

JÜRI ENGELBRECHT

KOMPLEKSSÜSTEEMID meis ja meie ümber

Kogu maailmas pühendatakse üha enam uuringuid komplekssüsteemidele. Tähelepanu on tingitud asjaolust, et inimkond on hakanud aru saama Ameerika kirjaniku ja futuristi Alvin Toffleri kolme aastakümne tagusest hoiatusest. See pärineb saatesõnast Ilya Prigogine'i tervikut käsitlevale raamatule: „Üks kõige arenenum tänapäeva lääne tsivilisatsiooni oskusi on tükeldamine, s.o probleemide lahkamine nende kõige väiksemateks komponentideks. See oskus on meil ülihea. Nii hea, et sageli unustame panna osad tagasi tervikuks.”

Me ei tohiks unustada, et aegajalt tuleb tükid panna kokku tervikuks. Seejuures on sageli tegemist väga keeruliste süsteemidega. Nii võiks kogu kõnealust valdkonda iseloomustada kahe võtmesõnaga – keerukus ja terviklikkus. Pikemalt ja täpsemalt saab need lahti kirjutada järgmiselt.

- Kompleksisüsteem koosneb paljudest seostatud osadest, mis võivad vastastikmõjustuda.

- Kompleksisüsteemis võib esineda kriitilisi olukordi, kus väike välistõuge viib süsteemi tasakaalust välja ja tekitab uue oleku.

MITTELINEAARSETE PROTSSESSIDE ANALÜÜSI KESKUS TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOI KÜBERNEETIKA INSTITUUDIS Centre for Nonlinear Studies



JUHT
Jüri Engelbrecht

AJALUGU

1999 – TTÜ Küberneetika Instituudi mehaanika ja rakendusmatemaatika osakonna juurde luuakse virtuaalne mittelineaarsete protsesside analüüsi keskus. Loojate eesmärk on tihendada sidemeid mittelineaarse dünaamika valdkonnas töötavate uurimisrühmade vahel.

2002–2007 oli CENS üks kümnest Eesti teaduse tippkeskusest.

2009–2011 oli CENS Tallinna Tehnikaülikooli tippkeskus.

2011–2015 on CENS üks kaheteistkümnest Eesti teaduse tippkeskusest, mida rahastatakse Euroopa Regionaalarengu Fondist.

VIIS TÖÖRÜHMA

Neli Tallinna Tehnikaülikoolis:

- mittelineaarne dünaamika (Jüri Engelbrecht)
- lainetuse dünaamika (Tarmo Soomere)
- süsteemibioloogia (Marko Vendelin)
- juhtimissüsteemid (Ülle Kotta)

Üks Tartu Ülikoolis:

- optika (Peeter Saari)

40 teadurit, 30 kraadiõppurit

Aastaaruandeid vt <http://cens.ioc.ee>

CENS-i UURIMISTEMAATIKA VIIS ALATEEMAT

- Mittelineaarne dünaamika ja kompleksssüsteemid
- Lainetuse dünaamika ja rannikutehnika
- Südamelihase rakkude adeniinnukleotiidide kompartmentatsiooni struktuursete ja funktsionaalsete aspektide analüüs
- Keerukate mittelineaarsete juhtimissüsteemide süntees
- Uute optika- ja spektromeetriameetodite arendamine ja rakendamine materjali- ja plasmauuringutes

• Kompleksssüsteemis võib esineda ise-organiseerumist, mis algab lokaalsetest muutustest, kuid süsteemi uue oleku omadused on globaalse iseloomuga.

• Kompleksssüsteem on avatud ja hästi kohanev ning tihti määratud lihtsate reeglitega.

• Muutused kompleksssüsteemis tekiavad kitsas parameetrite vahemikus, nn kaose piiril.

• Kompleksssüsteem on mittelineaarne. Kompleksssüsteemide analüüs on väljunud füüsika ja matemaatika radadelt ning haarab lisaks nii bioloogia kui ka keemia, nii majanduse kui ka sotsiaalteadused. Mittelineaarsete süsteemide uurija Belgiast Gregoire Nicolis on seda nimetanud isegi uueks paradigmaks.

Paar aastat tagasi ütles üks retsen-sent TTÜ Küberneetika Instituudi mitte-lineaarsete protsesside analüüsi keskuse uuringute kohta: „Kui füüsikalised, bio-loogilised või tehnikateaduste problee-mid taandada nende alusmudeliteni, siis on tegemist ainult üsna vähe-se arvu diferentsiaalvõrranditega. Seetõttu on CENS-i tugevus, st sünergia ja lisaväärtus just selles, et on võimalik raken-dada sarnaseid matemaatilisi meeto-deid esimesel pilgul erinevates uuringu-

valdkondades.” Tõepoolest, interdistsipli-naarsus on teadusuuringuid jõudsalt edasi viinud, ehkki teinekord on seda blokeeritud nii meil kui ka laias maa-ilmas väitega, et nii ju ei tehta. Ometi hõlmab kompleksssüsteemide ühing, kuhu ka CENS kuulub, paarisada keskust ja laboratooriumi üle kogu maailma.

