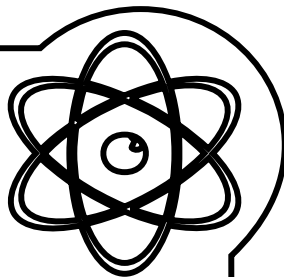
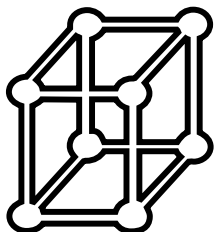


EESTI FÜÜSIKA SELTS



**EESTI
FÜÜSIKA SELTSI
AASTARAAMAT**

**2011
XXII
aastakäik**



TARTU 2012

Toimetanud: Anna Aret, Helle Kaasik, Piret Kuusk

Kujundanud ja küljendanud: OÜ Intelligent Design / Atko Rimmel

Autoriõigus Eesti Füüsika Selts 2012

ISSN 1406-0574

SAATEKS

Aasta 2011 oli kahe suurejoonelise reformi kavandamise aeg: kõrghariduse reform, millega soovitakse kardinaalselt muuta ülikoolide rahastamise aluseid, ja teaduskorralduse reform, mille eesmärgiks on senise kahe teadustööd rahastava institutsiooni – Teaduskompetentsi Nõukogu (TKN) ja Eesti Teadusfondi (ETF) – ühendamine üheks Eesti Teadusagentuuriks (ETAg). Lisaks nendele üleriigilistele reformidele muutis Tartu Ülikool oma juhtimismudelit: alates 2012. a on tema kõrgeimaks otsustuskoguks 11-liikmeline nõukogu, mille liikmetest enam kui pooled (6) on väljastpoolt ülikooli; ülikoolisiseseks akadeemiliseks otsustuskoguks on senat, kes vastutab ülikooli õppe- ning teadus- ja arendustegevuse eest. Muuhulgas võtab senat vastu ülikooli põhikirja ja esitab selle nõukogule kinnitamiseks. Senati koosseisu kuuluvad rektor senati esimehena ning 21 liiget, kellest 16 liiget valivad ülikooli õppejõud ja teadustöötajad ning viis üliõpilaste esindajat valib TÜ üliõpilasesindus. Füüsikaõppurid said siiski segamatult oma haridusteed lõpetada – TÜ Füüsika Instituudis kaitsti koguni 12 doktoriväitekirja, neist 9 füüsikanõukogu ees ja 3 materjaliteaduse nõukogu ees.

Eesti Füüsika Seltsi XXII aastaraamatu avaartikli autorid Jaak Kikas ja Jaan Kalda juhatavad sisse ühe järgmise aasta füüsikaelu siinsetest tähtsündmustest – juulikuus Eestis toimuva rahvusvahelise koolinoorte füüsikaolümpiaadi (IPhO). Seejärel avaldame füüsikaportaali füüsika.ee lahkelt loal kaheksa lühiteadet meie füüsikute uusimatest teadustulemustest, mis algselt ilmunud portaalis e-teadetena. Eesti XLI füüsikapäevadel ja XXXIII füüsikaõpetajate päevadel Tartus 22. ja 23. märtsil 2011 esinenutest on oma ettekande artiklikirjutanud EFS aastapremia 2011 laureaat Ivo Heinmaa (tahkise kõrge lahutusega tuumamagnetresonantsist krüotemperatuuridel), Vladimir Hižnjakov ja Imbi Tehver (heelium-3 ja heelium-4 kvantvedeliku tilkadest), Karl Kruusamäe (tehislihastest) ning Indrek Jõgi ja Matti Laan (plasmast, katalüsaatoritest ja keskkonnasaastest). Avaldame ka 23. ja 24. märtsil 2012 toimuvate Eesti XLII füüsikapäevade ja XXXIV füüsikaõpetajate päevade kava ning ettekannete sisukokkuvõtted.

Aastaraamatu lõpetavad Eesti Füüsika Seltsi rubriik ning 2011. aasta füüsikakroonika.

Piret Kuusk,
toimetaja

SISUKORD

Jaak Kikas, Jaan Kalda

IPhO 2012 – koolinoorte
rahvusvaheline füüsikaolümpiaad seekord Eestis 6

EESTI FÜÜSIKA TEADUSUUDISED

Aile Tamm

Eesti Füüsika Seltsi liikmetele 10

Aare Luts, Urmas Hõrrak, Tiia-Ene Parts

Õhu negatiivsete ionide koostise üks uuemaid
uurimismeetodeid 11

Kaupo Kukli

Õhukeste ruteeniumikilede aatomkihtsadestamine etüül-
tsüklopentadienüül-pürrolüülruteeniumist ja hapnikust 15

Rainer Pärna

Koobaltiga dopeerimise ja kuumutamise mõju sool-geel
meetodil valmistatud õhukeste TiO₂ kilede omadustele 18

Friedrich Kaasik ja Anna-Liisa Peikolainen

Põlevkivitööstuse kõrvalproduktist valmistatud kunstlihased . 21

Harry Alles

Dielektrikute aatomkihtsadestamisest grafeenile 23

Maret Einasto ja Elmo Tempel

Superparvede morfoloogia uurimine aitab mõista
kosmilise võrgustiku omadusi 25

Mikhail G. Brik, Ilmo Sildos, Valter Kiisk

Puhaste TiO₂ ja dopeeritud YAlO₃:Ce³⁺ kristallide
optiliste omaduste modelleerimine 27

Jaan Salm ja Eduard Tamm

Aerosooliosakeste elektriline laadumine
bipolaarses ionatmosfääris 29

XLI EESTI FÜÜSIKAPÄEVAD JA XXXIII FÜÜSIKAÕPETAJATE PÄEVAD

Kava 32

Ivo Heinmaa

Kõrge lahutusega tahkise tuumamagnetresonants
krüotemperatuuridel 35

Vladimir Hižnjakov ja Imbi Tehver

Helium-3 ja helium-4 kvantvedeliku tilkade spektroskoopia .. 47

Karl Kruusamäe

Tehislihased: ajamid mikrorobotitele, kuid mitte ainult 60

Indrek Jõgi, Matti LaanPlasma ja katalüüs *vs* keskkonnasaaste 73**XLII EESTI FÜÜSIKAPÄEVAD JA XXXIV FÜÜSIKAÕPETAJATE PÄEVAD**

Kava 84

Ettekannete sisukokkuvõtted 86

EESTI FÜÜSIKA SELTS 2011

EFS aukirjad ja preemiad 100

Eesti Füüsika Seltsi juhatuse 2011. aasta tegevusaruanne 101

Aasta pilt 2011 105

EFS laiendatud juhatuse 2011. aastal 105

EFS uued liikmed 106

Täppisteaduste suvekool 2011 107

Täppisteaduste sügiskool 2011 108

EFS füüsikaõpetajate I seminar 109

EFS füüsikaõpetajate suvekool 2011 110

EFS füüsikaõpetajate II sügisseminar 111

RAAMATUS KASUTATUD LÜHENDID 112**FÜÜSIKAKROONIKA 2011**

Töökorraldus 114

Väitekirjade kaitsmine 116

Õppetöö 123

Teadusüritused Eestis 129

Teadustöö 131

Raamatud ja kogumikud 140

In memoriam 141

Füüsikahariduslik tegevus 143

SUMMARY 154

IPHO 2012 – KOOLINOORTE RAHVUSVAHELINE FÜÜSIKA- OLÜMPIAAD SEEKORD EESTIS

JAAK KIKAS¹ JA JAAN KALDA²

¹TÜ Füüsika Instituut, ²TÜ Küberneetika Instituut

14.–24. juulini 2012. aastal toimub Eestis koolinoorte rahvusvaheline füüsikaolümpiaad IPHO 2012. Sellel maailma parimate noorfüüsikute mõõduvõtmisel on selja taga pikk ajalugu – Eestis toimuv võistlus on arvult juba 43. Esimene neist toimus aastal 1967 Varssavis õige tagasihoidliku osavõtjate arvuga – osalesid 5 riiki (Bulgaaria, Ungari, Tšehhoslovakkia, Rumeenia, Poola). Võib muidugi uhkusega märkida, et Eesti oma füüsikaolümpiaadide rida on veelgi pikem, esimene selline võistlus toimus aastal 1953. Ajapikku on IPHO oma mahult palju kasvanud – Eestisse oodatakse võistlema 86 riigi esindajaid. Esindatud on kõik kontinendid, osalevad nii suurriigid – eesotsas traditsiooniliselt tugeva Hiinaga – kui ka väikesed, nt Island, kes oli ise aastal 1998 võistluse korraldajamaa. Võistluse statuudi järgi esindab igat riiki 5-liikmeline võistkond, need õpilased ei tohi olla vanemad kui 19 aastat ega tohi veel olla alustanud õpinguid kõrgkoolis. Võistlus toimub kahes voorus, millest ühes tuleb lahendada teoreetilisi ülesandeid, teises aga tõestada oma eksperimentaatorioskusi. Lahendamiseks pakutavate ülesannete koostamine ja valik lasub korraldajamaa õlul, aga võistlusele eelneval päeval arutab ülesanded läbi kõikide võistkondade esindajatest koosnev rahvusvaheline žürii, kes võib viia ülesannete tekstidesse korrektiive. Ülesannete sisu reglementeerib olümpiaadi õppekava, mis on leitav internetist aadressil <http://ipho.phy.ntnu.edu.tw/syllabus.html>, samast veebikohast on saadavad ka toimunud olümpiaadide ülesanded. Huvilised võivad seda võrrelda meie koolifüüsika programmiga – kuigi suuremas osas loetelud kattuvad, sisaldab IPHO õppekava ka osi, mida Eesti koolis ei õpita ja mis tuleb võistkonna ettevalmistamise käigus täiendavalt selgeks teha.

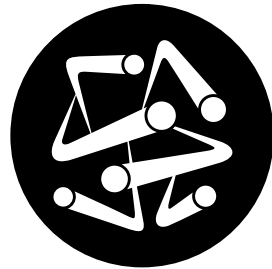
Eesti osaleb iseseisva võistkonnaga IPHO-l alates aastast 1992, mil

võistlus toimus Helsingis (Espoos). Enne seda õnnestus IPhO-le jõuda vaid mõnel üksikul eestlasel Nõukogude Liidu võistkonna koosseisus. Aastate jooksul on Eesti võistkond toonud koju 2 kuld-, 7 hõbe- ja 25 pronksmedalit ning 29 diplomit. Kõige säravamate medaliteni on küündinud Jegor Gužvin aastal 1999 Paduas ja Ants Remm mullu Bangkokis.

Aastal 1996 käis Eesti välja lubaduse korraldada IPhO 2012. Selline veksell on tarvilik tingimus võistlustel osalemiseks tagamaks võistluste järjepidevust. Vastavalt statuudile

kannab korraldajamaa võistlustega seotud kohalikud kulud, sõit kohale ja tagasi toimub osavõtjate kulul. Ettevalmistused Eestis Haridus- ja Teadusministeeriumi egiidi all toimuvaks suurürituseks algasid juba kolm aastat tagasi, kui moodustati olümpiaadi juhtkomitee eesotsas HTM kantseri Janar Holmiga, komitee koosseisus on TÜ, TTÜ, ETA, EFS, TÜ FI ja KBFI esindajad. Teoreetiliste ja eksperimentaalsete võistlusülesannete ettevalmistamiseks on moodustatud IPhO 2012 akadeemiline komitee, mida juhivad selle artikli autorid. Aga peale võistluse sisaldab IPhO programm veel arvukalt üritusi, mille sisuks on korraldajamaa, selle teaduse ja hariduse tutvustamine osavõtjatele ning võimaluste loomine osavõtjate omavaheliseks lävimiseks. IPhO keerulise üldkorralduse ja logistika ettevalmistamise on enda kanda võtnud Eesti Infotehnoloogia Sihtasutus. Tasub silmas pidada, et IPhO annab korraldajatele suurepärase võimaluse oma riigist positiivse kuvandi loomiseks inimestele, kellest paljudest saavad juba kümnekonna aasta pärast suunanäitajad maailma teaduses, teaduslik-tehnoloogilise progressi lipukandjad.

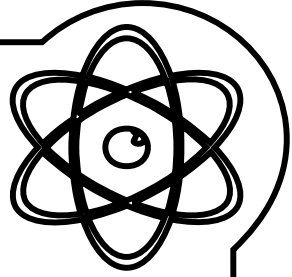
Eestis toimub võistlus Tartus (teoreetiline voor 17. juulil ja eksperimentaalne 19. juulil), rahvusvaheline žürii ja hindajad tegutsevad Tallinnas. Tallinnas toimuvad ka ürituse pidulikud ava- ja lõputseremooniad (vastavalt 16. ja 23. juulil). Lisaks võistlusele leiavad Tartus aset ka mitmesugused muud IPhO-ga seonduvad, aga kindlasti ka laiemat huvi pakkuvad üritused. Noortega tuleb kohtuma ja esineb loenguga Nobeli keemiapreemia laureaat Sir Harold W. Kroto (preemia fullereenide avastamise eest 1996). 20. juulil kuulutatakse Tartu maailma füüsikapealinnaks ja kulmineeruvad teadusaasta 2012 üritused. Lähe-



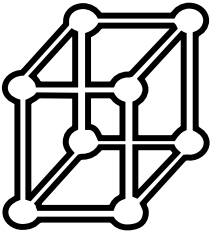
IPhO
Estonia 2012

mat teavet olümpiaadi kohta leiab huviline IPhO 2012 kodulehelt www.ipho2012.ee ja IPhO 2012 Facebook'i lehelt. Olümpiaadiga seonduvatele traditsioonilistele ettevõtmistele (võistlused, ekskursioonid, vastuvõttud, tseremooniad) on IPhO 2012 lisanud aga ka midagi uut: võib öelda, et olümpiaad on ka õpilaste jaoks juba alanud. Nimelt käivitus eelmise aasta septembrist õpilastele rahvusvaheline füüsikaülesannete lahendamise internetivõistlus „Physics Cup – IPhO2012“ (vt www.ipho2012.ee/physicscup), millest kokkuvõtted tehakse IPhO 2012 raames selle aasta suvel.

IPhO läbiviimine on tõsine eksam korraldajamaa füüsikute kogukonnale – paljud selle kirjutise eeldatavatest lugejatest on kas juba osalenud ettevalmistustegevuses või asuvad tegevusse IPhO toimumise ajal – eelkõige võistlustööde lahenduste kontrollimisel. Korraldajad tervitavad igasugust initsiatiivi, mis ürituse edukale läbiviimisele kaasa võiks aidata. Teie ideed ja abi on oodatud!



**EESTI
FÜÜSIKA
TEADUSUUDISED**



EESTI FÜÜSIKA SELTSI LIIKMETELE

Tänapäeva tippteadus on muutunud väga spetsiifiliseks nii teemade kui erialakeele mõttes. Loodame, et teadusartiklite põhjal koostatud lühilugude lugemine EFS aastaraamatu uues rubriigis „Eesti füüsika teadusuudised“ innustab meid aktiivsemalt osalema oma tööde tutvustamises kolleegidele ja avalikkusele. Siin ilmuvate lugude tegelik kodu on [fyysika.ee](http://www.fyysika.ee/uudised) uudisteportaal (www.fyysika.ee/uudised), kus me väikese aktiivse meeskonna, kuhu kuuluvad Aile Tamm, Stiina Kristal, Anu Mets ja Uku Püttsepp, igapäevaseks tegevuseks on ingliskeelsete teadusuudiste vahendamine, kasutades selleks ka hetkel edukaimat meediavahendit, *Facebook*-i. Kuid mitte ainult – me püüame ka tuua Eesti füüsikute tegemisi laiema publiku ette. Füüsika uudisteportaalil ilmuvad Eesti teadlaste äsjailmunud artiklite populaarteaduslikud kirjeldused, mis on esitatud lihtsamalt, kui meie erialakeel seda tavaliselt ette näeb. Ma arvan, et kõik Eestis tegutsevad teadlased võiksid leida aega oma teadusartiklite tutvustamiseks meie väikese Eesti avalikkusele. Võin Teile kinnitada, et leidub piisavalt noori ja veidi vanemaid huvilisi, kellele Teie tegevus korra läheb ... kui nad sellest vaid teada saaksid.

