühikest aega, umbes ühe nanosekundi. See aeg ei ole ATP ja NADPH molekulide sünteesiks küllaldane. Reaktsioonitsentris riburadapidi toimuvad elektronsiirde suudavad aga neeldunud valguseenergiat piisavalt kaua (sadade mikrosekundite jooksul) talletada.



Katse üldvaade Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi biofüüsika laboris koos ämbris kasvava päevalilletaimega (keskel), laseritega ja unikaalse gaasimõõteaparatuuriga vasakul.



VÄRSKEID FOTOSÜNTEESI- UUDISEID TARTUST

Klorofüllimolekulide võime neelata kiirgusenergiat laias spektrivahemikus oli ammu teada. Aga mitte nende fotosünteesilise aktiivsuse pikalaineline serv. Selle piiri määramine oli ikka katsevõimaluste horisondi taha jäänud. Äsja see Agu Laisa ja siinkirjutaja laborite ühisponnistuse tulemusena siiski õnnestus (vt H. Pettai, V. Oja, A. Freiberg, A. Laisk, Photosynthetic activity of far-red light in green plants. BBA-Bioenergetics, On-line from 23 May 2005). Nagu juuresolevalt graafikult võib näha, põhjustab hapniku eraldumist isegi silmaga eristamatu kaugpunane valgus, mis oli suur üllatus. Seni usuti piiri vähemalt 60 nm spektri sinisemal poolel asuvat.

Pöördugem veel kord päris algusesse tagasi ja küsigem, kuidas ikkagi footoni energia klorofüllist reaktsioonitsentrisse jõuab? Teadusilm oli selles küsimuses laias laastus kahte leeri jagunenud. Ühe hüpoteesi kohaselt annab footoni poolt ergastatud klorofüllimolekul oma ergastatuse edasi naabermolekulile ja see omakorda oma naabrile – nagu lapsed telefonimängus –, kuni ergastatus viimaks jõuabki reaktsioonitsentri. Vastaspole mudel räägib kogu molekulidekogumi

ühekorraga ergastumisest, nagu metalli aatomid tinisevas kitarriskeeles.

Tõde pooli ei vali. Tihti asub see kusagil vahepeal, näib et ka seekord. Nimelt ei hakka sadakonnast klorofüllimolekulist koosnev antenn footoni saabudes korraga võnkuma, samuti ei haardu footon vaid ühes molekulis. Tõenäoliselt ergastub samaaegselt kümnekond molekuli. Tekkinud mitmikergastust nimetatakse eksitoniks. Keskkonnale omane soojusliikumine võib viia eksitoni edasisele koondumisele veelgi väiksemal arvul molekulidel. Teadusargoos räägitakse sel puhul eksitoni autolokalisatsioonist. Seda võimalust peeti seni tühihiseks. Tartus õnnestus aga tõestada vastupidist (vt K. Timpmann, Z. Katiliene, N. W. Woodbury, A. Freiberg. Exciton self-trapping in one-dimensional antennas. J. Phys. Chem. 105 (2001) 12223). Fotosünteesiliste bakterite antennis autolokaliseeruvad eksitonid kahe kuni kolme molekuli peale juba 150 femtosekundi ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) pärast. Selliselt kokkusurutud eksiton hakkab siis antennis reaktsioonitsentri poole liikuma, tehes seda kõige lühemat võimalikku teed pidi. Parima raja leidmist soodustavad autolokaliseerumisega kaasnevad muutused eksitoni spektris. Laienenud kiirgusspek-

ter kindlustab parema kattumise naabrite neeldumisspektritega, kiirendades liikumist, samal ajal kui tema punanihe annab energiale vile kindla suuna, otse energeetilisel allamäge asuva tsentri poole.

Leitu täiendab meie ettekujutust fotosünteesist ning võib tulevikus leida ka praktilist kasutamist. Terendava energia-kriisi aimes tuleb kõigepealt meelde tehislilike fotorakkude loomine, mis kasutaksid päikeseenergiat võib-olla võimekamalt kui looduslikud süsteemid.

Lõpetuseks mõõngem, et seotuna valkude võnkeergastustega ja ATP hüdrolüüsil vabaneva energia kaugülekanne kontekstis oli autolokalisatsioonile sarnane mehhanism juba varem tuntud (nn Davõdovi soliton, vt viidet). Teine füüsikateoretik Toyozawa on hiljuti aga veelgi kaugemale läinud, seostades autolokalisatsiooninähtustega lausa elu teket Maal. Mis viitab sellele, et tegemist võib olla väga laialt levinud ja seetõttu põhjapaneva loodusnähtusega. ■

ARVI FREIBERG (1948) on Tartu Ülikooli professor, füüsikainstituudi biofüüsika laboratooriumi ning molekulaar- ja rakubioloogiainstituudi taimefüsioloogia õppetooli juhataja, füüsika-matemaatikadoktor.

LOE VEEL

D. T. Haynie. Biological Thermodynamics. Cambridge University Press, 2003.

K. Eerme. Muutumatu kliima tähendaks ajaloo lõppu. Akadeemia 15 (2003) 2051.

Y. Toyozawa. The origin of life with natural selection. J. Phys. Soc. Japan 69 (2000) 1907.

J. Wrighlesworth. Energy and Life. Taylor & Francis, 1997.

A. C. Davõdov. Solitonõ v bioenergetike. Naukovo Dumka, 1986.

K. Rebane. Energia, entroopia, elukeskkond. Valgus, 1980.

F. J. Dyson. Energy in the universe. Scientific American, Sept. 1971, 51.

Spekter kirjeldab valguse ehk elektromagnetkiirguse intensiivsuse jaotust energiavälja iseloomustava sageduse või lainepikkuse järgi.

Valguse lainepikkust on tema väiksuse tõttu mugav mõõta nanomeetrites: $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$.

Inimese silmale nähtavaks valguseks loetakse kiirgust lainepikkuste vahemikus $380 < \lambda < 780 \text{ nm}$. Seejuures tajume spektri lühilainelist osa sinise ja pikalainelist osa punase värvusena.