Piirimail tekib palju huvitavaid küsimusi

CENS on pea viisteist aastat tegutsenud just interdistsiplinaarselt, sest tradit-siooniliste valdkondade piirimail ker-

kib väga palju huvitavaid küsimusi. CENS-i uuringud asuvadki mehaanika, füüsika ja bioloogia piirimail, haarates nii kompleksssüsteemide analüüsi kui ka juhtimist. Otsapidi on jõutud isegi majanduse modelleerimiseni. Olulisel kohal on olnud matemaatiline model-leerimine, mis on viinud juba nime-tatud väheste võrranditeni. Juhtivat rolli mängib seejuures vastastikmõjude modelleerimine, olgu siis tegemist füüsikaliste ja bioloogiliste struktuu-ride või hoopis väljadega. Kui lisada veel mittelineaarsuse mõju vastastik-mõjudele, siis lisandub üks oluline

aspekt – vähese arvu mudelite analüüs mittelineaarses seades. See omakorda nõuab sobivate meetodite arendamist.

Kuidas kirjeldada protsessi matemaatiliselt?

Omaette küsimus on see, kuidas võrrandile elu sisse puhuda.

Inglise matemaatikaprofessor Ian Stewart on hiljaaegu avaldanud raamatu „Seventeen Equations that Changed the World” („17 võrrandit, mis muutsid maailma”). Jättes kõrvale antiikajast tuntud Pythagorase teoreemi ja Einsteini $E = mc^2$, on Stewarti nimekirjas pool tosinat võrrandit, mis moodustavad CENS-i tegevuse selgroo. Loomulikult pole CENS-i sihiks klassikaliste mudelite uurimine, vaid oluliste protsesside kirjeldamine tänapäevases probleemis. Üks ilmekas näide selles valdkonnas on lainevõrrandi modifikatsioonid ja nende hierarhia.

Seega võib küsimuse püstitada ka nii: kuidas protsessi või nähtust matemaatiliselt kirjeldada?

Kandvad ideed: sisemuutujad ja hierarhiad

Kui rääkida kandvatest ideedest, siis on CENS-is arendatud nn sisemuutujate kontseptsiooni, kus materiaalsete koostisosade mõju on asendatud nende tekitatud väljade mõjuga. See võimaldab üldistada kõiki mudeleid ja leida siis ühiseid meetodeid nende analüüsiks.

Teine kandev idee on olnud hierarhiad, mis reaalsest maailmast mudelite keelde ülekantuna tähendab võrrandite sidumist mastaapidega. Tekivad hierarhilised süsteemid, kus häiritusest sõltuvalt muutuvad oluliseks ühed või teised mudeli osad.

Seega on CENS-i teadlastel teoreetilises plaanis mitmeid uusi mõtteid, mille realiseerimine on andnud asjalikke tulemusi. Aga et jutt liiga kuivaks ei muutuks, vaatame näiteid.

Komplekssüsteemide analüüs on väljunud füüsika ja matemaatika radadelt ning haarab lisaks nii bioloogiat kui ka keemiat, nii majandust kui ka sotsiaalteadusi.

NÄITEID CENS-I TEADLASTE UURINGUTEST

MITTELINEAARNE DÜNAAMIKA: OSAD JA TERVIK

Üks tänapäeval kiiresti arenevaid multidistsiplinaarseid valdkondi on materjaliteadus. Ilmekas näide demonstreerimaks osade ja terviku vastastikmõju on mikrostruktuuriga materjal. Taolisi materjale – sulameid, funktsionaalselt skaleeritud materjale, komposiite ja muid – kasutatakse laialt, mistõttu on oluline teada, kuidas mõjutavad nende komponendid terviku käitumist. CENS on viimasel ajal pööranud suurt tähelepanu lainelevi protsesside modelleerimisele mikrostruktuuriga materjalides: kui materjaliteaduse põhiprobleemideks on materjalide tootmine, struktuur, omadused, käitumine, siis CENS-i vaateväljas on olnud nende käitumine dünaamilistel koormustel ja omaduste määramine. Üheks näiteks on martensiit-austeniit sulamid.

Mikrostruktuursetes materjalides toimuva lainelevi uurimine matemaatiliste mudelitega on osutunud üllatavalt paljulubavaks. Võrrandite hierarhia rakendamine on loonud uue võimaluse mastaabitegurite arvestamiseks. Mittelineaarsuse arvestamine on aga viinud mudeliteni, mis on väga sarnased hüdrodünaamikas rakendatavatele. Seega on mikrostruktuursete materjalidega seotud probleemide analüüsil võimalik kasutada meetodeid, mis on hästi tuntud hüdrodünaamikas.

Teisalt on mikrostruktuuriga materjalides teatud omaduste puhul täheldatud negatiivset grupi kiirust – nähtust, mis avastati esimesena optikas, ja tähendab, et energia levi jääb lainelevist maha, justkui levides vastassuunas. See pole põhjuslikkuse rikkumine, sest termodünaamiliselt on kõik korras. Muide, kui Arnold Sommerfeld ja Léon Brillouin selle nähtuse optikas umbes saja aasta eest avastasid, siis arvati, et tegemist on üksnes matemaatilise kõrvalekaldega.

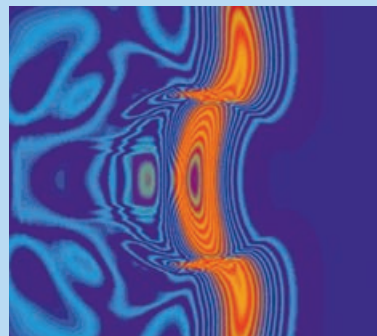
Toodud näited viitavad asjaolule, et tahkised ja vedelikud on teinekord kirjeldatavad sarnaste mudelitega ning ka optika pole neist kuigi kauge valdkond.