EFS füüsika uudisteportaaali peatoimetaja Aile Tamm
Kiletehnoloogia labor
Füüsika Instituut
Tartu Ülikool

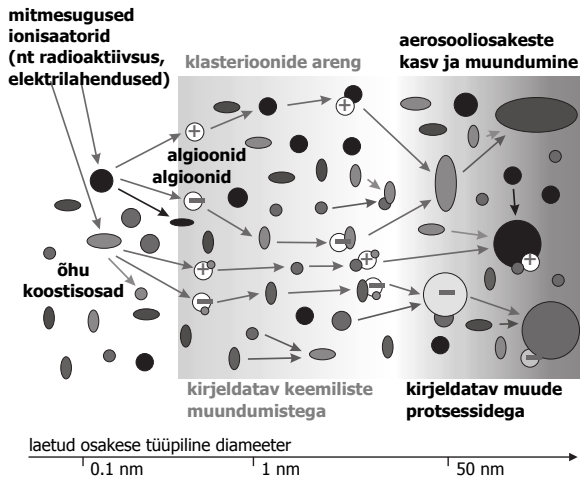
ÕHU NEGATIIVSETE IOONIDE KOOSTISE ÜKS UUEMAID UURIMISMEETODEID

AARE LUTS, URMAS HÕRRAK, TIIA-ENE PARTS

TÜ Füüsika Instituut

Õhus või mõnes gaasisegus hõljuvate pisiosakeste kogumit võib nimetada aerosooliks. Osakesed võivad olla võrdlemisi suured (läbimõõdud kümnetes mikromeetrites) või üsna väikesed (nanomeetrites), neutraalsed või elektriliselt laetud. Aerosool mõjutab nii kliimat kui ka inimeste igapäevaelu, kusjuures paljud mõjud sõltuvad osakeste suuruselt ja/või keemilisest koostisest. Suuruselt sõltub näiteks, kui kaugele osake kehas levib ehk osakese teekond organismis. Mõnest mikromeetrist suuremad osakesed peatuvad ninas, vähimad jõuavad keha sügavustesse. Koostisest sõltub sissehingatu täpsem mõju organismile. Seega oleks vaja teada, mis see ikkagi on, mis organismi satub. Ka sõltub osakeste suuruselt ja koostisest see, kui agaralt ja milliseid pilvi nad atmosfääris aitavad moodustada. See, et pilved ja sademed mõjutavad igapäevaelu, on ilme. Seega võiks ka paremini teada, kuidas õhus vastavad osakesed ikkagi välja kujunevad. Joonis 1 pakub üht lihtsustatud pilti, kuidas, praeguste teadmiste järgi, elektriliselt laetud osakesed võiksid tekkida ja areneda. Osakeste arengu täpne tervikmehhanism pole sugugi piisavalt hästi teada, vaatamata sadadele ja tuhandetele juba tehtud üksikuurimustele.

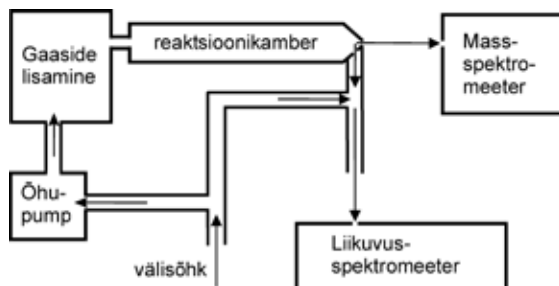
Eesti ja Soome teadlaste (Aare Luts, Tiia-Ene Parts, Urmas Hõrrak, Heikki Junninen, Markku Kulmala) uurimuse eesmärgiks oli testida uut meetodit õhu ioonide tekkimise ja arengu uurimiseks. Selleks loodi eksperimentaalseade, mis võimaldas tekitada soovitud vanustega ioone, mõjutada osakeste arengut õhu koostise muutmise abil ja suunata uuritavad osakesed mass- ja liikuvusspektromeetritesse. Joonisel 2 on esitatud kasutatud eksperimentaalseadme üldine skeem [1]. Reaktsioonikambris tekitatakse õhku ioniseeriva radioaktiivse ²⁴¹Am preparaadi abil



Joonis 1. Õhu laetud osakeste tekkimise ja arengu lihtsustatud skeem.

algioonid, mis reageerides õhus olevate gaasidega teevad läbi rea keemilisi muundumisi ja sobival tingimustel võivad edasise kasvamise käigus areneda klasterioonidest stabiilseteks aerosooliosakesteks. Teaduskeeles nimetatakse taolist protsessi gaas-aerosool konversiooniprotsessiks, mille tulemusena osa algselt gaasifaasis olevast aineist siirdub aerosoolifaasi. Liikuvusspektromeeter võimaldab registreerida ionide (klasterioonide ja laetud aerosooliosakeste) kontsentratsioonid mõõdetavates liikuvusvahemikes, millest saab arvutada ionide suurusjaotuse, mass-spektromeeter annab aga teada, milliste massidega need ionid olid.

Saadud tulemused kinnitasid meetodi rakendatavust ja andsid ka uusi sisulisi teadmisi. Selgeks sai tõsiasi, et õhus on ligikaudu 1 s vanuste ionide koostis oluliselt erinev *ca* 20 s vanuste ionide omast. Mitmed seda nähtust seletada püüdnud uurimused on väitnud, et pärast ionide teket on *ca* 1 s möödumisel kõik olulised õhuioonide keemilise muundumise protsessid lõppenud. Eksperimendist selgus, et ionide areng ei ole 1 s möödumisel siiski veel lõppenud. Ioonide vanuste (eluiagade) vahemik ühe ja mõnekümne sekundi vahel on siiani puudulikult läbi uuritud, millest järeldub, et selles suunas tuleb tööd jätkata. Eksperiment võimaldas selgitada mõnede õhus leiduvate lisandgaaside mõju ionide liikuvus- ja massijaotusele. Negatiivsete ionide korral eksperimenteeriti dietüülamiini (DEA), joodi ja veeauruga. DEA ja joodiühendite korral on teada, et nende ühendid (aurud) osalevad aerosooliosakeste



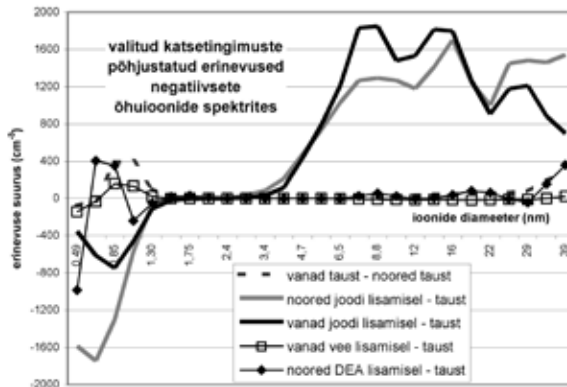
Joonis 2. Eksperimendi üldine skeem.

tekkel atmosfääris, mistõttu meie poolt laboriekperimentides leitud ioonkoostise muutumise trendid võiksid olla ekstrapoleeritavad ka atmosfääritingimustele. Jood ja DEA on mingis mõttes olulised ka inimese tervisele, aga see oleks juba edasise uurimise teema.

Uute aerosooliosakeste tekkel nukleatsiooniprotsessis on kriitiliseks piirkonnaks suuruste vahemik 1,6–3 nm, millest suuremaid osakesi võib nimetada juba stabiilseteks aerosooliosakesteks. Piltlikult väljendudes on see keskmiste ionide piirkond nagu pudelikael, millest uued aerosooliosakesed peavad läbi minema, kui nad üldse tahavad endale eluõigust saada ja atmosfääriprotsessides kaasa rääkida.

Üheks uueks oluliseks informatsiooniks oli tõestus, et sellised ained nagu DEA ja joodiaur on ained, mis aitavad kaasa uute osakeste tekkele gaasifaasist ja ühtlasi aitavad osakestel „keskmiste ionide pudelikaelast“ läbi minna.

Mõned tuvastatud mõjudest on kujutatud joonisel 3, millel on näha, kas ja kuidas sõltus ionide suurusjaotus katsetingimustest. Osakeste arengut mõjutavate tingimuste uurimine on üks võimalus neid protsesse mõista ja saada ka täiendavat informatsiooni protsesside modelleerimiseks teoreetiliste mudelite abil. Graafikud joonisel 3 on saadud sel viisil, et uutes tingimustes saadud suurusjaotustest on maha lahutatud esialgsete tingimuste korral mõõdetud suurusjaotused ehk nn taustajaotused. Tulemuseks on tingimuste mõju kirjeldavad graafikud n-ö võimendatud kujul, ilma milleta võiks osa muutusi muu info varjus märkamata jääda. Antud eksperimendis omas kõige tugevamat mõju jood. Joonisel 3 kujutatav näitab, et joodi lisamisel tekkis oluliselt rohkem uusi raskemaid ioone ja nende uute raskemate osakeste teke vähendas omakorda kergemate ionide kontsentratsioone. Ka osakeste massijaotus muutis oma kuju, kusjuures täheldati massijaotuse sõltuvust ka õhu niiskusest. Teiste ainete lisami-



Joonis 3. Õhu negatiivsete ionide suurusjaotuste muutused joonise legendis märgitud tingimustel. Noored ionid olid vanustega *ca* 1 s, vanad *ca* 20 sekundit.

sega kaasnenud muutused massi- ja suurusjaotustes olid väiksemad, aga mitte tähtsusetud. Ilmnes, et DEA võib soodustada raskemate ionide ja klastrite teket, samas aga ei esinenud võrdselt mitte kõiki võimalikke ühendeid, mida DEA seniste teadmiste alusel võiks moodustada. Veeauru lisamine tekitas ioone, mis senini kirjanduses kirjeldatud eksperimentides pole peaaegu märkimist leidnud. Seetõttu on nad midagi uut, mis väärrib juba selle tõttu edasist uurimist.

Täpsemalt saab lugeda ajakirjas *Journal of Aerosol Science* avaldatud teadusartiklist [1].

Uurimistööd ja artikli ilmumist toetasid sihtfinantseeritav teadusteam SF0180043s08 ja Eesti Teadusfond uurimistoetusega nr 8342. Eriline tänu kuulub Prof Tapio Kotiaho'le ja tema meeskonnale Helsingi Ülikooli analüütilise keemia laboratooriumist, kes aitasid igati kaasa mass-spektrometriliste mõõtmiste õnnestumisele. Toomas Koger ja Ilmar Lipping andsid suure panuse reaktsioonikambri tehnilisse valmimisse. Tänu ka neile.

ALGALLIKAS

- [1] Aare Luts, Tiia-Ene Parts, Urmas Hörrak, Heikki Junninen, and Markku Kulmala. Composition of negative air ions as a function of ion age and selected trace gases: Mass- and mobility distribution. *Journal of Aerosol Science* 42 (2011) 820–838. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850211001182>.

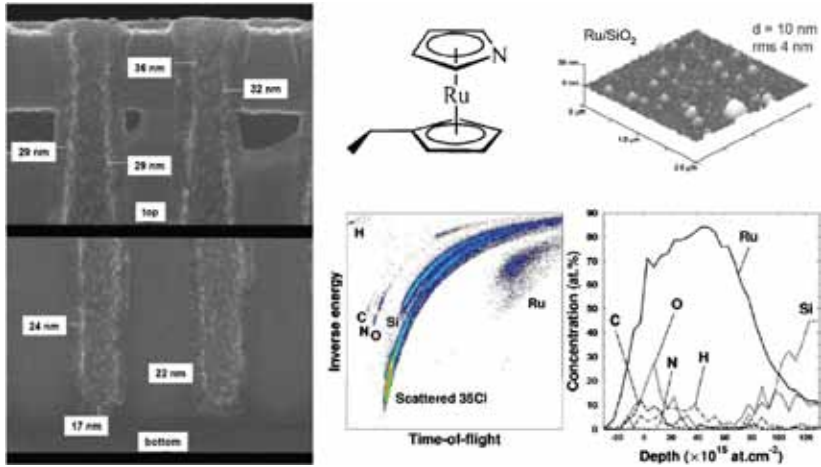
ÕHUKESTE RUTEENIUMIKILEDE AATOMKIHTSADESTAMINE ETÜÜLTSÜKLOPENTADIENÜÜL- PÜRROLÜÜLRUTEENIUMIST JA HAPNIKUST

KAUPO KUKLI

TÜ Füüsika Instituut

Arvutimälude (nii püsिमälude kui dünaamiliste juhupöördmälude) uute tehnoloogiliste põlvkondade arendamise ja tootmisliinile viimise käigus on juba aastaid tagasi loobutud tasapinnaliste infobitte „0“ ja „1“ säilitavate kondensaatorite kasutusest. Selle asemel on tulnud kolmedimensionaalsed (3D) struktuurid, ehk kondensaatorid tehakse põhimõtteliselt pikkade kitsaste silindrite kujulistena nii, et neid mahuks üksteise kõrvale võimalikult rohkem ja nad samas siiski mahutaksid võimalikult suurt elektrilaengut. Üksikute kondensaatorite mõõtmed on kahanenud pidevalt ja uuemate põlvkondade „nanoseadmetes“ on seetõttu traditsioonilised dielektrilised koostiskihid (SiO_2 , SiON) mõnda aega tagasi välja vahetatud paremini polariseeruvate ja suuremat laengut säilitavate metalloksiidide Ta_2O_5 , HfO_2 ja/või ZrO_2 vastu. Vana elektrootmaterjal – juhtiv polükristalne räni – on vahetatud välja juhtiva titaannitriidi (TiN) vastu. Maailmas tehakse tõsiseid jõupingutusi selle nimel, et dielektrikena hakata kasutama väga kõrge dielektrilise läbitavusega, näiteks perovskiidi struktuuriga materjale (nt SrTiO_3) ja elektrootdina võiks siis juba kasutada mõnda metalli, eeskätt ruteeniumi (Ru).

Käesolev töö (vt algallikas) käsitles ruteeniumikihtide sadestamist uuelaadsest normaaltingimustel vedelfaasis ja gaasfaasis termiliselt üsna stabiilsest lähteainest. Töös osalesid Eesti, Soome, Saksa ja Ameerika teadurid ja tulemused avaldatigi kui ühistöö tulemused. Töö põhiliseks eesmärgiks oli selgitada, kuivõrd usaldusväärselt ja korratavalt on võimalik kilesid uuest lähteainest (vt joonis) tavalistes laboritingimustes



Joonis. Skaneeriva elektronmikroskoobi läbilõikepilt *ca* 100 nm laiustesse ja 2 μm sügavustesse ränüuretesse sadestatud ruteeniumikilest (vasakpoolne paneelide veerg), ruteeniumi lähteaine molekuli skeem (ülal keskmine paneel), aatomjõumikroskoobi skaneering mõõdukalt karedalt ruteeniumikile pinnalt (paneel ülal paremas nurgas) ning ioonkiirega pommitamise teel saadud ränile sadestatud ruteeniumikile koostiseelementide jäljed iondetektori spektris (paneelid all keskel ja paremas nurgas). Ioonkiiranalüüs näitas, et metallikile sisaldab kogu paksuse ulatuses jääklisanditena veel vähesel määral süsinikku, lämmastikku, vesinikku ja hapnikku.

toota. Ruteeniumikiled kasvatati aatomkihtsadestusmeetodil erinevatele alusmaterjalidele (Si, TiN, ZrO₂) ja leiti, et kasv võimendub eriti just metalli oksiidil (ZrO₂). Samuti leiti, et üsnagi väikeste jõupingutustega ja väheste ajaliste kulutustega protsessi parametriseerimisele on võimalik kasvatada Ru kilesid 3D alustele (vt joonis) paljulubava ühtlusega. Ruteeniumikiht kasvab metalse ruteeniumina juba sellelaadse protsessi jaoks madalatel temperatuuridel: ka vahemikus 250–275 °C kasvanud kihtides esinesid kerged elemendid peamiselt jääkelementidena. Ruteeniumi pinnakiht oli küll oksüdeerunud, kuid antud juhul ei tekita selline nähtus isoleerivate omadustega parasiitkihti, vaid selle metalli oksiid on juhtiv ja RuO₂-e võib samuti kasutada elektrodmaterjalina. Protsessi parameetreid tuleks edasi optimeerida vastavalt reaktori konstruktsioonile ning aluspinna materjalile ja kujule, kuid need katsed on juba näidanud, et uuritud lähteainekeemia võimaldab edukalt sadestada 5–25 nm paksuseid üliõhukesi metallektroode.

ALGALLIKAS

- [1] Kaupo Kukli, Marianna Kemell, Esa Puukilainen, Jaan Aarik, Aleks Aidla, Timo Sajavaara, Mikko Laitinen, Massimo Tallarida, Jonas Sundqvist, Mikko Ritala, and Markku Leskelä. Atomic Layer Deposition of Ruthenium Films from (Ethylcyclopentadienyl)(pyrrolyl) ruthenium and Oxygen. *Journal of the Electrochemical Society* 158 (2011) pp. D158-D165. DOI:10.1149/1.3533387

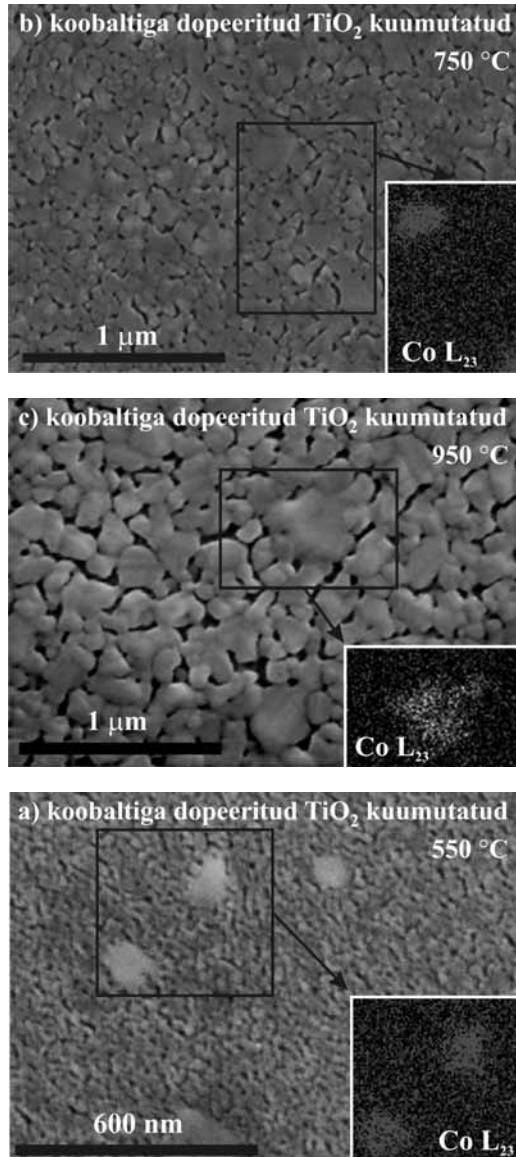
KOOBALTIGA DOPEERIMISE JA KUUMUTAMISE MÕJU SOOL-GEEL MEETODIL VALMISTATUD ÕHUKESTE TiO₂ KILEDE OMADUSTELE

RAINER PÄRNA
TÜ Füüsika Instituut

Viimase paari aastakümne jooksul on TiO₂ pälvinud palju tähelepanu. Paljude muude kasulike rakenduste kõrval võimaldab TiO₂ luua näiteks nn isepuhastuvaid aknaklaase. Seejuures „isepuhastumise“ protsess toimub kaheastmelisena: esimeses astmes päikesevalguse mõjul lagundatakse mustus (nn fotokatalüütiline protsess) ja teises astmes vihmavesi peseb laguproduktid maha. Kuna aknaklaas on valguse mõjul muutunud superhüdrofiilseks (s.t veetilkasid ei moodustu, vaid vesi katab akna ühtlase õhukese kihina), siis vihmavesi peseb järele jäänud laguproduktid väga hästi ära. Seesugused isepuhastuvad aknaklaasid on juba ka müügil, kuid nende efektiivsus vajab veel parandamist.