Terase martensiitse osa muutumine austensiidis, kui sellest „sõidab üle” deformatsioonilaine

CENS-i uuringud haaravad deformatsioonilainete levi analüüsi. Joonistelt on näha, kuidas deformatsioonilaine ja martensiitse osa vastastikmõju muudab terase martensiitse osa kuju.



Martensiitse osa austeniidis tasakaaluasendis.



Deformatsioonilaine frondid vastastikmõjus martensiitse osakesega.



Martensiitse osa kuju pärast vastastikmõju deformatsioonilainega.



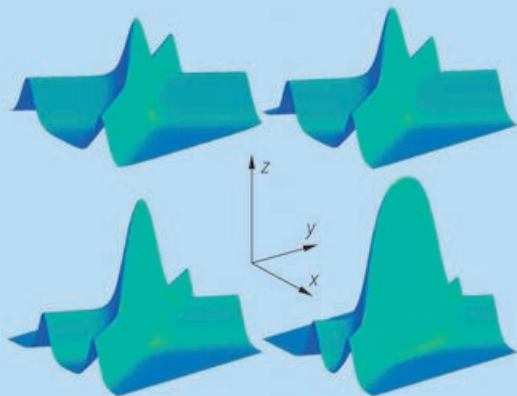
AUSTENIIT – terase või malmi üks struktuuri (tardlahus).
MARTENSIIT – terase/sulami või mõne puhta metalli (koobalti, tsirkooniumi) neljate kristallidega struktuuriosa.

LAINETUSE DÜNAAMIKA: ÜLLATAV SOLITON EHK $1 + 1 = 4$

Teatud tingimustes võib nii vedelikes, tahkistes kui ka optikas tekkida soliton – üksiklaine, millel on lõplik energia ja mis levib oma kuju muutmata.

Veepinnal levivad solitonid viivad aga oma vastastikmõju protsessis üllatavale tulemusele. Nimelt võib sõltuvalt lainete kohtumisnurgast interaktsioonisolitoni amplituud olla kohtuvate lainete amplituudiga võrreldes neljakordne. Ehk teisisõnu $1+1=4$! See on puhas mittelineaarne efekt. Loodus loomulikult aritmeetikat ei tunne, kuid lained käituvad ikka nii.

Kahemõõtmeliste solitonide vastastikmõju veepinnal



Teoreetiline simulatsioon

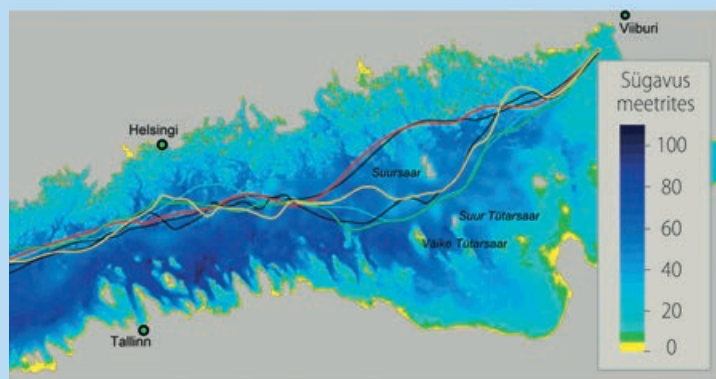


TARMO SOOMERE

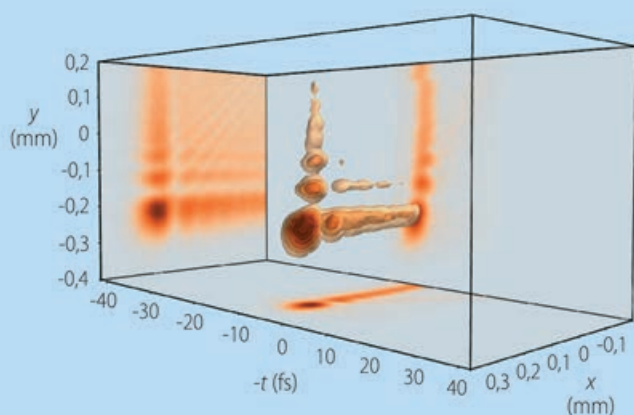
Tegelik interaktsioonisoliton Saaremaa lähistel

Optimaalsed laevateed Soome lahes

Lainetuse mõju sõltub paljudest teguritest – lained veepinnal, tuule mõju, hoovused ja palju muud. Kõik see on äärmiselt oluline näiteks võimaliku reostuse levimisel. Üks CENS-i suure praktilise tähtsusega uurimistulemus ongi seotud optimaalse laevatee määramisega Soome lahes. Eesmärgiks oli maksimeerida võimaliku laevatranspordi reostuse (näiteks õlilekke) randa jõudmise aeg. Tulemuseni jõudmine tähendas võimaliku reostusallika ja selle osakeste trajektooride analüüsi, arvestades kõigi võimalike teguritega.



Airy pulsi momentvõte ja projektsioonid koordinaattasanditel



Ruumiliste solitonidega on üsna sarnased optilised pulsid. Joonisel on näidatud lokaliseeritud ultralühikese lõpliku energiaga Airy pulsi momentvõtet oma isojoontega, mis saadud eksperimendil, kasutades spetsiifilist läätse süsteemi. Tegemist on keerulise dispersiooni ja mittelineaarsusega. Füüsika töötab ikka sarnaselt, mis sellest, et keskkonnad, kus lained levivad, erinevad.

MIS ON MIS



AIRY PULSS – valguslaine, mis praktiliselt ei allu difraktsioonilisele laienemisele.

KEERULISEMA STRUKTUURI POOLE

Üks mittelineaarsete protsesside omadusi on lokaliseerumine. Samal ajal on paljud protsessid kaldu teisele poole, mis tähendab keerulisema struktuuri teket, olgu selleks siis turbulentne segunemine, pinnavorimide kujunemine või perkolatsiooniprotsessid (vedeliku voolamine tõketega või granulaarses keskkonnas). Niisuguseid nähtusi iseloomustab parameetrite äärmiselt lai muutumisvahemik.

Nii näiteks võib inimest kui inimühiskonna-nimelise komplekssüsteemi elementi iseloomustada tema aastasteenistuse abil, mis võib varieeruda sadadest kuni miljonite eurodeni. Sedalaadi nähtuste kirjeldamisel kasutatakse laialdaselt astmeseadusi ning oluliseks muutuvad astmenäitajad.

Paljudel niisugustel juhtudel on tegemist fraktaal-

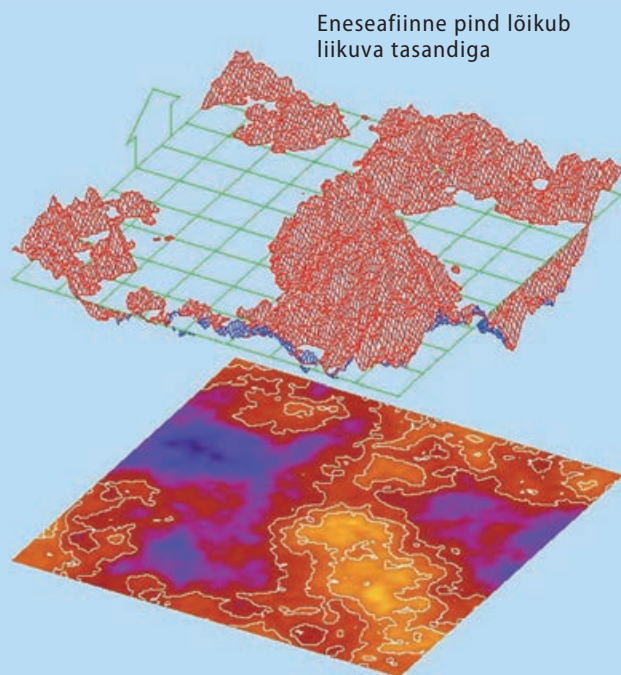
sete struktuuridega – struktuuridega, mille suurus (mass) on võrdeline mittetäisarvulisse astmesse võetud lineaarmõõtmega (näiteks läbimõõt); sellisel juhul nimetatakse seda murrulist (või isegi irratsionaalset) astmenäitajat fraktaalseks dimensiooniks.

Fraktalid on teatavasti enesesarnased struktuurid, mille suurendamisel ilmnevad samasugused struktuurid, näiteks rannajoon. Enesesarnasuse üldistus on eneseafiinsus – juhtum, kui algsega sarnase pildi saamiseks tuleb eri suundades võtta erinev suurendus (näiteks vertikaalsihis kaks korda ja horisontaalsihis kolm korda). CENS-is on selle valdkonna jaoks tuletatud universaalne valem, mis on rakendatav näiteks nii reostuse levi analüüsimisel kui ka nanotorude tootmise juures.

Fraktaalse eneseafiinse pinna lõikumine tasandiga

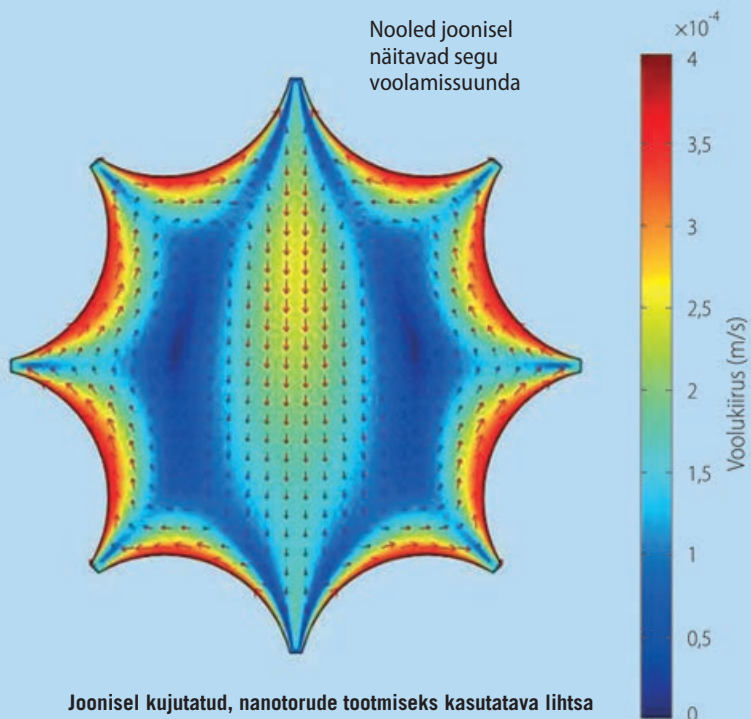
Taoline analüüs on oluline turbulentse segunemise korral, nii passiivse skalaari, nagu näiteks reostuse levi modelleerimisel mitmetel voolutingimustel, kui ka tehnoloogilistes protsessides sobiva segamise tuvastamiseks. Niisugune probleem kerkib näiteks nanotorusid sisaldava materjali tootmisel, kus komponentide optimaalne segamine väldib klombistumist. CENS-i uurimistöö selles valdkonnas on näidanud, et teoreetilised ennustused on heas kooskõlas numbriliste simulatsioonidega.