TiO₂ suurimaks puuduseks põhjamaise kliima korral rakenduslikus mõttes on suhteliselt väike päikesevalguse neeldumine. Sõltuvalt TiO₂ kristallstruktuurist neeldub titaandioksiidis valgus, mille lainepikkus on väiksem kui 387 nm (anataas) või 410 nm (rutiil). Üheks võimaluseks parandada päikesevalguse neeldumist TiO₂-s (ja seega ka suurendada tema kasulikke omadusi) on lisada sobivalt valitud lisandit (nn dopeerida). Artiklis „Effect of cobalt doping and annealing on properties of titania thin films prepared by sol-gel process“ [1] uuritakse koobalti lisandi mõju TiO₂-le.

Sool-geel protsess, mille käigus antud objektid on valmistatud, sisaldab lähteainete kuumutamist. Joonisel 1 on näidatud erinevatel temperatuuridel kuumutatud kiledelt mõõdetud elektronmikroskoobi pildid



Joonis 1. Elektronmikroskoobi pildid (kogupilt) ja mõõdetud koobalti röntgenfluorestsents (paremal all nurgas olev ala, mõõdetud kastiga märgitud piirkonnast) koobaltiga dopeeritud TiO₂ kiledelt, mis on kuumutatud 550 (a), 750 (b) ja 950 °C (c) juures.

(kogupilt) ja teatud piirkonnast (märgitud musta kastiga) mõõdetud koobalti röntgenfluorestsentskiirgus (Co L_{23}), mis näitab, kuidas koobalt objektil jaotub. Uurimise tulemusena selgus, et koobalt ei jagune kiles ühtlaselt, vaid hakkab teatud tõenäosusega kogunema koobaltirikasteks „saarekesteks“ kile pinnal. Sellised „saarekesed“ muutusid suuremaks kuumutustemperatuuri tõstmisel.

Kui täpsemalt uurida, kuidas koobalti lisand TiO_2 -s „lahustub“, selgub, et ta moodustab muu hulgas ka koobaltititanaati, mis on eraldiseisev kristallifaas. Antud töös selgus, et koobaltiga dopeeritud TiO_2 neelab rohkem nähtavat valgust kui ilma lisandita TiO_2 . Samas siiski ei parandanud koobaltiga dopeerimine TiO_2 superhüdrofiilseid (s.t tilkade moodustumise vastaseid) omadusi.

ALGALLIKAS

- [1] Rainer Pärna, Urmas Joost, Ergo Nõmmiste, Tanel Käämbre, Arvo Kikas, Ivar Kuusik, Mika Hirsimäki, Ilmar Kink, Vambola Kisand. *Applied Surface Science* 257 (2011) 6897.

PÕLEVKIVITÖÖSTUSE KÕRVAL- PRODUKTIST VALMISTATUD KUNSTLIHASED

FRIEDRICH KAASIK¹ JA ANNA-LIISA PEIKOLAINEN²

¹TÜ, ²TTÜ Keemiainstituut

Enamik inimeste ehitatud mootoreid on suured ja valjud, aga samas tugevamad ja ehituselt palju lihtsamad kui inimlihased. Teadlased töötavad juba pikemat aega niinimetatud tarkade materjalide kallal, mis võimaldaks luua midagi inimlihastele sarnanevat. Taolistel pehmetel, hästi painduvatel, miniatuursetel ja vaikselt töötavatel materjalidel oleks rakendust näiteks biomeditsiinis, robootikas, kosmosetööstuses ja mujalgi. Tänapäevaks on erinevate uurimisgruppide poolt välja töötatud mitmeid erinevaid kunstlihase ehk täituri tüüpe.

Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudi teadlased on koostöös Tallinna Tehnikaülikooli Keemiainstituudi töörühmaga loonud süsinikaerogeelil baseeruvaid elektroodmaterjale täituritele. Elektroaktiivsest polümeer-materjalist täituriid reageerivad pinge rakendamisele liigutusega, olles samal ajal võimelised elektrilaengut salvestama. Need on pehmed ja painduvad, seetõttu võib neid käsitleda kui kunstlihaseid ning nad sobivad kasutamiseks sensoritena.

Töös kasutatud süsinikaerogeel on sünteesitud Eesti põlevkivitööstusest pärit õli tootmise jäägist 5-metüülresortsinoolist. Aerogeel on elektroodmaterjaliks sobiv suure eripinna ja poorsuse tõttu, mis on oluline täituri liigutusvõime seisukohast. Tartu Ülikooli töörühm on süsinikaerogeelist elektroodidega täitureid ka varasemalt testinud, kasutades nende valmistamiseks otsest koostemeetodit, mis seisneb elektroodmaterjali pihustamises ioonse vedelikuga immutatud NafionTM membraanile ja saadi täituriid mahtuvusega 0,014 F/cm², ning lähtudes karbiidsest süsinikust – 0,42 F/cm².

Kõnealuse töö (vt algallikas) eesmärk oli valmistada süsinikaerogeeli baasil elektroodidega täitur mõnevõrra lihtsamal viisil ning võrrelda sel-



Joonis. Ülesvõte kullast kontaktide vahele paigutatud täiturist (elektroodid aktiveeritud süsinikaerogeeli baasil) selle maksimaalse painutuse hetkel pinge $\pm 2,8$ V juures. Painutuse ulatus 1,1 %, painutuse kiirus 0,037 %/s.

le füüsikalisi näitajaid varem tehtuga. Selles töös pandi täitur kokku n-ö kiht-kihi haaval: kõigepealt tehti valmis elektrodikihid süsinikaerogeelist, ioonsest vedelikust (1-etüül-3-metüülimidiasoolium tetrafluoroboraat) ja polümeerist polü-(vinülideendifluoriidheksafluoropropüleen) ning separaatoriks elektrodide vahel oli komposiit samast polümeerist ja ioonsest vedelikust. Elektrodikihtide vahele kinnitati separaatorikiht kuumpressimise teel. Mittelenduv elektrolüüt (ioonse vedelik) teeb täituri töökindlaks ka tavalistes tingimustes töötamiseks.

Süsinikaerogeelil põhinevad täituriid on paljulubavad, sest nende liigutamiseks vajalik pinge on madal (vt joonis) ning nad omavad suurt mahtuvust, vaatamata asjaolule, et pingele reageerimise/liigutamise kiirus on suhteliselt aeglane. Võrdluseks võib tuua süsinikananotorud, mida on nende suure elektrijuhtivuse tõttu juba üsna palju uuritud ning nendest valmistatud täiturite liikumist iseloomustab sagedus isegi kuni 200 Hz. Seega, välja töötatud täituriid on omal kohal, kui on tegemist rakendustega, kus on vajalik aeglane täituri liigutus.

Autorid soovivad tänada prof Alvo Aablood, Mihkel Koeli, Janno Toropit abi eest antud materjali valmimises, uurimises ja artikli koostamisel.

ALGALLIKAS

- [1] Friedrich Kaasik, Janno Torop, Anna-Liisa Peikolainen, Mihkel Koel, Alvo Aabloo. Carbon aerogel based electrode material for EAP actuators. *Proceedings of SPIE* 7976 (2011) pp. 797600-1 – 797600-8. http://spiedigitallibrary.org/proceedings/resource/2/psisdg/7976/1/797600_1

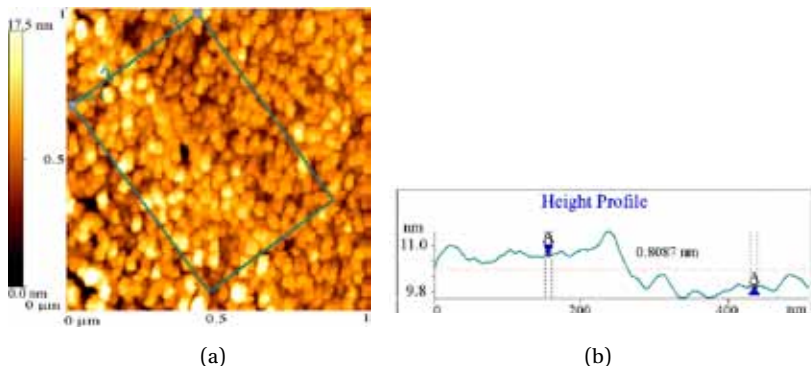
DIELEKTRIKUTE AATOMKIHT- SADESTAMISEST GRAFEENILE

HARRY ALLES

TÜ Füüsika Instituut

Üheainsa aatomkihi paksune grafeen, mille moodustavad kuusnurkses võres olevad süsinikuaatomid ja mida loetakse hetkel kõige potentsiaalsemaks järglaseks ränile tuleviku nanoelektronikas, on olnud viimastel aastatel ehk enim uuritud materjal. Materjaliteaduses valitsenud „grafeenibuumile“ andis läinud aastal veelgi hoogu juurde 2010. aasta Nobeli füüsikapreemia, mis läks Manchesteri Ülikooli füüsikutele Andre Geimile ja Konstantin Novosjolovile, kes viisid veidi rohkem kui 5 aastat tagasi läbi murrangulised eksperimendid selle 2-dimensionaalse materjaliga (vt Horisont 6/2010). Alates 2008. aastast on grafeeniga tegeldud ka Tartu Ülikooli Füüsika Instituudis, kus on uuritud võimalusi, kuidas katta grafeeni keemiliselt inertne pind üliõhukese, ideaalis vaid mõne nanomeetri paksuse isolaatorkihiga, mis oleks kindlasti vajalik grafeenil põhinevate nanoelektroniliste seadmete valmistamiseks (vt Horisont 6/2009). Nendest eksperimentidest ilmus hiljuti Tartu materjaliteadlastelt ülevaateartikkel [1], kus on üritatud anda pilt nii enda kui ka teiste uurimisrühmade saavutustest sellel alal.

Grafeeni katmiseks õhukese isolaatorkihiga võib kasutada erinevaid meetodeid, kuid üks perspektiivikamaid neist on aatomkihtsadestamine (ingl *Atomic Layer Deposition, ALD*), millega Tartus on tegeldud juba rohkem kui paar aastakümnet. Et saada õhukest heade dielektriliste omadustega kattekihti, kasutati kahetemperatuurset kasvatusprotsessi. Näiteks kvaliteetse HfO_2 -kihi jaoks sünteesiti kõigepealt suhteliselt madalal temperatuuril (170–180 °C) grafeeni pinnale umbes 1 nm paksune nakkekiht, mille peale kõrgemal temperatuuril (300 °C) sünteesiti ülejäänud dielektrikiht paksusega 10–30 nm (vt joonis). Nagu näitasid võetud Raman-spektrid, ei tekitanud selline sadestamismeetod grafeenis täiendavaid defekte. Koostöös Aalto Ülikooli Külmalaboriga uuriti ka HfO_2 -kihi mõju grafeeni laengukandjate liikuvusele [2].



Joonis. (a) Aatomjõumikroskoobi pilt ränidioksiidile asetatud grafeeninäidise serva kohalt. Nii grafeeni (vasakul allpool) kui ka ränidioksiidi pind on kaetud ühtlase HfO_2 -kihiga ning (b) grafeeni ja ränidioksiidi kõrguseprofiilide vahe ($\sim 0,8$ nm) on jäänud samaks ka peale grafeeni dielektrikuga katmist kahetemperatuurset kasvatust protsessi kasutades.

Tulemuseks saadi, et elektronide liikuvus kahekihilises grafeeninäidises peale 11 nm paksuse HfO_2 -kihiga katmist vähenes sõltuvalt rakendatud pingest kuni 30–40%, mis näitab, et kirjeldatud kahetemperatuurne meetod võiks leida kasutust grafeenialastes rakendustes.

ALGALLIKAD

- [1] Harry Alles, Jaan Aarik, Jekaterina Kozlova, Ahti Niilisk, Raul Ramula and Väino Sammelselg. Atomic layer deposition of high-k oxides on graphene. *Graphene – Synthesis, Characterization, Properties and Applications*, Jian Ru Gong (Ed.), InTech (2011) 99-114. <http://www.intechopen.com/articles/show/title/atomic-layer-deposition-of-high-k-oxides-on-graphene>
- [2] Harry Alles, Jaan Aarik, Aleks Aidla, Aurelien Fay, Jekaterina Kozlova, Ahti Niilisk, Martti Pärs, Mihkel Rähn, Maciej Wiesner, Pertti Hakonen and Väino Sammelselg. Atomic layer deposition of HfO_2 on graphene from HfC_{14} and H_2O . *Central European Journal of Physics* 9 (2011) 319-324. <http://www.springerlink.com/content/q673467638192t70/>

SUPERPARVEDE MORFOLOOGIA UURIMINE AITAB MÕISTA KOSMILISE VÕRGUSTIKU OMADUSI

MARET EINASTO JA ELMO TEMPEL

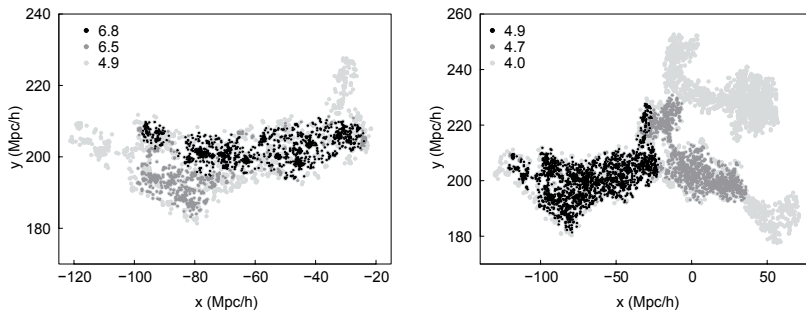
Tartu Observatoorium

Tartu Observatooriumi teadlased Maret Einasto, Juhan Liivamägi, Elmo Tempel, Enn Saar, Erik Tago, Jaan Einasto ja Peeter Einasto koos kaasautoritega Tuorla Observatooriumist ja Valencia Ülikooli Observatooriumist avaldasid kaks artiklit, milles nad uurivad superparvede morfoloogiat ning galaktilist koostist. Nendes töödes kasutati Juhan Liivamäe poolt Sloani digitaalse taevaülevaate andmete põhjal koostatud superparvede kataloogi.

Lähemalt uuriti Sloani Suure Seina, meie kosmilise lähiümbruse kõige rikkama ja suurema galaktikasüsteemi superparvi ning nende galaktilist koostist. Näidati, et Seina kõige rikkam superparv meenutab mitmeharulist filament, teised mitmikämblikke (vt joonis).

Niisugust mitmeharulist suure tihedusega filamendilaadse morfoloogiaga superparvi nagu Sloani Suures Seinas ei ole seni vaatlustest rohkem leitud ega ka kosmoloogilistest mudelitest saadud.

Ka Seina superparvede galaktiline koostis on erinev: kõige rikkamas superparves on suhteliselt rohkem punaseid galaktikaid kui teistes Seina superparvedes. Ligi kolmandik nende superparvede heledaid punaseid galaktikaid on spiraalsed; spiraalsete punaste galaktikate värvide hajumine on suurem kui elliptiliste punaste galaktikate oma. See viitab nende galaktikate erinevale arengule. Samuti on elliptiliste ja spiraalsete punaste peagalaktikatega gruppide jaotus nendes superparvedes mõnevõrra erinev. Praegu kosmoloogilised mudelid superparvede morfoloogilist mitmekesisust ja erinevusi galaktilises koostises veel ei seleta.



Joonis. Sloan Suur Sein – meie lähikümbruse kõige suurem ja rikkam galaktikasüsteem. Erinevatele tihedusnivoodele vastavad galaktikasüsteemid Suures Seinas on märgitud eri toonidega.

ALGALLIKAD

- [1] M. Einasto, L.J. Liivamägi, E. Tempel, E. Saar, E. Tago, P. Einasto, I. Enkvist, J. Einasto, V.J. Martinez, P. Heinämäki, P. Nurmi. The Sloan Great Wall. Morphology and Galaxy Content. *The Astrophysical Journal* 736:51 (2011).
- [2] M. Einasto, L.J. Liivamägi, E. Tago, E. Saar, E. Tempel, J. Einasto, V.J. Martinez, P. Heinämäki. SDSS DR7 superclusters. *Astronomy & Astrophysics* 532:A5 (2011).