Nanotorude tootmiseks kasutatava segisti ristlõige



Eneseafiinne pind lõikub liikuva tasandiga

Ühisosa on kujutatud valge kontuurjoonena



Nooled joonisel näitavad segu voolamissuunda

Joonisel kujutatud, nanotorude tootmiseks kasutatava lihtsa segisti ristlõige tagab nanotorude tootmisel kasutatavate komponentide võimalikult ühtlase segunemise.

UUED RAKENDUSED: FOTOELASTSUSMEETODID

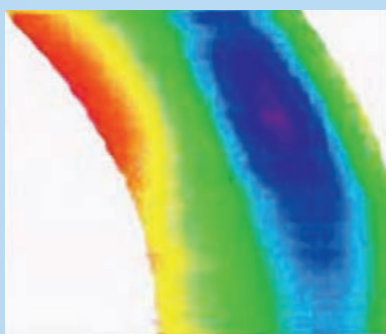
Lained ja väljad kannavad infot materjali või konstruktsiooni kohta. Üks oluline küsimus on, kuidas määrata sisepingeid, mis tekkinud kas tehnoloogilises protsessis või eelnevate koormamiste käigus. Üks CENS-i välja-paistvaid uuringusuundi on fotoelastsusmeetodite arendamine, sellega alustati juba rohkem kui poole sajandi eest. Fotoelastsuse põhiidee on valgusvälja interaktsioon pingeväljaga: mõõtes interakteerunud valgusvälja parameetreid, saab määrata ka pingevälja. Loomulikult peab tegemist olema läbipaistvate objektidega, seetõttu on fotoelastsusmeetodid laialt kasu-

tusel klaasitööstuses. CENS-i fotoelastsuslaboril on palju teoreetilisi tulemusi ja praktilisi rakendusi polariskoopide konstrueerimise ja müümiseni välja.

Üks CENS-i viimase aja parimaid rakenduslikke tulemusi on hajunud valguse polariskoop SCALP jääkpingete mõõtmiseks arhitektuurilistes klaaspaneelides ja autoklaasides. SCALP on väike kantav seade ning osutunud rahvusvahelisel turul äärmiselt vajalikuks. Sellest seadmest huvitatud firmade arv on praegu 77. Võiks öelda, et SCALP on hea näide teoreetilise uurimistöö jõudmisest praktikasse.



Automaatpolariskoop koos immersioonivanni ja katseobjektiga.



Automaatpolariskoobiga mõõdetud jääkpingete väli kõrgsurvelambi seinas.

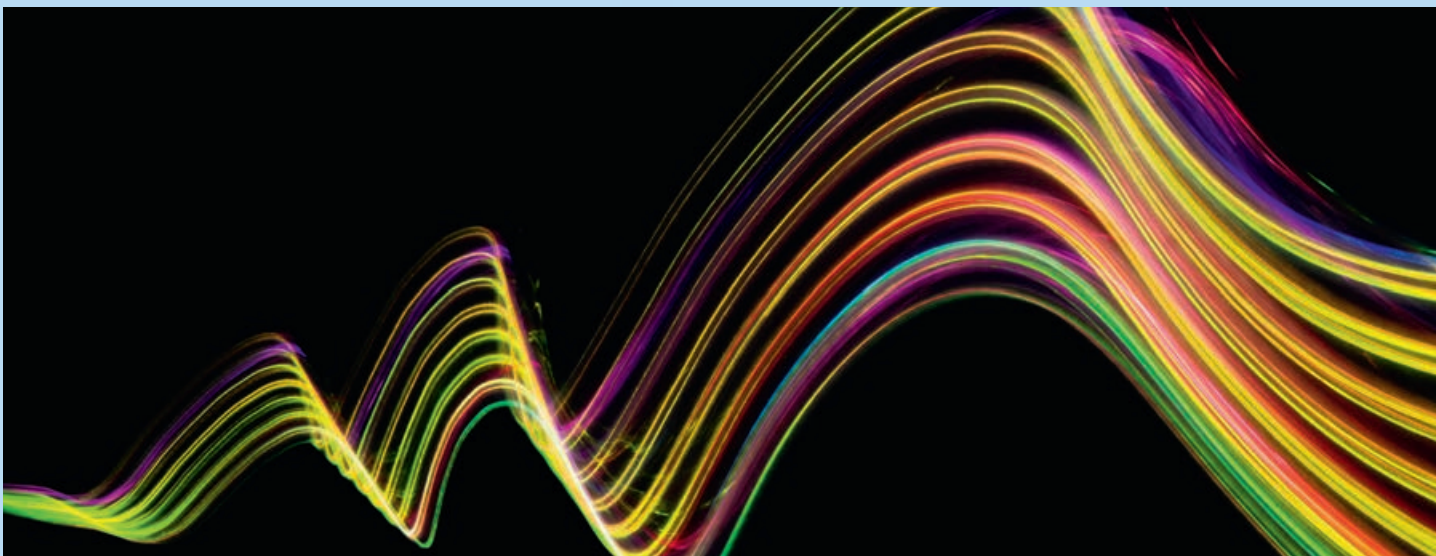


CENS-is välja töötatud polariskoop SCALP.



IMMERSIOONIVEDELIK – vedelik, mille murdumisnäitaja on võrdne katseobjekti murdumisnäitajaga.