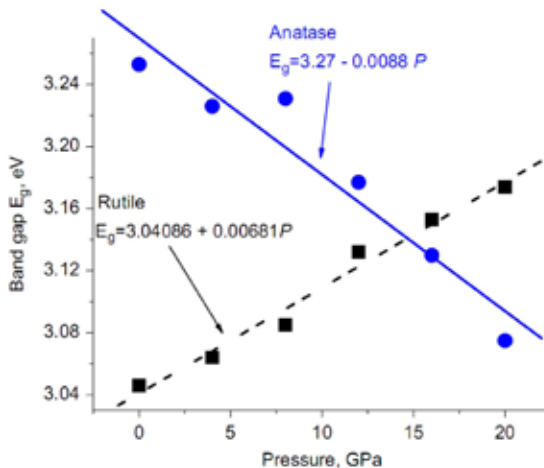
PUHASTE TiO₂ JA DOPEERITUD YAlO₃:Ce³⁺ KRISTALLIDE OPTILISTE OMADUSTE MODELLEERIMINE

MIKHAIL G. BRIK, ILMO SILDOS, VALTER KIISK

TÜ Füüsika Instituut

Töös kombineeritakse kahte sõltumatut komplementaarset arvutusmeetodit (millest üks on poolempiiriline, teine aga *ab initio*, s.t lähtub alprintsiipidest) mõningate rakenduslikult aktuaalsete dielektriliste ja pooljuhtkristallide (YAlO₃:Ce³⁺ ja TiO₂) optiliste omaduste modelleerimiseks.

YAlO₃:Ce³⁺ on materjal, mis leiab eelkõige rakendamist stsintillaatorites (s.t seadmetes, mis registreerivad ioniseerivat kiirgust). Käesolevas uurimuses püstitati täiustatud teooria hindamaks seda tüüpi materjali-



Joonis. TiO₂ erinevate kristallifaaside keelutsooni laiuse arvutuslik sõltuvus rakendatud rõhust.

de neelamisvõimet UV kiirguse alas. Püstitatud mudel sisaldab vähem vabu parameetreid, kuid annab ometigi hea kooskõla eksperimendiga.

Laia keelutsooniga pooljuht TiO_2 on tuntud seoses oma fotokatalüüsi ja päikeseenergeetika rakendustega, ent probleemiks on nähtava valguse nõrk neeldumine selles kristallis. Üks võimalus aine optiliste omaduste timmimiseks on kõrgete rõhkude rakendamine. Töös on modelleeritud TiO_2 levinud kristallifaaside omadusi erinevatel rõhkudel ja näidatud, et anataasi faasi korral on keelutsooni laiust võimalik suurte rõhkude rakendamise teel nihutada märksa madalamatele energiatele (s.t nähtava valguse diapasooni). Seejuures on huvitav, et TiO_2 teises tuntud kristallifaasis (rutiilis) keelutsooni laius hoopis suureneb rõhu all (vt joonis).

ALGALLIKAS

- [1] Mikhail G. Brik, Ilmo Sildos, Valter Kiisk. Calculations of physical properties of pure and doped crystals: *Ab initio* and semi-empirical methods in application to $\text{YAlO}_3:\text{Ce}^{3+}$ and TiO_2 . *Journal of Luminescence* 3 (2011) 396–403. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022231310003996>

AEROSOOLIOSAKESTE ELEKTRILINE LAADUMINE BIPOLAARSES IOONATMOSFÄÄRIS

JAAN SALM JA EDUARD TAMM

TÜ Füüsika Instituut

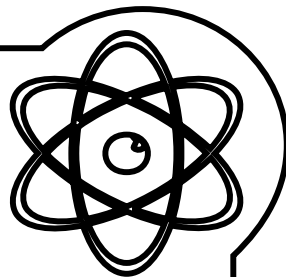
Atmosfääriõhk on keerulise koostisega. Peale gaasiliste komponentide leidub õhus ka hõljuvaid kondenseerunud aine osakesi, aerosooliosakesi, mis oma mõõtmetelt on gaasimolekulidest oluliselt suuremad. Aerosooliosakeste mõõtmeskaala on lai, läbimõõutudega 1,5 nanomeetrist kuni kümnete mikromeetriteni. Üheks huvipakkuvaks eriküsimuseks aerosooli uurimisel on olnud osakeste elektrilaengud. Juba XX sajandi alguses jõuti teadmiseni, et aerosooliosakeste elektrilaengud tekivad osakeste juhuslikel kokkupõrgetel veelgi väiksemate laetud osakestega, klasterioonidega. Klasterioonid on molekulide mõõtmete suurusjärgus, läbimõõutudega 0,3—1,5 nm, ja kannavad ühte negatiivset või positiivset elementaarlaengut. Klasterioonide tekkepõhjuseks atmosfääris on ioniseeriv kiirgus, kuid nad võivad tekkida ka tugevas elektriväljas, näiteks koroonalahenduses.

Juhuslikul kokkupõrkel klasteriooniga toimub laenguülekanne: aerosooliosake saab negatiivse või positiivse laengu lisaks varem kantud laengule. Niisuguseid laenguülekanne protsesse kirjeldatakse matemaatilisel diferentsiaalvõrranditega, mis sisaldavad teatavaid ion-aerosool-kleepumiskoeffitsiente. Kleepumiskoeffitsiendid iseloomustavad laenguülekanne kiirust ja neid defineeritakse mitmel viisil. Keskmistades sama läbimõõduga, kuid erinevate laengutega osakeste kleepumiskoeffitsiendid üle kõikide laenguarvude, saadakse ekvivalentne kleepumiskoeffitsient. Allpoolviidatud artiklis on uuritud ekvivalentse kleepumiskoeffitsiendi arvutusvalemeid. Õnnestus lihtsustada ekvivalentse kleepumiskoeffitsiendi arvutusvalemit statsionaarses olukorras, kui osakese läbimõõt on üle 50 nm. Lihtsustamisel oli suureks abiks Poissoni summeerimisvalem, mis võimaldas aeglaselt koonduva lõp-

matu rea summa asendada lihtsa analüütilise avaldisega. Töö tulemusena saadud arvutusvalem võib leida kasutamist sellistesioon-aerosool vastasmõju mudelites, mis on statsionaarse või kvaasistatsionaarse iseloomuga.

ALGALLIKAS

- [1] Jaan Salm and Eduard Tamm. Dependence of the Ion-Aerosol Equivalent Attachment Coefficient on the Ratio of Polar Conductivities in a Steady State. *Aerosol and Air Quality Research* 11 (2011) pp. 211-217. http://www.aaqr.org/Doi.php?id=1_AAQR-10-11-OA-0100&v=11&i=3&m=6&y=2011



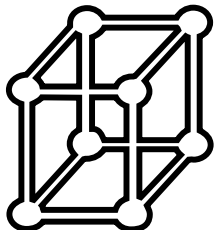
**XLI
EESTI
FÜÜSIKAPÄEVAD**

JA

**XXXIII
FÜÜSIKAÕPETAJATE PÄEVAD**

22. JA 23. MÄRTS 2011

TARTUS



22.–23. MÄRTS 2011. A

TARTU ÜLIKOOLI FÜÜSIKAHOONE

TÄHE 4, TARTU

TEISIPÄEV, 22. MÄRTS

1. SESSIOON

Avasõnad	10.00
EFS preemiade kätteandmine, laureaadi ettekanne Ivo Heinmaa (KBFI) Kõrge lahutusega tahkise tuumamagnetresonants krüotemperatuuridel	10.10
Harry Alles (TÜ FI) 2010. a Nobeli füüsikapreemia.	11.10
Stendiettekanded, kohvipaus	11.30

2. SESSIOON

Vladimir Hižnjakov (TÜ FI) Heelium-3 ja heelium-4 kvantvedeliku tilkade spektroskoopia. . .	11.45
Stefan Groote (TÜ FI) Universum katseklassis ehk mida kaootilised stringid meile reedavad	12.15
Kaupo Kukli¹, Aile Tamm¹, Mukesh C. Dimri², Raivo Stern² (TÜ FI ¹ , KBFI ²) Õhukesed magnetmaterjalid	12.45
<i>Lõunapaus</i>	13.15

3. SESSIOON

PANEELDISKUSSIOON - ELU ÜMBER EEBENIPUUST TORNI

Teadlaste kohta on õigusega öeldud, et nad elavad eebenipuust tornis. Aeg-ajalt nähakse seal kedagi väljumas ja suundumas näiteks ärisse või administratiivsele tööle. Viimasel ajal on ohtrasti liikumas neid, kes populariseerivad teadust.

Mida nad seal õieti teevad? Kellele? Miks?

Ja mida me sel korral teaduseks nimetame?	14.30
<i>Kohvipaus</i>	

Eesti Füüsika Seltsi üldkogu	16.30
Eesti Füüsika Seltsi seltsiohtu Tähe 4 kohvikus	18.00

KOLMAPÄEV, 23. MÄRTS

4. SESSIOON

Leonid Dolgov, Siim Pikker, Valter Kiisk, Ilmo Sildos (TÜ FI)	
Plasmonics, what on earth is that?	9.30
Els Heinsalu¹, Marco Patriarca¹, Robert Kitt², Jaan Kalda² (KBFI ¹ , TTÜ Kübi ²)	
Ülevaade majandusfüüsikast Eestis	10.00
Andi Hektor (KBFI)	
CERN + kosmoseeksperimentid = väga põnevad arengud osakestefüüsikas	10.30
<i>Kohvipaus</i>	
Karl Kruusamäe (TÜ TI)	
Robootikast mikromaailmas	11.15
Indrek Jõgi, Vahur Sabre, Ants Haljaste, Matti Laan, Viktor Bichevin, Henn Käambre (TÜ FI)	
Plasma ja katalüsaatorid <i>vs</i> keskkonnasaaste	11.45
Stendiettekanded, lõunapaus	12.15

FÜÜSIKAÕPETAJATE SESSIOON

Riina Murulaid, Jaan Paaver (EFS füüsikaõpetajate osakonna juhatus)	
Avasõnad. Füüsikaõpetajate võrgustik aastal 2010	13.00
Ülle Kikas (HTM)	
Mida peaks teadma ja oskama 15-aastane õpilane rahvusvahelisel loodusteaduste olümpiaadil	13.10
Marko Reedik (Eksamikeskus)	
Põhikooli ja gümnaasiumi lõpetamisest uue õppekava rakendumisel 2014. aastal	13.40
Svetlana Ganina (TÜ KFK)	
TÜ Koolifüüsika Keskuse poolt pakutavad täiendõppe kursused füüsikaõpetajaile	14.00
Kaido Reivelt (EFS, TÜ FI)	
Õpikodade projekt: 2010 aasta kogemus	14.10
<i>Kohvipaus</i>	14.20
Kaido Reivelt (EFS, TÜ FI)	
Eesti Füüsika Seltsi e-õpiku projekt	14.40

Jaak Jaaniste (EMÜ, Tartu Tähetorni Astronoomiaring)

Tartu Tähetorn: astronoomiat koolidele 15.00

Jaak Järvik (TTÜ/AM Instituut)

Ketserlike mõtteid õppimisest ja elektrist 15.15

Füüsikaõpetajate osakonna üldkogu, arutelu, 2011. a plaanid 15.45

STENDISESSIOON

Niina Voropajeva, Aleksei Šerman (TÜ FI)

Poollõpmatu kahe- ja kolmedimensionaalse Heisenbergi
antiferromagneetiku äärelähedane ja keskelasuv piirkond

Riinu Ots, Ardi Loot, Marko Kaasik (TÜ FI)

A wintertime local-to-regional scale test case study of SILAM model

KÕRGE LAHUTUSEGA TAHKISE TUUMAMAGNETRESONANTS KRÜOTEMPERATUURIDEL¹

IVO HEINMAA

Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut

1. SISSEJUHATUS

Tuumamagnetresonants (TMR) on eksperimentaalne meetod ainete lokaalse struktuuri ja dünaamika uurimiseks. Sealjuures vedelike, lahuste TMR on asendamatu meetod molekulaarse struktuuri üheseks määramiseks. Täna uurijate kasutuses olevate kõrgete magnetväljade ja tundlike krüo-mõõtepeadega saab mitmesuguste korrelatsioonispektrite abil uurida väga keeruliste suurte molekulide, sh valkude keemilist struktuuri ja dünaamikat.

Tahkise TMR võimekus on paljuski piiratud väiksema spektraalse lahutusvõimega. Tänu tuumadele mõjuvate lokaalsete vastasmõjude anisotroopiale on tahkete pulbriliste proovide TMR spektrijooned reeglina väga laiad ja ainetes, kus elementaarakk sisaldab palju erinevaid positsioone, on resonantside eristamine keeruline, kui mitte võimatu. Siiski, tahke keha kõrge lahutuse meetodite rakendamisel nt proovi kiire pöörlemise korral ümber telje, mis paikneb välise magnetvälja suhtes 54,7 kraadi, nn maagilise nurga all (inglisekeelne termin MAS – *magic angle spinning*), saadakse pulbriproovist vedeliku spektrile sarnane spekter, kus erinevates võrepositsioonides paiknevad tuumad annavad kitsad spektrijooned sagedustel, mis vastavad isotroopsetele keemilise nihke väärtustele. Vaatamata pisut väiksemale lahutusvõimele – vedelike TMR spektrijoone laius on tüüpiliselt väiksem kui sajandik ppm (*part per million* – miljondik resonantssagedusest), tahke keha kõrge lahutusega TMR spektris saadakse spektrijoone laiuseks tüüpiliselt vaid 0,5 ppm – arenevad tahke keha kõrge lahutusega TMR meetodid jõudsalt ja

¹ Eesti Füüsika Seltsi aastapreemia 2011 laureaadi ettekanne.

viimastel aegadel kõneldakse TMR kristallograafiast, kus TMR meetodiga määratakse keemilises seoses olevad tuumad ja tuumadevahelised kaugused.

Keerukad TMR mõõtepead tahke keha kõrge lahutusega TMR spektrite saamiseks töötavad enamasti väga piiratud temperatuurivahemikus. Parimatel muudetava temperatuuriga MAS mõõtepeades on minimaalseks temperatuuriks 150 Kelvini kraadi (-123 °C). Selleks et uurida nt milline on aine põhiolek, millised lokaalse struktuuri muutused kaasnevad mitmesuguste faasiüleminekutega, millised on lokaalse võre- või elektronsüsteemi dünaamika iseärasused jms, oleks tarvis saavutada temperatuurid tublisti alla vedela lämmastiku temperatuuri (77,4 K).

Viimaste aastate töö tulemusena õnnestus käesoleva kirjutise autoril ehitada MAS mõõtepea, mis võimaldab saada kõrge lahutusega TMR spektreid vedela heeliumi lähedastel krüotemperatuuridel (krüoMAS mõõtepea). Allpool anname ülevaate krüoMAS tehnika arengust, kirjeldame krüoMAS mõõtepea ehitust ja toome näitena kõrge lahutusega ³¹P TMR spektri temperatuurisõltuvuse titaanfosfaadis, TiPO₄, milles krüoMAS tehnika abil avastati hiljuti spinn-Peierlsi faasiüleminek.

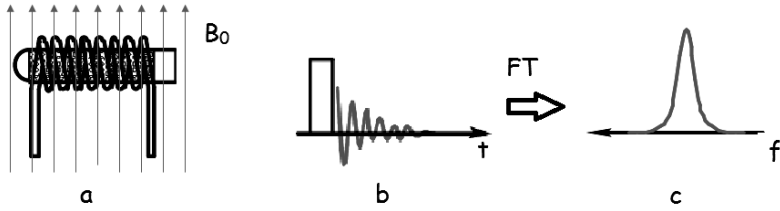
2. KÕRGE LAHUTUSEGA TAHKISE TMR

TMR meetod põhineb ideel, et tugevas magnetväljas spinniga tuuma energianivood lõhenevad Zeemani efekti tõttu. Zeemani nivoo vahe on ühtlasi tuumaresonantsi sagedus ja sõltub lineaarselt magnetvälja tugevusest. Tuumade tasakaaluline magneetuvus M_0 on kirjeldatav Curie' seosega

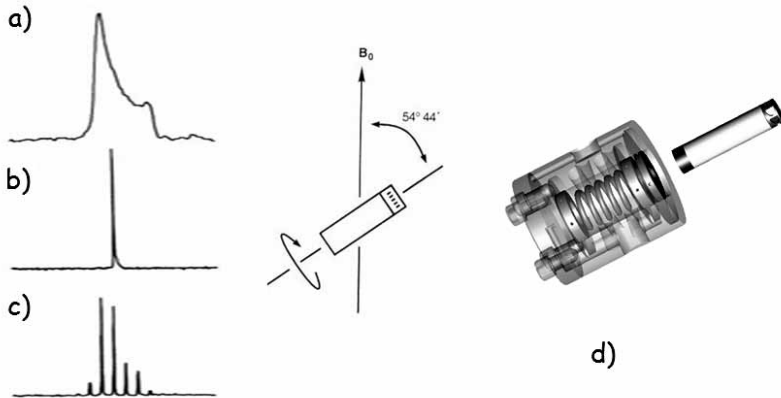
$$M_0 = \frac{N\gamma^2\hbar^2 B_0 I(I+1)}{3kT}, \quad (1)$$

kus N on tuumade arv, γ on tuuma güromagnetiline suhe, B_0 on välise magnetvälja tugevus, I on tuuma spinni arv, k on Boltzmanni tegur ja T on temperatuur. Et M_0 on võrdeline spektrijooni intensiivsusega, siis näeme, et TMR signaali intensiivsus on võrdeline proovis olevate tuumade arvuga ja pöördvõrdeline temperatuuriga. TMR eksperimendi põhimõtteskeem on kujutatud joonisel 1.