SCANPIX



AKUSTODIAGNOSTIKA

Mis teha aga siis, kui tegemist on metallide või komposiitmaterjalidega, kus valgusväli materjali sisemusse ei tungi? Üks võimalus on kasutada ultrahelilaineid ja töötada välja mittepurustava katsetamise meetodid. Seda valdkonda nimetatakse ka akustodiagnostikaks.

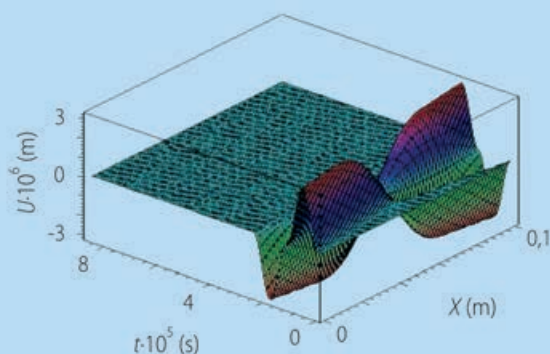
Tööstuses kasutatakse akustodiagnostika ideed põhimiselt pragude avastamiseks, sest praolt peegeldub ultraheli tagasi ja taoline signaal annab teavet nii prao

olemasolust kui ka selle asukohast. CENS-i uuringute fookuses on aga meetodid, mis võimaldaksid ultraheli-signaali analüüsi abil määrata materjali omadusi või siis ka jääkpingeid.

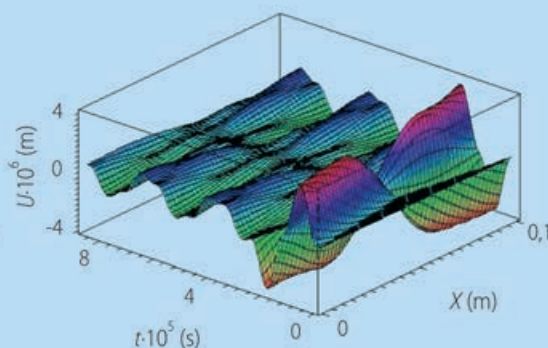
Uudne idee on kasutada mittelineaarseid efekte, mis lainete vastastikmõjul on üpris informatiivsed. See on osutunud viljakaks just mikrostruktuuriga materjalide omaduste selgitamisel.

Mittepurustavad meetodid

Akustodiagnostika kasutab laineväljade erinevusi materjalide omaduste määramisel.



Homogeenne katsekeha



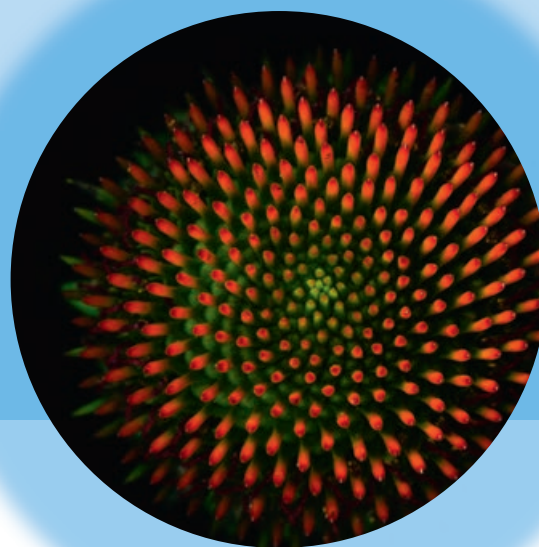
Mitthomogeenne katsekeha

SÜSTEEMIBIOLOOGIA TÖÖRÜHMAS

Bioloogiliste süsteemide puhul tuleb rõhutada nende mõningat eripära.

- Bioloogiline süsteem on seostatud ümbritseva keskkonnaga energiavahetuse kaudu, mis lubab struktuuride teket kaugel termodünaamilisest tasakaalust.
 - Bioloogilises süsteemis on olulised keemilised reaktsioonid ja ülekandemehhanismid, mis tihti on molekulaarse iseloomuga ja nende lineariseerimine on tihti võimatu.
 - Bioloogiline süsteem on tugevalt mittetasakaalustatud süsteem nii energia kui ka massiülekande seisukohalt.
 - Bioloogilistes protsessides on olulisel kohal hierarhiad nii struktuurses kui ka funktsionaalses mõttes.
- CENS-i süsteemibioloogia töörühmas on oskuslikult ühendatud matemaatiline modelleerimine ja südamelihase rakkudes kulgevate protsesside eksperimentaalsed uuringud. Selleks on mitu huvitavat moodust. Üks nendest on molekulaardünaamika simulatsiooni meetod, mis võimaldab süsteemi eri osi kokku võtta ning näha seeläbi suuremat tervikut. Nii on võimalik sul-

teliselt odavalt ja kiiresti hinnata teoreetiliste mudelite õigsust ning vajadusel neid ka täiendada. Molekulaardünaamika simulatsiooni meetod kasutab termodünaamika ja statistilise füüsika fundamentaalseadusi, lastes mingis ruumipiirkonnas aatomitel liikuda Newtoni klassikalisi seadusi järgides. Taoline lähendus võimaldab paljudest pisikestest sündmustest näha süsteemi suuremat ja globaalset muutumise suunda, nagu näiteks mitokondriuuringutes.