Tahkes aines sõltub vaadeldava tuuma resonantsisagedus kristalli orientatsioonist magnetvälja suhtes. Seetõttu saadakse pulbrilisest proo-



Joonis 1. TMR eksperimendi põhimõtteskeem. Uuritav aine paigutatakse homogeenses magnetväljas paiknevasse mõõtepooli, mis on häälestatud uuritava tuuma resonantsagedusele (a). Mõõtepooli otstele rakendatakse tugev raadiosageduslik impulss ja registreeritakse impulsi tagajärjel tuumade magnetuvuse poolt poolis indutseeritud signaal (b). Sagedusspekter saadakse kvadratuur-detekteeritud signaali Fourier' pöörde abil (c).



Joonis 2. Maagilise pöörlemise mõju $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ pulbrilise proovi ^{207}Pb TMR spektrijoone kujule ja pöörlemissõlme läbilõige: a) staatilise proovi spekter; b) proovi pöörlemise kiirus on suurem kui pulbri spektri laius; c) pöörlemise kiirus on väiksem kui pulbri spektri laius; d) pöörlemissõlme läbilõige koos rootoriga.

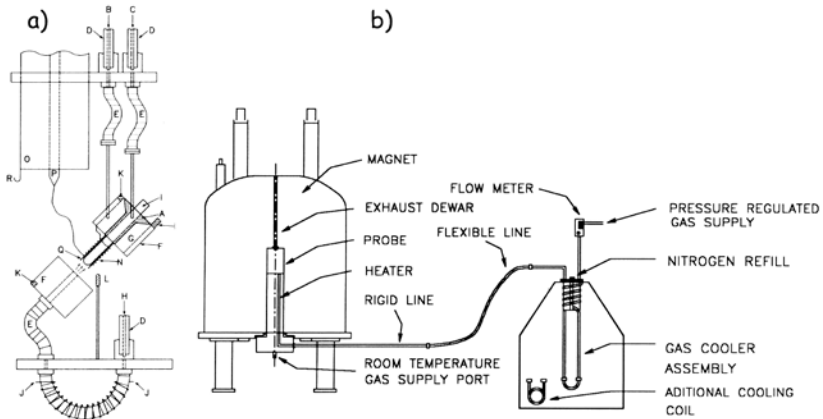
vist iseloomuliku kujuga spektrijoon, nn pulbrijoon, mis vastab monokristalli kõikvõimalike orientatsioonide juhuslikule jaotusele (vt joonis 2a).

Pulbrijoone iseäralikud sagedused annavad vaadeldava tuuma lokaalse vastasmõju (nt keemilise nihke) tensori peaväärtused. Anisotroopsete vastasmõjude keskmistamise ja kõrge lahutuse saavutamise peamiseks meetodiks on pulbrilise proovi kiire pööramine maagilise nurga all (MAS). Meetodi võtsid esmakordselt kasutusele E. R. Andrew 1958 [1] ja sõltumatult I. Lowe aasta hiljem [2]. KBFI-s võeti MAS tehnika kasutuse-

le 1976. aastal akadeemik E. Lippmaa eestvedamisel [3]. Idee maagilise pöörlemise kasutamiseks tahke keha kõrge lahutusega spektri saamiseks sündis monokristalli resonantssageduse nurgasõltuvuste analüüsist. Selgus, et pöörítades monokristalli ümber telje, mis paikneb välise magnetvälja suhtes maagilise nurga $\theta_m=54,7^\circ$ all, kus $\cos^2\theta_m=1/3$, on mistahes orientatsiooniga monokristalli rotatsioonisõltuvuse keskväertuseks isotroopsele keemilise nihkele vastav sagedus. Tänapäev enam levinud MAS mõõtepeades pöörleb mõõtepoolis õhklaagritele toetuv keraamikast (ZrO_2 või Si_3N_4) valmistatud silindriline rootor, mille üks kork on vormitud turbiiniks (vt joonis 2d). Rootorit ajab ringi turbiinikorgi labadele juhitud õhujuga. Stabiilse kiire pöörlemise tagavad täpsed õhklaagri pilud ja turbiini geomeetria. Maksimaalsed pöörlemiskiirused on sõltuvad rootori materjali tõmbetugevusest ja pöördvõrdelises seoses rootori läbimõõduga [4, 5]. 1 mm diameetriga ZrO_2 rootori maksimaalseks pöörlemiskiiruseks on ca 90 kHz. Pöörlemissõlme konstruktsioonis jälgitakse, et kasutatud materjalide magnetilised omadused ei rikuks magnetvälja homogeensust mõõtepooli sees. Probleemiks on ka mõõtepool ise – diamagnetilise vaskpooli tekitatud ebahomogeensus on suurusjärgus 0,5 ppm, mida on raske korrigeerida mõõtepea väliste korrigeerimisvõimudega. Parema tulemuse annab alumiiniumiga kompenseeritud nn null-vastuvõtlikkusega materjali kasutamine. Lisaks kiirele ja stabiilsele pöörlemisele peab TMR mõõtepea elektriskeem kannatama tugevaid raadiosagedusliku välja impulsse, mille puhul pooli otstele rakendatakse kilovoldi suurusjärgus pinget.

3. MAAGILINE PÖÖRLEMINE KRÜOTEMPERatuuridel

MAS tehnika rakendused krüotemperatuuridel (krüoMAS = MAS temperatuuridel allpool vedela lämmastiku temperatuuri, $T < 77$ K) algasid veerand sajandit tagasi. Esimesena demonstreerisid MAS tehnikaga saadud süsiniku ^{13}C spektreid vedela heeliumi lähedastel temperatuuridel IBM laboratooriumi teadlased prof Yannoni eestvedamisel 1988. aastal [6]. Yannoni grupi krüoMAS mõõtepea põhimõtteskeem on toodud joonisel 3a. Mõõtepeas saavutati proovi pöörlemiskiiruseks 1-2 kHz, liiga väikesed kiirused, et omada praktilisi rakendusi. Sealjuures raporteeriti krüoMAS eksperimendi vedela heeliumi kuluks ~15 l/h (temperatuuril $T = 30$ K, rotatsioonikiirusel 1 kHz).

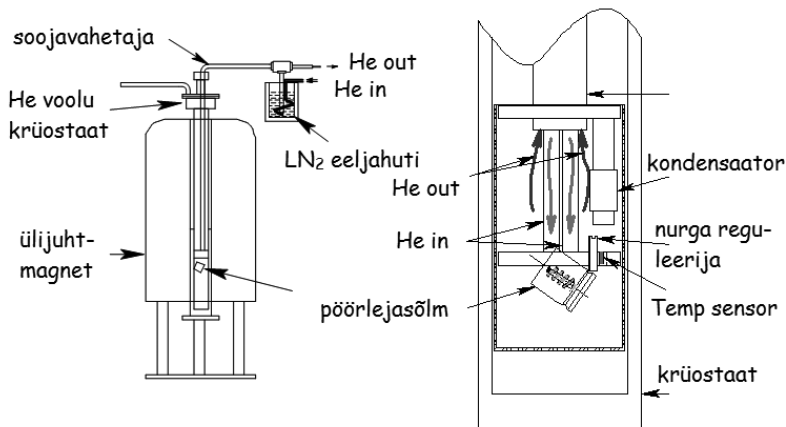


Joonis 3. Yannoni grupi krüoMAS mõõtepea põhimõtteskeem (a) ja krüoMAS mõõtepea konstruktsioon firmalt Doty Scientific (b). Yannoni konstruktsiooni põhiidee seisnes pika ampulli (1) pööritamises vastavas staatoris (G). Mõõtepool (N) ja pulbriproov asuvad väljaspool staatorit ning jahutatakse eraldi He gaasiga, mille temperatuuri hoitakse termostaadiga (F).

90ndatel aastatel konstrueeris krüoMAS mõõtepea ameerika väikefirma Doty Scientific (vt joonis 3b). Selles mõõtepeas oli pöörlemissõlm paigutatud vastavasse krüostaati ja 5 mm diameetriga rootoris paiknevat pulbriproovi pööritati külma heeliumgaasiga. Madalaim temperatuur selles peas lubati olevat 35 K, maksimaalne pöörlemiskiirus 4 kHz. Suured soojakaod ja vähene töökindlus klientidele ei meeldinud ja mõõtepea kõrvaldati müügist.

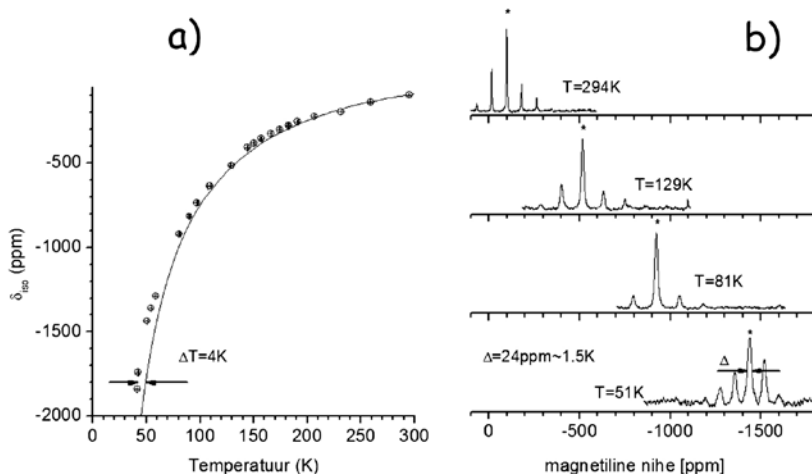
Võttes arvesse eelkäijate kogemusi, õnnestus meil KBFI-s valmistada krüoMAS mõõtepea, mille parameetrid võimaldavad esmakordselt ajaloos saada pulbriproovist kõrge lahutusega spektreid temperatuurivahemikus $300\text{ K} > T > 10\text{ K}$ säilitades piisavalt kiire rotatsioonikiiruse madalate temperatuurideni. Mõõtepea ja pöörlejakambri põhimõtteskeem on toodud joonisel 4.

Mõõtepea paikneb tervenisti gaasivoolu krüostaadis (firmalt Janis Research Inc), mille abil hoitakse krüostaadis vajalikku temperatuuri. Krüostaat koos mõõtepeaga paigutatakse ülalt ülijuhtmagnetisse (laiavaaga 8,5 Tesla magnet). Pöörlejas kasutatakse 15 mm pikkuseid 1,8 mm välisläbimõõduga Si_3N_4 rootoreid. Rootor toetub He gaasi laagritele ja teda ajab ringi turbiinikorgile suunatud He gaasi vool. Konstruktsiooni peamiseks eripäraks on pöörlejasse suunatud He gaasi jahutamine



Joonis 4. KBF1 krüoMAS mõõtepea põhimõtteskeem ja pöörlejakambri läbilõike skeem.

krüostaadist väljuva gaasiga spetsiaalses soojavahetajas. See võimaldab mitte ainult He kulusid kokku hoida, vaid, veelgi tähtsam, võimaldab saavutada madalaid temperatuure. Teisalt, soojavahetaja kasutamine muudab rootori temperatuuri reguleerimise pisut keerukamaks, sest proovi tegelik temperatuur kujuneb pöörlejakambris dünaamiliselt, sõltuvalt kambrisse siseneva ja kambrist väljuva gaasi mahust, pöörlemise kiirusest ja krüostaadi temperatuurist. Temperatuurisensor mõõdab kambri temperatuuri pöörleja läheduses (vt joonis 4b). Katsed näitavad (vt joonis 5), et vaatamata keerukale temperatuuriskeemile on proovi tegelik temperatuur küllaltki lähedane termomeetri näidule. Konkreetsetel juhtudel, kui proovi temperatuuri täpne määramine on oluline, tuleb proovi temperatuur kalibreerida eraldi katses. Madalamate temperatuuride ($T < 40$ K) saamiseks kasutatakse soojavahetajasse siseneva He gaasi eeljahutust vedela lämmastikuga. Rootori maksimaalne pöörlemiskiirus sõltub temperatuurist, olles vahemikus 50 kHz (temperatuuril 300 K), 20 kHz (20 K) ja 10 kHz (10 K). Vedela heeliumi kulu krüoMAS eksperimendi vältel on võrreldes ülaltoodud numbritega küllaltki väike – 3 kuni 5 l/h sõltuvalt temperatuuripiirkonnast. Mõõtepea elektriskeem võimaldab topeltresonantsi-eksperimente $^1\text{H}/\text{X}$, kus X-tuum on ^{13}C , ^{31}P , ^{23}Na jms. Raadiosagedusliku välja tugevus on mõlemas kanalis ca 100 kHz (raadiovälja tugevust mõõdetakse TMR eksperimendis raadiovälja poolt põhjustatud tuuma magnetuvuse nutatsiooni sagedusega).



Joonis 5. a) ^{119}Sn keemilise nihke sõltuvus temperatuurist temperatuuritundlikus aines Sm_2SnO_7 . Pideva joonega on tähistatud teoreetiline kõver. Kõrvalekalle teoreetilisest kõvest näitab temperatuuri mõõtmise vea suurust. b) Sama aine MAS TMR spektri temperatuurisõltuvus. Joone laius 24 ppm 50 K spektris annab proovi temperatuuri jaotuse kohta pöörlevas proovis hinnanguks 1,5 K.

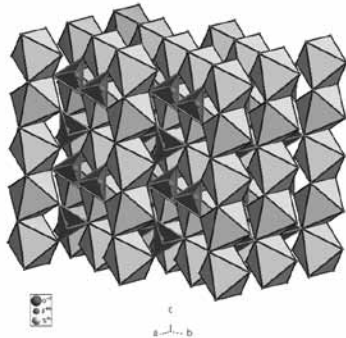
4. KRÜOMAS TEHNIKA RAKENDUSED – SPINN-PEIERLSI FAASIÜLEMINEKUD ÜHENDIS TiPO_4

Kirjeldatud mõõtepead on viimastel aastatel edukalt kasutatud üsna mitmete ainete uurimisel. Oleme uurinud fullereenikeras lõksustatud vesiniku molekuli pöörlemise sõltuvusi temperatuurist [7-9]. Leidsime, et avatud suuga fullereenikerades on H_2 molekuli pöörlemine anisotroopne, regulaarsetes C_{60} kerades aga on vesiniku molekuli pöörlemine isotroopne kuni temperatuurideni $T > 2,5$ K. KrüoMAS tehnika abil oleme uurinud hapniku dünaamikat ioonjuhis $\text{Bi}_{26}\text{Mo}_{10}\text{O}_{69}$ [10], deuteroni liikuvuse ja lokaalse magnetismi temperatuurisõltuvust jarosiidis ja alumiidid [11]. Hiljuti mõõtsime juhtivuselektronide poolt põhjustatud Knighti nihke vähenemist allpool kriitilist temperatuuri ülijuhtivas magneesiumdiboriidid MgB_2 [12]. Mõnemes eksperimentides on uuritud Li iooni liikuvust patarei materjalides [13-15].

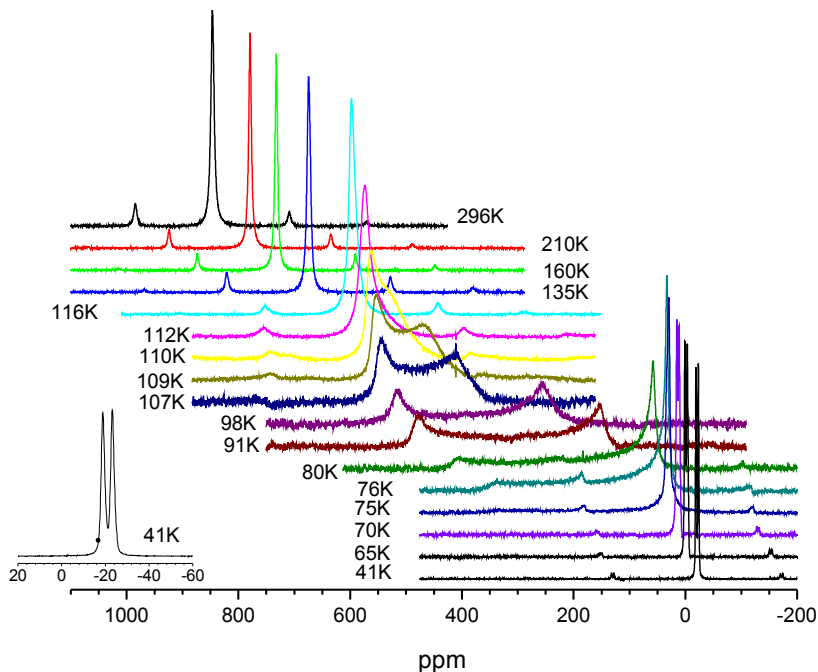
Huvitavaks uurimisobjektiks osutus nn spinn-Peierlsi ühend TiPO_4 [16]. Titaanfosfaadi struktuur koosneb servapidi ühendatud TiO_6 okta-

eedrite ahelatest, mida eraldavad PO_4 tetraeedrid (vt joonis 6).

Kuna Ti^{3+} ioonid kannavad $\frac{1}{2}$ spinniga magnetmomenti, siis on meil tegemist ühemõõtmelise magnetahelaga. Kvaasi-ühemõõtmelised elektrijuhid ja spinn-ahelad olid populaarsed teoreetilise füüsika objektid 1970ndatel aastatel [17], kuid on viimasel ajal uuesti tõusnud uurijate huviorbiiti seoses huvitava kvantnähtustega ja keeruliste magnetväli/temperatuur faasidiagrammidega neis ühendites. Üheks selliseks nähtuseks on nn spinn-Peierlsi (SP) olek madaladimensionaalsetes magnetühendites, kus magnetilise struktuuri põhiolek ei ole mitte korrastunud ferromagnetiline ega ka antiferromagnetiline olek, vaid diamagnetiline singletne olek. Algselt leiti SP faasiülemineku orgaanilistes ühendites TTF-CuBDT ja TTF-AuBDT, kus lineaarses antiferromagnetilise vastasmõjuga $\frac{1}{2}$ -spinnide ahelas toimub ülemineku singletsesse olekusse temperatuuril $T_{\text{SP}} = 12$ K ja $T_{\text{SP}} = 2$ K, vastavalt Cu- ja Au-ühendis. SP olekuga kaasneb lineaarse magnetahela dimeeriseerumine, s.o algselt võrdsel kaugusel olevad ioonid nihkuvad nii, et tekib singletsete paaride ahel. Esimeseks anorgaaniliseks SP ühendiks oli CuGeO_3 [18], $T_{\text{SP}} = 14,7$ K. Viimase ühendi puhul avastati, et magnetväljades $H > 12,5$ T toimub ülemineku diamagnetilisest dimeeriseerunud ahelaga SP olekust nn ühismõõduta SP olekusse, kus ionide magnetmomendid on korrastunud teatud spinniheduse laineks, mille periood ei ühti võre sammuga. Koostöös dr Kremeri töögrupiga Stuttgartist avastasime SP põhioleku TiPO_4 struktuuris. ^{31}P TMR krüoMAS tehnika kasutamine lubas üheselt väita, et temperatuuri alanedes selle aine magnetilises struktuuris leiab aset kaks faasiülemineku (vt joonis 7) – esmalt, temperatuuril $T = 112$ K toimub ülemineku paramagnetilisest olekust ühismõõduta SP olekusse, seejärel, temperatuuril $T = 73$ K leiab aset teine faasiülemineku ühismõõduta SP olekust singletsesse SP olekusse. SP olekuga kaasneb elementaarraku kahekordistumine, milles on kaks erinevat fosfori positsiooni.



Joonis 6. TiPO_4 kristalli struktuur. TiO_6 oktaeedrid moodustavad ühemõõtmelised ahelad, mida eraldavad PO_4 tetraeedrid.



Joonis 7. ^{31}P TMR spektrite sõltuvus temperatuurist. Spektrite temperatuurisõltuvus näitab, et toatemperatuuril 296 K on TiPO_4 struktuurvõres üks fosfori positsioon, millele vastab spektris üks spektrijoon magnetilise nihkega 847 ppm. Temperatuuri alanedes magnetiline nihe väheneb kooskõlas magnetilise vastuvõtlikkuse vähenemisega. Temperatuuril $T < 112$ K spektrijoon laieneb ja omandab kuju, mis väljendab spinnitiheduse jaotust ühismõõduta SP olekus. Temperatuuril allpool $T < 73$ K näitab spekter kaht joont pisut erineva diamagnetilise nihkega (vt eraldi spekter temperatuuril 41 K).

5. KOKKUVÕTE

KrüoMAS tehnika võimaldab kõrge lahutusega tahke keha TMR spektrite saamist madalatel temperatuuridel. Meetod annab unikaalset uut teadmist ainete lokaalse struktuuri ja dünaamika iseärasustest. Kuni viimase ajani oli kirjeldatud KBFI-s ehitatud mõõtepea ainus taoline töötav süsteem maailmas. 2011. aasta lõpul nägi ilmalavagust võrreldavate parameetritega krüoMAS mõõtepea Southamptonis [19]. Analoogiliste krüoMAS süsteemide arendamine toimub mitmes teiseski laboratooriumis, mis näitab suurt vajadust taolise tehnika järele.

TÄNUAVALDUSED

Käesolevaga avaldab autor tänu paljudele kolleegidele KBFI-st, kelle abita poleks seda tööd sündinud. Eriline tänu kuulub Tiit Tuhermile pöörlejasõlme ehituse eest, dr Jaan Pastile elektriskeemi väljatöötamise eest, Arvo Sihverile ja Andres Reinholdile mehaanikadetailide valmistamise eest, dr Raivo Sternile ja dr Ago Samosonile nõu ja jõu ja mitmete koostööde korraldamise eest. Olen tänulik kõigile koostööpartneritele Southamptonist, Stony Brookist, Zürichist, Hamiltonist ja Stuttgartist. Finantsilise toetuse eest tänan Eesti Teadusfondi ja Haridusministeeriumi uurimistoetuste ETF6846, ETF8198 ja SF0690034s09 eest.

VIITED

- [1] E. R. Andrew, A. Bradbury, R.G. Eades. Nuclear magnetic resonance spectra from a crystal rotated at high speed. *Nature* **182**, 1659 (1958).
- [2] I. J. Lowe. Free induction decays of rotating solids. *Phys. Rev. Lett.*, **2**, 285-287 (1959).
- [3] E. Lippmaa, M. Alla, T. Tuherm. High resolution ¹³C NMR in solids with polarization transfer, decoupling and sample spinning at the magic angle. In *Magnetic Resonance and Related Phenomena, Proceedings XIX Congress Ampère*, eds, H. Brunner, K. H. Hausser, D. Schweitzer, Springer Verlag, Berlin 1976, p. 113-118.
- [4] A. Samoson, T. Tuherm, J. Past, A. Reinhold, I. Heinmaa, T. Anupõld, M. E. Smith, K. Pike. Fast Magic-Angle Spinning: Implications. In *Encyclopedia of Magnetic Resonance*, eds. R. K. Harris, R. E. Wasylshen, (1-20), John Wiley & Sons Ltd (2010).
- [5] A. Samoson, T. Tuherm, J. Past, A. Reinhold, T. Anupõld, I. Heinmaa. New Horizons for Magic-Angle Spinning NMR. *Topics in Current Chemistry* **246**: 15-31, DOI 10.1007/b98647, Springer-Verlag, Berlin- Heidelberg 2004.
- [6] A. Hackmann, H. Seidel, R. D. Kendrick, P. C. Myhre, C. S. Yannoni. Magic-Angle Spinning at Near-Liquid-Helium Temperatures. *J. Magn. Reson.*, **79**, 148-153 (1988).
- [7] M. Carravetta, Y. Murata, M. Murata, I. Heinmaa, R. Stern, A. Toncheva, A. Samoson, Y. Rubin, K. Komatsu, M. Levitt. Solid-State

- NMR Spectroscopy of Molecular Hydrogen Trapped Inside an Open-Cage Fullerene. *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, 4092-4093 (2004).
- [8] M. Carravetta, O. G. Johannessen, M. H. Levitt, I. Heinmaa, R. Stern, A. Samoson, A. J. Horsevill, Y. Murata, K. Komatsu. Cryogenic NMR Spectroscopy of endohedral hydrogen-fullerene complexes. *J. Chem. Phys.*, **124**, 104507-/1-13/ (2006).
- [9] M. Carravetta, A. Danquigny, S. Mamone, F. Cuda, O. G. Johannessen, I. Heinmaa, K. Panesar, R. Stern, M. C. Grossel, A. J. Horsevill, A. Samoson, M. Murata, Y. Murata, K. Komatsu, M. H. Levitt. Solid-state NMR of endohedral hydrogen-fullerene complexes. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **9**, 4879-4894 (2007)
- [10] L. Holmes, L. Peng, I. Heinmaa, L. A. O'Dell, M. E. Smith, R.-N. Vannier, C. P. Grey. Variable-Temperature ^{17}O NMR Study of Oxygen Motion in the Anionic Conductor $\text{Bi}_{26}\text{Mo}_{10}\text{O}_{69}$. *Chem. Mater.*, **20**, 3638-3648 (2008).
- [11] U. G. Nielsen, I. Heinmaa, A. Samoson, J. Majzlan, C. P. Grey. Insight into local magnetic environments and deuteron mobility in Jarosite ($\text{AFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OD})_6$, $\text{A}=\text{K}, \text{Na}, \text{D}_3\text{O}$), from variable-temperature ^2H MAS NMR Spectroscopy. *Chem. of Materials*, **23**, 3176-3187 (2011).
- [12] P. Beckett, M. Denning, M. Carravetta, I. Heinmaa, M. C. Dimri, R. Stern, E. Young. *High resolution NMR of magnesium diboride using cryogenic magic angle spinning*, submitted.
- [13] L. S. Cahill, S. C. Yin, A. Samoson, I. Heinmaa, L. F. Nazar, G. R. Goward. Li-6 NMR studies of cation disorder and transition metal ordering in $\text{Li}[\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}]\text{O}_2$ using ultrafast magic angle spinning. *Chemistry of Materials*, **17** (26), 6560-6566 (2005).
- [14] L. J. M. Davis, I. Heinmaa, G. R. Goward. Study of Lithium Dynamics in Monoclinic $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ using ^6Li VT and 2D Exchange MAS NMR Spectroscopy. *Chemistry of Materials*, **22**, 769-775 (2010).
- [15] L. J. M. Davis, I. Heinmaa, B. L. Ellis, L. F. Nazar, G. R. Goward. Influence of particle size on solid solution formation and phase interfaces in $\text{Li}_{0.5}\text{FePO}_4$ revealed by P-31 and Li-7 solid state NMR spectroscopy. *Physical Chemistry, Chemical Physics*, **13**, 5171-5177 (2011).
- [16] J. M. Law, C. Hoch, R. Glaum, I. Heinmaa, R. Stern, J. Kang, C. Lee, M. H. Whangbo, R. K. Kremer. Spin-Peierls transition in the $\text{S}=1/2$

- compound TiPO_4 featuring large intrachain coupling. *Phys. Rev. B*, **83**, 180414 (2011).
- [17] A. I. Buzdin, L. N. Bulaevskii. Spin-Peierls transition in quasi-one-dimensional crystals. *Usp. Fiz. Nauk*, **131**, 495-510 (1980).
- [18] M. Hase, I. Terasaki, K. Uchinokura. Observation of the Spin-Peierls Transition in Linear Cu^{2+} (Spin-1/2) Chains in an Inorganic Compound CuGeO_3 . *Phys. Rev. Lett.*, **70**, 3651 (1993).
- [19] R. Sarkar, M. Concistre, O. G. Johannessen, P. Beckett, M. Denning, M. Carravetta, M. al-Mosavi, C. Beduz, Y. Yang, M. H. Levitt, An NMR thermometer for cryogenic magic-angle spinning NMR: The spin-lattice relaxation of ^{127}I in cesium iodide. *J. Magn. Reson.*, **212** 460-463 (2011).

HEELIUM-3 JA HEELIUM-4 KVANTVEDELIKU TILKADE SPEKTROSKOOPIA

VLADIMIR HIŽNJAKOV JA IMBI TEHVER

TÜ Füüsika Instituut

Mikromaailma kontrollivad kvantfüüsika seadused kutsuvad esile mitmeid huvitavaid efekte, mis makromaailmas tavaliselt ei ilmne. Teatud objektides, nagu näiteks vedel heelium, muutuvad kvantefektid nähtavaks. Ülimadalal temperatuuril on ^3He ja ^4He Fermi- ja Bose-tüüpi kvantvedelikud, mille omadused on unikaalsed, olles seepärast kaasaegse füüsika huviobjektiks.

VEDEL HEELIUM KUI BOSE JA FERMI KONDENSAAT

Heelium eksisteerib looduses stabiilsete isotoopidena ^3He ja ^4He , kusjuures heelium-3 on miljon korda vähem kui heelium-4. Heelium-3, mille tuum koosneb kahest prootonist ja ühest neutronist, kujutab endast fermioni (spinn on $1/2$), heelium-4 tuumas on 2 prootonit ja 2 neutronit (spinn 0) – seega on tegu bosoniga.

Toatemperatuuril ja normaalarõhul on heelium-3 ja heelium-4 gaasid. Madalal temperatuuril kondenseeruvad nad vedelikeks: heelium-4 veeldub temperatuuril 4,2 K ja heelium-3 temperatuuril 3,2 K.

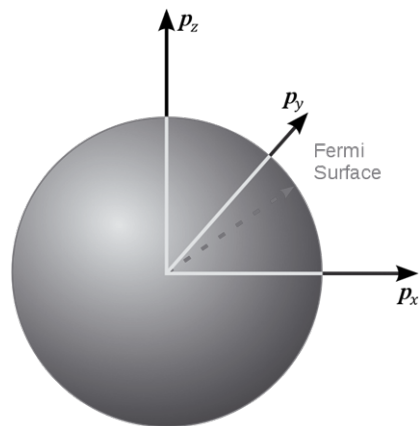
Aastal 1938 avastas Pjotr Kapitsa, et heelium-4 muutub $T < 2,17$ K korral ülivoolavaks, kaotades viskoossuse (Nobeli preemia 1978). Ülivoolava seisundi fenomenoloogilise teooria esitas Lev Landau, kes ennustas uute ergastuste – mittekustuvate kvantkeeriste-rootonite olemasolu (Nobeli preemia 1962). Ülivoolavus on tingitud vedelikus toimuvast Bose kondensatsioonist, erinevus on vaid selles, et heeliumis toimub kondensatsioon vedelikus, Bose-Einsteini kondensaat saadakse gaasidest.

Bose-Einsteini kondensaat – nimetatud ka aine viiendaks olekuks – tekib, kui jahutada aineosakesi-bosoneid väga madala temperatuurini. Külmad bosonid liituvad üheks superosakeseks, mis on pigem laine kui aine. Sellise aineseisundi võimalust ennustasid Satyendra Nath Bose ja Albert Einstein oma töödes aastatest 1924–25. Möödus 70 aastat, enne kui saadi esimene gaasiline kondensaat. See oli 1995, kui Eric Cornell ja Carl Wieman jahutasid rubiidium-87 hõrendatud auru allapoole 170 nK; samal aastal sai ka Wolfgang Ketterle naatrium-23 kondensaadi (Nobeli preemia kõigile kolmele 2001).

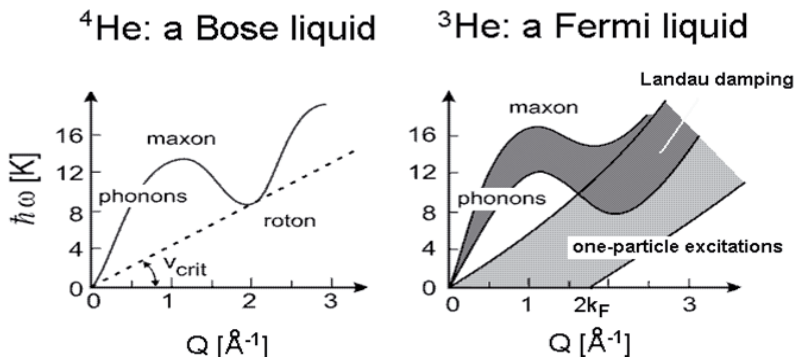
Vedelal heelium-3 on samuti unikaalsed omadused. Et heelium-3 aatomid on fermionid, siis saavad nad täita erinevaid olekuid ainult ühekaupa. Sellepärast ei saa heelium-3 aatomid ülimaldal temperatuuril „kondenseeruda“ ühte madalaima energiaga seisundisse, nagu see toimub heelium-4 aatomitega. Selle asemel nad täidavad järjestikku kõik madalamad energianivood. Niiviisi formeeritud olekut nimetatakse Fermi mereks ja kõrgeimat täidetud nivood Fermi nivooks (joonis 1).

Selle seisundi unikaalseks omapäraks on asjaolu, et lisades Fermi nivool või tema läheduses paiknevatele aatomitele väga väikese energia, saame uued seisundid. Kuna neid aatomeid on palju, siis on palju võimalusi niisuguseid madala energiaga ergastatud seisundeid tekitada. See asjaolu muudab oluliselt heelium-3 vedeliku omadusi võrreldes heelium-4 vedelikuga. Heelium-4 ja heelium-3 madala energiaga ergastuste sõltuvused lainearvust $Q = p/\hbar$ (p on impulsi suurus) on esitatud joonisel 2.

1970ndail avastasid David Lee, Douglas Osheroff and Robert Coleman Richardson, et temperatuuril 2,49 mK läheb ka heelium-3 ülivoolavuse faasi (tegelikult tekib kaks ülivoolavuse faasi). Avastus pärjati Nobeli preemiaga aastal 1996. Mõned aastad hiljem (2001) anti Nobe-



Joonis 1. Fermi meri. Impulssruumi täitumine heelium-3 vedelikus. Täidetud seisundid sfääri sees (näidatud halli fooniga) moodustavad *Fermi mere*. Viimast täidetud seisundit sfääri pinnal nimetatakse *Fermi nivooks*.