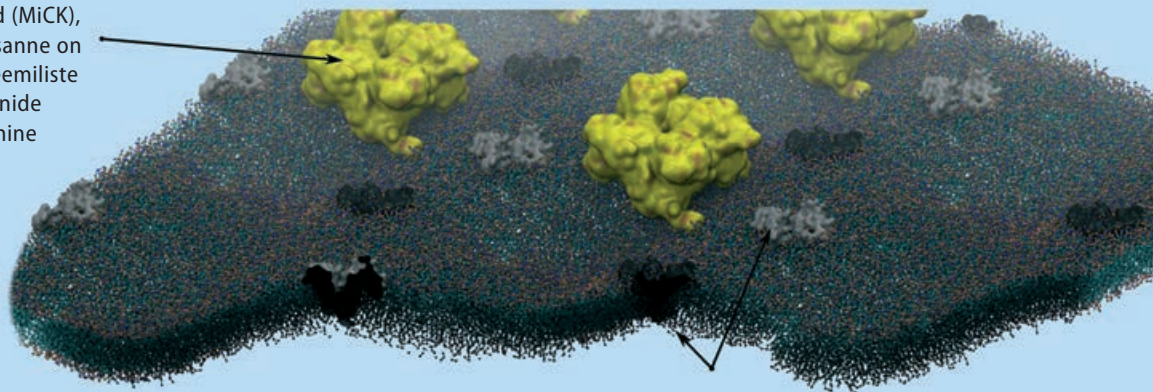


CORBIS / ALLOVERPRESS

Mitokondri sisemembraani molekulaardünaamika simulatsioon

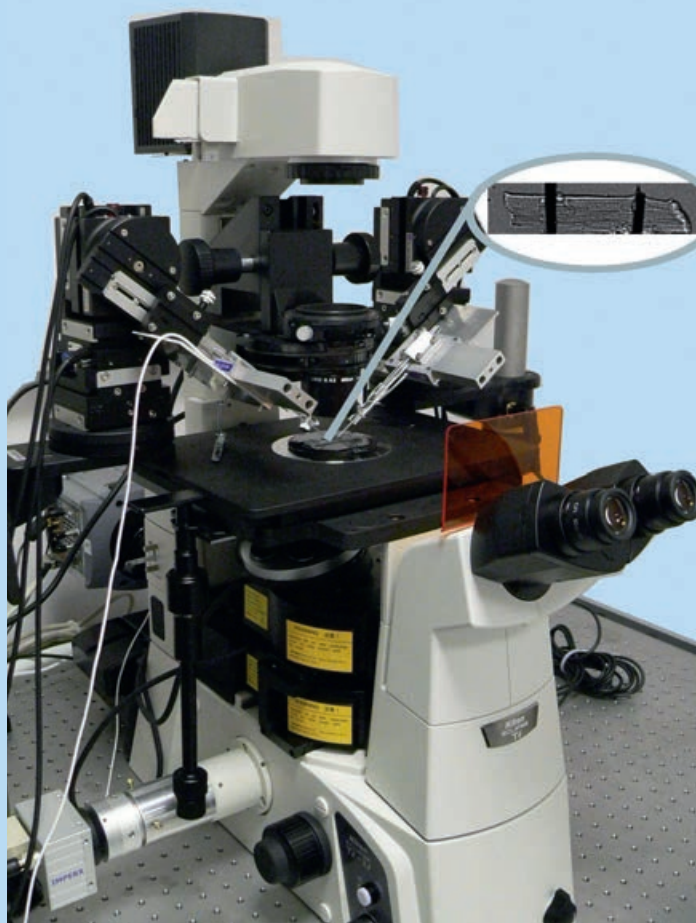
Hetk molekulaardünaamika simulatsioonist, mis uurib eluks olulise keemilise energiakandja ehk ATP/ADP sünteesiga seotud protsesse.

Ensüümid (MiCK), mille ülesanne on teatud keemiliste reaktsioonide kiirendamine



Membraani läbivad valgud (ANT), mis võimaldavad ainult teatud molekulidel membraani läbida

Joonisel on mitokondri sisemembraani tükike koos kahe erineva valguga. Selguse huvides ei ole näidatud veemolekule ning erinevaid ioone. Paljudest pisikestest niitjatest molekulidest on simulatsiooni käigus formeerunud bioloogilise membraani mudel, mis on molekulidele ja ioonidele peaaegu läbitamatu. Membraaniga on ümbritsetud kõik rakud ja see koosneb erinevatest harulistest molekulidest ehk lipiididest (orgaaniline molekul, mille põhiosa on rasvhape). Molekulaardünaamika simulatsioon võimaldab jälgida protsesse otsekui filmi.



Fluorestsentsmikroskoop koos mikromanipulaatorite paariga, mille külge on kinnitatud süsinikkiud. Suurenduses üksik südamerakk, millele on kinnitatud süsinikkiud raku kokkutõmbumise juhtimiseks.

Teiseks suunaks süsteembiooloogia laboris on raku-siseste protsesside koostöö uurimine. Eesmärk on koostada matemaatiline mudel, mis kirjeldab südame mehaanikat ja energieetikat. Selleks tuleb kombineerida biokeemiliste ja mehaaniliste protsesside teave, mis on saadud südame väiksema funktsionaalse ühiku – ühe raku – tasemel. Välja on arendatud eksperimentaalne tehnika südamelihaskule erinevate koormuste rakendamiseks ja samal ajal raku energiaetiliste parameetrite määramiseks. Rakule kinnitatakse süsinikkiud, mille abil juhitakse raku mehaanilist kokkutõmbumist ja pikene-mist. Sellise tehnika rakendamine fluorestsentsmikroskoobi all võimaldab uurida südameraku energiaetiliste parameetrite muutusi kokkutõmbumise jook-sul. Eksperimentaalseid tulemusi kasutatakse omakorda matemaatiliste mudelite väljatöötamisel.