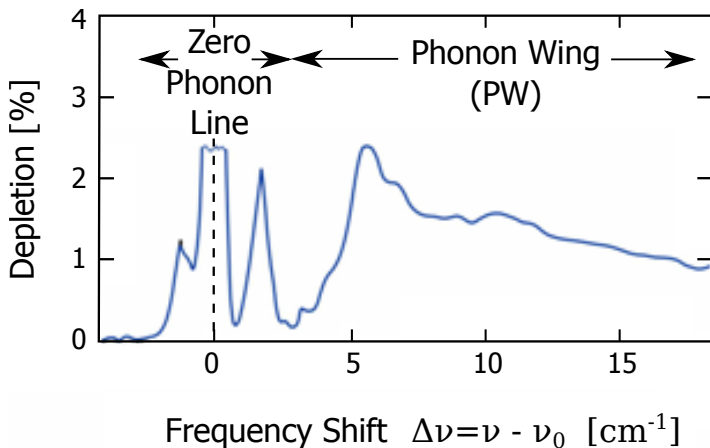
Joonis 2. Heelium-4 ja heelium-3 ergastuste dispersioonsoõltuvused; $\hbar\omega$ on energia, Q lainearv. Maksonid on mõlemas vedelikus, rootonid on ainult vedelas heelium-4.

li preemia Tony Leggettile heelium-3 ülivoolavuse põhjuse selgitamise eest. Siin on tegu fermionide ülivoolavusega, mille saamise teeb keerukamaks Pauli keelureegel, mis ei luba fermionidel olla korruga ühes ja samas kvantolekus. Kuid hakkab toimima analoogne mehhanism, mis ülijuhtivuseski – heelium-3 läheb madalal temperatuuril ülivoolavasse faasi tänu aatomitest moodustuvatele Cooperi paaridele, mis on bosonid. Tekib energia pilu Fermi nivoo juures, analoogselt ülijuhtivusega. Erinevus on selles, et ülijuhtivas olekus moodustuvad Cooperi paarid *elektronidest* (foononite vahendusel), ülivoolavuses on *atomaarsed* Cooperi paarid (tänu spinni fluktuatsioonidele).

Atomaarset fermionide kondensaati õnnestus saada Deborah Jinil aastal 2003, kui ta jahutas 500 000 kaalium-40 aatomit temperatuurini 5×10^{-8} K. Fermionide kondensaati nimetatakse ka aine kuuendaks olekuks.

HEELIUMITILKADE OPTILISED SPEKTRID

Vedela heeliumi joa paisumisel madalal temperatuuril ja rõhu all (näiteks $T = 10$ K, $P = 20$ baari) saadakse heeliumitilgad (mainitud juhul diametriga 80 \AA , mis sisaldavad keskmiselt $10^3 \div 10^4$ aatomit). Heeliumitilku võib uurida spektroskoopiliste meetoditega, dopeerides tilku väikeste lisandimolekulitega. Reeglina liiguvad molekulid tilga sisse, erandiks on

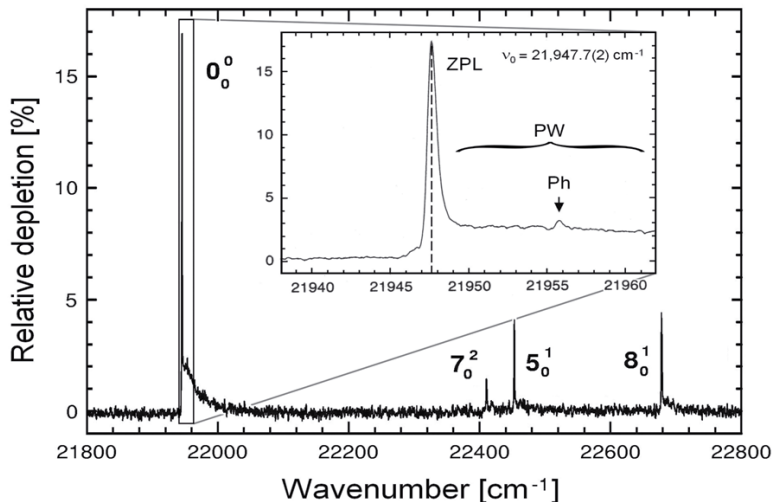


Joonis 3. Glüoksaali molekuliga aktiveeritud heelium-4 tilga optiline spekter foononvaba joone piirkonnas [1].

leelismetallide aatomid ja nende kompleksid, mis jäävad tilga pinnale. Tilkadesse sisestatud molekulide spektrites on teravad foononvabad jooned koos foonontiivaga.

Enamuuritud heelium-4 tilkade spektrites on foononvabal joonel kaksikmaksimumiga struktuur selgesti eristuva piluga [1] (joonis 3). Kolm piiki foononvaba joone sinisel poolel, mis leiti esmalt glüoksaali ($C_2H_2O_2$) molekuli puhul, osutavad molekuli pöörlemisele ilma kustumiseta (2 cm^{-1} piik), heeliumvedeliku enda pöörlemisergastutele-rootonitele (6 cm^{-1} piik) ja maksonitele ($10,5\text{ cm}^{-1}$ piik) (vt ka joonis 2; $1\text{ K} = 0,694\text{ cm}^{-1}$). See oli esimene otsene tõendus, et heelium-4 tilgad on ülivoolav vedelik.

Et heelium-3 ergastused madalama energiaga piirkonnas erinevad heelium-4 omadest (joonis 2), siis võib oodata erinevusi ka optilistes spektrites foononvaba joone piirkonnas. Kahjuks on heelium-3 tilku spektroskoopiliselt märksa vähem uuritud. Seni on avaldatud ainult üks töö [2], kus heelium-3 tilgas paikneva glüoksaali molekuli ergastusspektris on teravale foononvabale joonele lisaks väike terav piik pikas võnketiivas, mis kuulub osakese-augu paarisergastustele (joonis 4). Teooria [2] näitab, et piigi tekitab null-heli (mis vastab heelium-3 Fermi pinna deformatsioonile), mille kutsub esile elektronüleminek glüoksaali molekulis – see on esimene tõendus heelium-3 lokaliseeritud null-heli võnkemoodist.

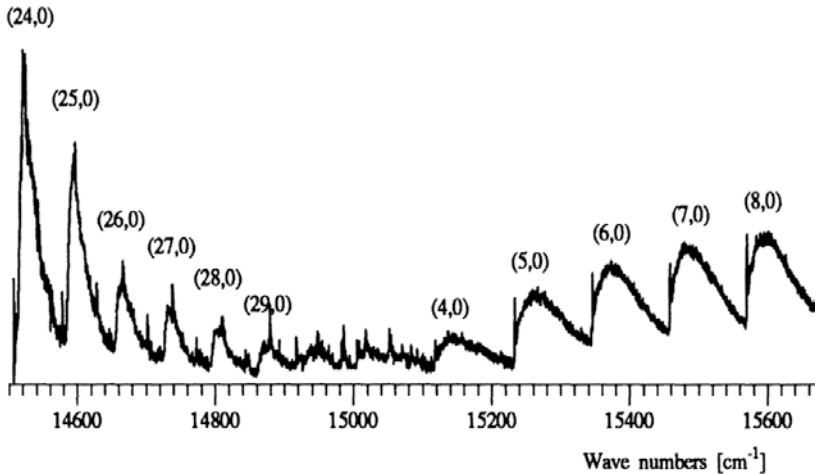


Joonis 4. Glüoksaali molekuliga aktiveeritud heelium-3 tilga optiline spekter [2].

HEELIUMITILKADE PINNAERGASTUSED

Asjaolu, et heelium-4 tilkade pinnale saab lõksustada leelismetallide aatomikomplekse, annab võimaluse uurida heeliumitilkade pinnaergastusi. Kvantklasterite pinnaga seotud väikesed leelismetallide aatomikompleksid on unikaalne süsteem – siin on väikseim võimalik aatomitevaheline interaktsioon looduses [3,4]. Seda vastastikmõju saab uurida optilist spektroskoopiat kasutades, nagu tegi Stienkemeier kolleegidega [5], mõõtes Na dimeeride singlet-singlet ja triplet-triplet ülemineku optilist spektrit väikestel heelium-4 tilkadel (joonis 5).

Töös [5] mõõdetud spektrid erinevad oluliselt tavaliselt vaadeldavatest tahkiste lisanditsentrite optilistest spektritest. Näiteks spektriosa 15100-16500 cm^{-1} , mis vastab siirdele $1^3\Sigma_g^3 \leftarrow 1^3\Sigma_u^3$ singletsete seisundite vahel, koosneb peale kitsaste foononvabade joonete suhteliselt laiadest foononribadest, mis astmeliselt külgnevad foononvabade joonetega. Niisugune astmeline foonontiiva algus on iseloomulik kahedimensioonilistele akustilistele võnkumistega süsteemidele [6] (vrdl joonis 6 tagapool). Võime järeldada, et heelium-4 tilga pinnal resideeriva Na_2 molekuli singlet-singlet ülemineku spektris ilmnevad otseselt tilga *pinnavõnkumised*, mida nimetatakse *ripplonideks* [14].



Joonis 5. Heelium-4 tilga pinnal paikneva Na_2 kompleksi luminesentsi ergastusspekter [5] (sulgudes on märgitud ergastatud võnkenivoode numbrid). Spektriosas 14 500-14 900 cm^{-1} vastab siirdele $1^3\Sigma_g^3 \leftarrow 1^3\Sigma_u^3$ tripletsete seisundite vahel; piirkond 15 100-16 500 cm^{-1} - siirdele $A^1\Sigma_u^+ \leftarrow X^1\Sigma_g^+$ singletsete seisundite vahel.

Ergastusspekter 14500-14900 cm^{-1} piirkonnas, mis vastab tripletsele üleminekule $1^3\Sigma_g^3 \leftarrow 1^3\Sigma_u^3$ molekuli kõrgetele võnkeseisunditele ergastatud $1^3\Sigma_g^3$ seisundis, koosneb kolmnurkse kujuga kitsastest spektraalribadest. Väike, kuid siiski märgatav poollaius 30 cm^{-1} on tingitud interaktsioonist molekuli ja heeliumitilga võnkumiste vahel. Arvestades, et molekuli tripletseis seisundis on optilise elektroni interaktsioon heeliumitilga foononitega nõrk, võiks oodata spektrit, milles on kitsad foononvabad jooned neist eraldatud nõrga foonontiivaga. Selle asemel näeme spektriosas 14500-14900 cm^{-1} lambda-kujuga spektraalribasid järsu langusega punasel poolel ja aeglase kustumisega sinises osas; foononvaba joon puudub.

Tripletsele seisundile vastava spektriosas eripära on tingitud asjaolust, et kui paaritus tripletseis seisundis $1^3\Sigma_u^3$ on Na aatomite vahel suur kaugus (5 Å tasakaaluasendis), põhjuseks Pauli printsiip, siis ergastatud paaris seisundis $1^3\Sigma_g^3$ tekib tugev molekulaarne side, mille pikkus on palju väiksem (~3,5 Å) [7]. Selle tulemusena toimub kõrgete võnkenivoode ($n \geq 24$) ergastamine [8]. Nivoodel 24 ÷ 30 on võnkumise keskmine amplituud suur (2,5 kuni 3 Å) - võrreldav kaugusega heeliumitilga aatomite vahel. Sealjuures on Na aatomite keskmine kiirus nendel võnkenivoodel

võrreldav heeliumitilga aatomite nullvõnkumiste keskmise kiirusega. Niisugune parameetrite kokkulangevus lubab oletada molekuli tugevat seost lähimate heeliumiaatomite dünaamikaga.

Heeliumiaatomite tihedusjaotust *tilgasiseses lisandi* ümber iseloomustavad Friedeli ostsillatsioonid, maksimumiga mõne Å kaugusel molekuli tsentrist (nn „lumepalli” efekt) [9]. Sarnased tihedusjaotuse ostsillatsioonid leiavad aset ka *pinnalisandi* ümber [10], tekitades lokaliseeritud foononergastuse tilga maksonisageduse lähedal – nagu on leitud tilgasisest lisandite puhul [2]. Võib eeldada, et Na₂ molekuli diameetri äkiline lühenemine 1,5 Å võrra kutsub esile lokaliseeritud lumepallifoononi tuntava pehmenemise/sageduse vähenemise. See tähendab aga optilise elektroni ja madalsageduslike foononite vahelise interaktsiooni tugevnemist [11, 13], mis avaldub foononriba madala energiaga osa kerkimisena foononvaba joone piirkonnas.

Piltlikult ette kujutades: optilise triplete siirde tulemusena naatriumi molekul tõmbub kokku, nõrgeneb molekuli ja tilga pinna vaheline interaktsioon, molekuli ümber lokaliseerunud heelium-4 aatomite side tilga ülejäänud osaga nõrgeneb, mille tulemusena nende põhiseisundi kineetiline nullenergia vabaneb ning ilmneb spektris [13].

PÕGUSALT TEOORIAST

PÕHIVALEMID

Laxi teooria [12] kirjeldab elektron-võnkeinteraktsioonist tingitud optilist spektrit valemiga

$$I(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(t) e^{i\omega t} dt, \quad (1)$$

kus

$$F(t) = \left\langle \hat{T} \exp \left(i \int_0^t V(\tau) d\tau \right) \right\rangle \quad (2)$$

on elektron-võnkeülemineku Fourier' esitus, $\langle \dots \rangle$ tähistab kvantstatistilist keskmistamist, \hat{T} on aegkorrastuse operaator, $V = H_2 - H_1$ arvestab võnkepotentsiaali muutust elektronüleminekul;

$$H_1 = \sum_j \omega_j (\hat{a}_{1j}^+ \hat{a}_{1j} + \frac{1}{2}) \quad (3)$$

ja $H_2 = H_1 + V$ on võnkehamiltoniaanid põhi (1) ja ergastatud (2) elektronseisundis; ω_j tähistab foononisagedusi, \hat{a}_{1j} ja \hat{a}_{1j}^+ on foononite kao- ja tekkeoperaatorid põhiseisundis.

PINNAVÕNKUMISTE EFEKT [6]

Niinimetatud põhimudelis arvestatakse ainult tuumade tasakaaluasendite nihet elektronüleminekul. Sel juhul $V = V_0 + aq$, kus V_0 on ülemineku puhtelektronne energia, a lineaarse vibrooninteraktsiooni parameeter, $q = \sum_j e_{1j} (\hat{a}_{1j} + \hat{a}_{1j}^+) / \sqrt{2\omega_{1j}}$ konfiguratsiooni koordinaat-operaator, mis kirjeldab aatomite liikumist optilise tsentri ümber, kusjuures e_{1j} on j -nda foononi polarisatsioonivektor elektroni lähteolekus. Selles mudelis [12]

$$F(t) = \exp[i\delta_0 t + g(t)]. \quad (4)$$

Siin δ_0 on foononvaba joone positsioon,

$$g(t) = \alpha \omega_M \int_0^\infty d\omega \omega^{-1} \rho_D(\omega) [(n(\omega) + 1)e^{i\omega t} + n(\omega)e^{-i\omega t} - 2n(\omega) - 1] \quad (5)$$

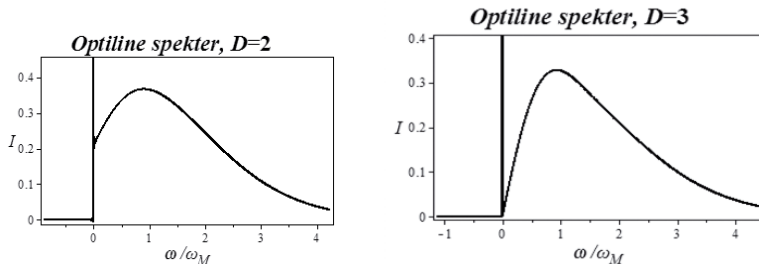
ühefoononiline faktor, $\alpha = a^2/2\omega_M^3$ dimensioonita interaktsiooniparameeter, ω_M maksimaalne foononisagedus, $\rho_D(\omega)$ on foononiseisundite tihedus, $n(\omega) = (e^{-\beta\omega} - 1)^{-1}$ Bose faktor, $\beta = k_B T$. Akustiliste foononite puhul võib kasutada *Debye' mudelit*, kus $\rho_D(\omega) = D\omega^{D-1}/\omega_M^D$, D on ruumi mõõtmete arv. Vedela heeliumi puhul tuleb seda mudelit korrigeerida, arvestades et võnkespekter ei lõpe järsult ω_M sagedusel, vaid intensiivsus väheneb pidevalt suurte sageduste suunas. Sel juhul on mõistlik kasutada *modifitseeritud Debye' mudelit*:

$$\rho_D(\omega) = C_D \omega^{D-1} \omega_M^{-D} \exp(-\omega^2/\omega_M^2). \quad (6)$$

Siin $C_1 = 2/\sqrt{\pi}$, $C_2 = 2$, $C_3 = 4/\sqrt{\pi}$.

Naatriumi molekul heelium-4 tilga pinnal on interaktsioonis nii pinnavõnkumistega ($D = 2$) kui ka tilga sisevõngetega ($D = 3$). Nendele interaktsioonidele vastavad spektrid on toodud joonisel 6.

Näeme, et kahemõõtmelisel juhul (erinevalt kolmemõõtmelisest foonontiib algab astmeliselt. Seega võrdlus eksperimentaalse singlet-singletse ülemineku spektriosaga (joonis 5) lubab väita, et heeliumitilga pinnal lõksustunud naatriumimolekuli singlet-singletse ülemineku spektris ilmnevad otseselt tilga pinnavõnkumised-ripplonid.



Joonis 6. Optilised spektrid lineaarse elektron-foononinteraktsiooni puhul (valemid (1), (4), (5)) temperatuuril $T=0$, $\alpha=3$. Vasakul on spekter juhul, kui foononite ruumiline dimensioon on kaks, paremal on foononite ruumiline dimensioon kolm.