KOMPLEKSSÜSTEEMIDE JUHTIMINE

Komplekssüsteemide puhul, nagu neid artikli alguses on kirjeldatud, on täpsete lahendite leidmine peaaegu lootusetu. Ometi – teades matemaatilist mudelit, saab kaost vältida. Selleks on mitmeid algoritme, mille idee on süsteemi parameetrite muutmine nii, et oleks võimalik kaootilisest olukorrast välja tulla.

Põhiprobleem juhtimisteoorias on sisend-väljundüsteemide analüüs. Traditsioonilistest lineaarsetest juhtimisülesannetest liigutakse praegu just mittelineaarsete süsteemide poole. Ka CENS-is on see põnev probleem päevakorras ning selleks tuleb sobitada mittelineaarsed olekumudelid sisend-väljundvõrranditega. Pidevate ja diskreetsete ajaskaalade kasutamine ning vastavate algoritmide väljatöötamine on teinud CENS-i uuringud oluliseks rahvusvahelisel tasemel.



SCANPIX / CORBIS

NII MAJANDUS KUI KA KEEL ON KOMPLEKSSÜSTEEM

Kuigi tavamõistus seostab kompleksüsteeme eeskätt füüsika ja bioloogiaga, on sotsiaalsed süsteimid, sealhulgas ka majandus, samuti kompleksüsteimid. Kui füüsikas saab tugineda jäävusseadustele ning teistele paljude katsetega määratud seaduspärasustele, siis sotsiaalse süsteemi analüüs, olgu selleks näiteks indiviidi ja ühiskonna suhted, seostatuna inimeste käitumismallide muutumise ja maailma globaliseerumisega, on paljuskord arene misjärgus. Kangesti tahame siin ennustada tulevikku, kuid raskusi on palju, sest kompleksüsteemide iseärasused võivad sotsiaalses süsteemis realiseeruda väga mitmel moel.

Hea meel on sellest, et CENS-i käsitlus kompleksüsteemidest on jõudnud keskkooli eesti keele programmi ning ärgitanud keeleteadlasi vaatama keelt kui iseorganiseeruvat süsteemi.

Nähtavus meil ja maailmas

Teadmised kompleksüsteemidest ja nendega seotud protsessidest vajavad tutvustamist ka laiemalt kui ainult teadusüldsuses. Sellega on CENS mitmel moel ka tegelenud. CENS ise on publitseerinud raamatu „Keeruka maailma ilu” (2006), millele on kavas järg kirjutada. Kindlasti on CENS-i üheks fookuseks noorte füüsikute ettevalmistamine osalemiseks rahvusvahelistel füüsikaolümpiaadidel. Loengukursused matemaatilise modelleerimisest ja kaosteooriast on viimasel ajal rõhutanud just kompleksüsteemide omapära ning vajadust mõista probleeme muutvas maailmas. Osalemine rahvusvahelistes programmides COMPLEXITY-NET ehk Euroopa Liidu võrgustik, mis ühendab kompleksüsteeme uurivaid programme; FuturiCT ehk Euroopa Liidu pilootprojekt kompleksüsteemide analüüsiks, rõhuga sotsiaalsetele süsteemidele, liikmelisus kompleksüsteemide uurivate keskuste ühingu, Maailma-akadeemia (World Academy of Art and Science, WAAS) mitme vastava nõupidamise juhtimine jpm näitavad ilmekalt CENS-i nähtavust kompleksüsteemide maailmas.

Loomulikult on selles loos kirjeldatud üksnes osa CENS-i uuringuist. Loodetavasti õnnestus näidata, et interdistsiplinaarsus ja mitmete suundade vastastikune rikastamine on andnud häid tulemusi. ●

LOE VEEL

- Ilya Prigogine, Isabelle Stengers. Order out of Chaos. Heinemann, London, 1984.
- Ian Stewart. 17 Equations that Changed the World. Profile Books, London, 2012.
- Arvi Freiberg. Kõige tähtsam energeetika. Horisont, 2005, nr 5.
- Jüri Engelbrecht. Komplekssüsteemid. Akadeemia, 2010, nr 8, 1347–1362.
- Robert Kitt. Komplekssed sotsiaalsüsteemid. Akadeemia, 2011, nr 10, 1878–1891.
- Martin Ehala, Mare Kitsnik. Praktiline eesti keel. 12. klass, 1. vihik. OÜ Künnamees, 2013.

AUTORIST

JÜRI ENGELBRECHT (1939) on mehaanikateadlane ja Eesti Teaduste Akadeemia asepresident. Lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli ehitusinsenerina, kaitses 1968 tehnikakandidaadi väitekirja. Alates 1969. aastast töötanud Küberneetika Instituudis, kus 1982 valmis ka tema doktoritöö lainelevi teooriast. Aastal 1999 loodi just tema initsiatiivil Mittelineaarsete Protsesside Analüüsi keskus CENS. On Eesti teaduse tippkeskuste programmi algataja ja praegune nõukogu esimees. Tunnustatud Eesti Vabariigi teaduspreemiaga aastail 1998 ja 2008. Mitme riigi teaduste akadeemiate, ülikoolide ja teadusühingute liige ja välisliige. Oli aastail 2006–2011 Euroopa Teaduste Akadeemia Föderatsiooni (ALLEA) president. Kui teaduse tegemisest ja juhtimisest aega üle jääb, armastab suusatada ja klassikalist muusikat kuulata.