PEHME DÜNAAMIKA ERGASTATUD SEISUNDIS [13]

Heelium-4 tilga pinnal resideeriva Na dimeeri tripletne siire kutsub esile molekuli tugeva võnkumise, mis omakorda tingib lokaalse võnkedünaamika pehmenemise, teisisõnu – jõukonstantide vähenemise. Selle efekti annab elektron-foononinteraktsiooni

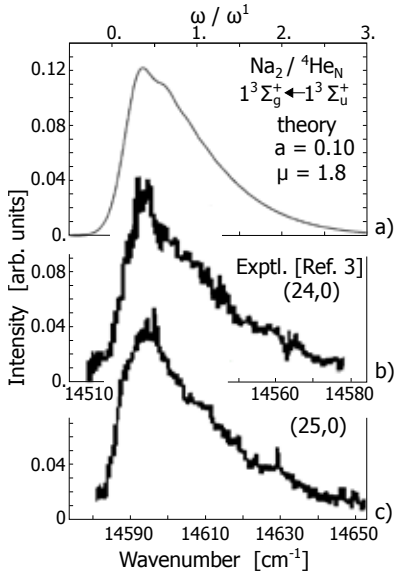
$$V = V_0 + a_0 q + \frac{1}{2} qbq \quad (7)$$

ruutliige qbq piisavalt suure negatiivse ruutinteraktsiooni parameetriga b (sel juhul võnkemoodid segunevad elektronüleminekul ning tsentri võnkesagedused vähenevad oluliselt).

Moodide tugev segunemine ei võimalda üldjuhul probleemi tavaliste meetoditega lahendada. Siin aga osutus võimalikuks kasutada Fourier' amplituudi meetodit [14], milles $F(t)$ tuletis avaldatakse ühe- ja kahe-foononiliste üleminekute amplituudide kaudu. Pehme dünaamika korral saab neid võrrandeid lahendada analüütiliselt, arvestades et ergastatud ja põhiseisundi sageduste keskväärtuste suhe on väike parameeter. See lubas tuletada valemi spektri Fourier' teisenduse jaoks [13]

$$F(t) = (1 - i\omega_1 t/2)^{-\mu} \exp[i\delta t - a^2 \omega_1^2 t^2 (6 - i\omega_1 t)/24], \quad (8)$$

kus parameetrid avalduvad võnkeseisundite lokaalse foonontiheduse momentide $f_n \equiv \sum_j e_{1j}^2 \omega_{1j}^{-n}$ kaudu: $\mu = f_2^3/2f_2^3$, $a = a_0 f_2^3/f_3^{3/2}$, $\omega_1 = f_3/f_2^2$, $\delta = -f_1/4f_2 - f_2/4f_3$. Olgu märgitud, et antud juhul on ruutinteraktsiooni konstant pöördvõrdeline teist järku momendiga: $b \approx -1/f_2$. Võrrandist (8) järeldub, et nõrgema lineaarinteraktsiooni korral määrab foononkontinuumi just parameeter μ . Viimane on määratud foononspektri madalsagedusliku osaga, mis omakorda sõltub oluliselt foononsüsteemi dimensioonist D . Kui kasu-



Joonis 7. Arvutatud spekter parameetrite $a = 0,10$ ja $\mu = 1,8$ korral [13] (a) ja heeliimitilga pinnal asuva Na dimeeri üleminekute $1^3\Sigma_g^+ \leftarrow 1^3\Sigma_u^+$ eksperimentaalsed vibroonspektrid vönkenivooolele 24 (b) ja 25 (c), mõõdetud Stienkemeieri jt poolt [5].

tada modifitseeritud Debye' mudeelit, kus $e_{\text{f}}^2(\omega) \propto \omega^{D+1} e^{-\omega^2/\omega_M^2}$, siis saame $\mu = 0,26$ $D = 3$ korral ja $\mu = 0,16$ $D = 2$ korral. Liikmed, mis on võrdelised $\propto a^2$ võrrandis (8), arvestavad kiirendusefekti lõppseisundis, kusjuures liige $\propto ia^2t^2$ kirjeldab Airy ostsillatsioone.

Rakendades teooriat tripletses seisundis Na dimeerile heeliimitilga pinnal, tuleb arvestada, et protsessis osalevad mitmed konfiguratsioonikoordinaadid. Mis tähendab, et võrrandis (8) tuleks μ ja a^2 asendada nende väärtuste summaga üle iga koordinaadi. Kui eeldada, et ruumi(3D)- ja pinna(2D)foononid annavad ühesuguse panuse konfiguratsioonikoordinaatidesse, siis võiks võtta iga koordinaadi jaoks keskmise väärtuse $\mu = 0,2$. Oletades, et protsessis osaleb $6 \div 10$ heeliümiaatomit, saame $\mu = 1,2 \div 2,1$.

GLÜOKSAALI MOLEKUL HELIUM-3 TILGAS

Helium-3 tilgas paikneva glüoksaali molekuli spektris (vt eespool joonis 4) on laienenud ($\sim 1 \text{ cm}^{-1}$) foononvaba joon - märksa laiem kui helium-4 korral - ja ühtlaselt kahanev vönkeriba spektri sinises osas laiusega $\sim 40 \text{ cm}^{-1}$ ning terava piigiga $\sim 8 \text{ cm}^{-1}$ juures. Vönkeriba koos piigiga on interpreteeritav kui heeliimitilga lokaalselt häiritud foononite (null-heli) panus glüoksaali molekuli elektronsiirdesse [2]. Kerkib küsimus, miks on foononvaba joon helium-3s oluliselt laiem kui helium-4s. Töodes [2,6] on näidatud, et helium-3s annavad foononvaba joone laienemisse panuse Fermi ergastused.

Peatume põgusalt vastaval teorial. Alustame taas spektri Fourier' pöörde valemeist (2)-(3), milles nüüd vönkehamiltoniaanide H asemele tulevad osakese-augu paarisergastuste hamiltoniaanid [6]:

$$H_1 = \sum_i (\varepsilon_{pi} \hat{a}_i^+ \hat{a}_i + \varepsilon_{hi} \hat{b}_i^+ \hat{b}_i), \quad H_2 = H_1 + V, \quad (9)$$

kus \hat{a}_i^+ ja \hat{a}_i tähistavad osakese tekke- ja koooperaatoreid energiaga $\varepsilon_{pi} + E_F$ Fermi nivooost E_F ülalpool; \hat{b}_i^+ ja \hat{b}_i on augu tekke- ja koooperaatorid, augu energiaga $\varepsilon_{hi} = E_F - E_i$ (augu teke energiaga ε_{hi} vastab elektroni kaole energiaga $E_i = E_F - \varepsilon_{hi}$ allpool Fermi nivood). Võnkepotentsiaal V arvestab, et molekuli elektronüleminekul muutub heeliumitilga lokaalne tihedus: $V = \sum_{\nu} \nu_{\nu} \hat{n}_{\nu}$, kus $\hat{n}_{\nu} = \hat{c}_{\nu}^+ \hat{c}_{\nu}$ on lähimate heeliumiaatomite sümmetriseeritud arv-operaator, \hat{c}_{ν}^+ ja \hat{c}_{ν} tähistavad heelium-3 aatomite tekke- ja koooperaatoreid. Operaatoreid \hat{c}^+ ja \hat{c} saab esitada \hat{a}_i^+ (\hat{a}_i) ja \hat{b}_i^+ (\hat{b}_i) kaudu: $\hat{c}_{\nu} = \sum_i (\eta_{pi} \hat{a}_i + \eta_{hi}^* \hat{b}_i^+)$.

Edasi kasutame valemi (2) kumulantreaksarendust V järgi ja piirdume kahe esimese kumulandi arvestamisega (kõrgemat järgu kumulantide arvestamine ainult renormeerib interaktsiooniparameetri α). Saame

$$F(t) = \exp[i\delta t + g(t)], \quad (10)$$

kus $\delta = \langle V_q \rangle - \int_{-\infty}^{\infty} dE \phi(E)/E$ määrab foononvaba joone nihke,

$$g(t) = \int dE \phi(E) (e^{iEt} - 1) / E^2 \quad (11)$$

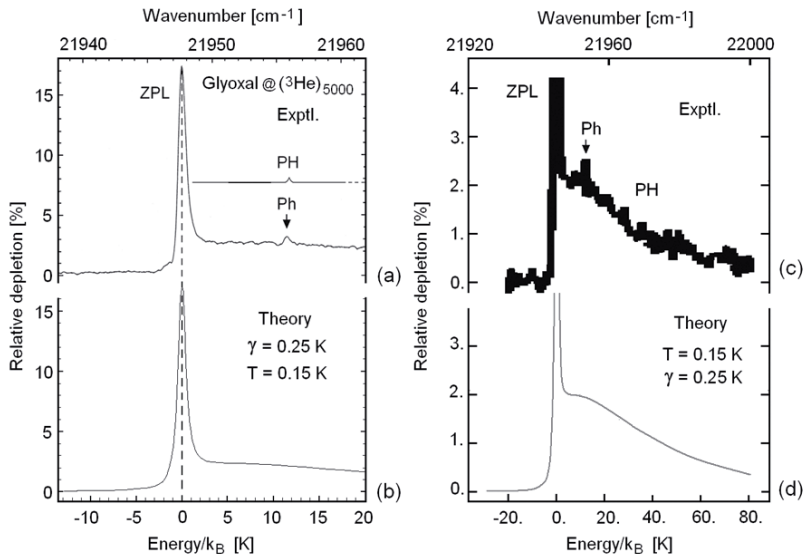
määrab spektri kuju, milles avaldub Fermi osakese-augu paarisergastuste kaasamine molekuli optilistel üleminekul, $\phi(E) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} dE e^{-iEt} \langle \hat{V}(t) \hat{V} \rangle$ on paarisergastuste spekter. Piirdudes spektri madalsagedusliku osaga foononvaba joone vahetus läheduses, saame spektraalfunktsiooni avaldiseks (detailne tuletuskäik artiklis [6]) $\phi(E) \approx \alpha E / (1 - e^{-\beta E})$, kus $\alpha > 0$ on dimensioonita interaktsiooniparameeter. Osakese-augu ergastuste tõttu laienuvad foononvaba joon on määratud Fourier' teisendusega funktsioonist [6]:

$$F(t) = \exp \left[-i\delta t - \gamma_0 |t|/2 + \alpha \int_{-\infty}^{\infty} dE E^{-1} (e^{iEt} - 1) / (1 - e^{-\beta E}) \right], \quad (12)$$

kus γ_0 on joone instrumentaallaius. See valem kirjeldab spektri foononvaba joone piirkonda laiusega kuni mõned cm^{-1} . Spekter suuremate energiatega piirkonnas on määratud foononergastustega [2] (joonis 8).

KOKKUVÕTE

Heeliumitilkade lisandimolekulide optilistel spektritel on ebatavalised omadused, mis on tingitud vedela heeliumi kvantseisunditest – Bose-



Joonis 8. Eksperimendi (a, c) ja teooria (b, d) võrdlus [2]. Glüoksaali molekuli neeldumisspekter heelium-3 5000 aatomiga tilgas, $T = 0,15$ K. Vasakul - foononvaba joon, paremal - foononvaba joon + foonontiib.

Einsteini kondensaadist heelium-4 puhul ja Fermi merest heelium-3 puhul. Need kvantseisundid ilmnevad nii foononvabade joonte kui ka foonontiibade kujus. Põhjuseks on asjaolu, et foononvaba joon ja tema juures paiknev tiib on väga tundlikud aine omaduste suhtes, lubades otseselt jälgida ainete madala energiaga ergastuste panust spektrites. Nii kajastuvad heelium-4 tilkade foononvaba joone ja foonontiiva spektraalomadustes kvantvedeliku pinnavõnkumised ning heelium-4 aatomite kiireneiline null-energia. Heelium-3 tilkade optilises spektris aga ilmnevad otseselt Fermi mere pinnaergastused, mis tingivad foononvaba joone laienemise ja tugevalt asümmeetrilise kuju.

TÄNUAVALDUS

Käesolev artikkel on valminud sihtfinantseeritava projekti SF0180013s07, Euroopa Liidu Regionaalarengu Fondi projekti TK114 ja Eesti Teadusfondi grandi 7741 toetusel.

VIITED

- [1] M.Hartmann, F. Mielke, J.P. Toennies, A. Vilesov and G. Benedek, *Phys. Rev. Lett.* **76** (1996) 4560.
- [2] N. Poertner, J.P. Toennies, A.F. Vilesov, G. Benedek, V. Hizhnyakov, *EPL* **88** (2009) 26007.
- [3] S. H. Patil, *J. Chem. Phys.* **94** (1991) 8089.
- [4] G. Scoles, *Int. J. Quantum Chem.* **24** (1990) 475.
- [5] F. Stienkemeier, J. Higgins, W. E. Ernst, G. Scoles, *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 3592.
- [6] V. Hizhnyakov, *J. Phys.: Condens. Matter* **24** (2012) 104011.
- [7] D. D. Konowalow and P. S. Julienne, *J. Chem. Phys.* **72** (1980) 5815.
- [8] A. Färbert, J. Loch, T. Platz, and W. Dentröder, *Chem. Phys. Lett.* **223** (1994) 546.
- [9] M. Barranco, R. Guardiola, S. Hernández, R. Mayol, J. Navarro and M. Pi, *J. Low. Temp. Phys.* **142** (2006) 1.
- [10] F. Stienkemeier, O. Bünermann, R. Mayol, F. Ancillotto, M. Barranco, and M. Pi, *Phys. Rev. B* **70** (2004) 214509.
- [11] V. Hizhnyakov and G. Benedek, *Chem. Phys. Lett.* **460** (2008) 447.
- [12] M. Lax, *J. Chem. Phys.* **20** (1953) 1752.
- [13] V. Hizhnyakov, I. Tehver, and G. Benedek, *Eur. Phys. J.* **70** (2009) 507.
- [14] V. Hizhnyakov, *J. Phys. C* **20** (1987) 6073.

TEHISLIHASED: AJAMID MIKROROBOTITELE, KUID MITTE AINULT

KARL KRUUSAMÄE

TÜ tehnoloogiainstituut

SISSEJUHATUS

Lähis-Ida kroonikud kirjeldasid juba 13. sajandil masinaid, mis olid võimelised serverima teed või esitama eelprogrammeeritud muusikapalasisid – neid seadmeid võib pidada kaasaegsete robotite kaugeiks esivanemaiks. Ent täpselt nagu tänapäevased robotid erinevad funktsionaalsuselt ja ehituselt oma 800 aasta vanustest eelkäijatest, tuleb eeldada sama radikaalseid muudatusi ka tuleviku masinatest.

Tänaasel päeval on valdkondasid, mis ei saaks ilma robotiteta üldse hakkama, eelkõige võib siinkohal tuua näiteks tööstuse. Tööstusrobotika tohutu areng 20. sajandil on viinud selleni, et robotid valmistavad praktiliselt kõik autod, arvutid, mobiiltelefonid, mööbliesemed ja muud igapäevased seadmed. Teine, kahjuks igapäevane valdkond, kus robotika on muutunud peaaegu asendamatuks, on sõjatööstus ning arusaadavalt ei leia me kusagilt detailset dokumentatsiooni või teadusajakirjandust, mis kirjeldaks nende masinate tõelist tehnilist taset.

Vahest üks olulisim ja kindlasti ka tehniliselt kõige nõudlikum valdkond robotika rakendamiseks on meditsiinitehnika. Robotabiliste kasutamine inimeste ravis ei ole ajendatud ainult kiirematest ja täpsematest operatsioonidest, vaid selle peamine eesmärk on minimaalse invasiivsusega protseduurid. Juba tänaasel päeval aitavad masinad läbi viia keerulisi kirurgilisi protseduure, mis jätavad inimkehale kõigest kümne-millimeetrise läbimõõduga arme [1].

Kuid robot, mis lõhub inimese ravimisel võimalikult vähe tervet kude, peab paratamatult ka ise olema väga pisike. Ehk võiks üks kaugem eesmärk olla sõnastatud kui püüd roboti poole, mille patsient neelab kapsliga alla, misjärel arukas masin aktiveerub, ujub inimkehas probleem-

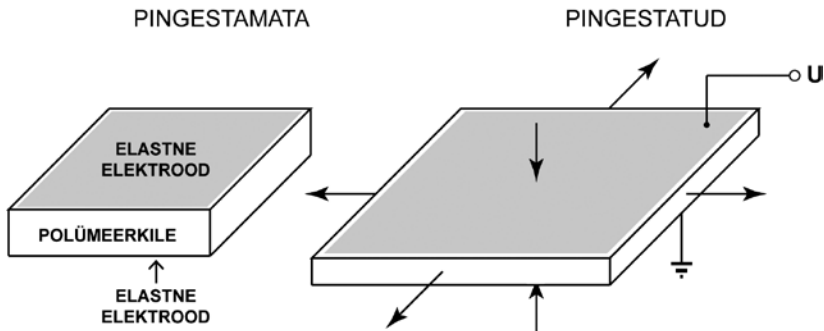
sesse piirkonda ning alustab lokaalset ravi. Pärast protseduuri lõpule viimist väljutab keha pisikese robotarsti tavapäraseid kanaleid pidi. Mida aga tähendab taolise mikroroboti ehitamine tehnilisest küljest?

Tänapäeval kasutab enamik väiksemaid (eriti just meditsiinitehnikas) kasutusel olevaid roboteid elektriajameid. Need on kiired, täpsed ja võrdlemisi efektiivsed, samuti on nende juhtimine küllaltki lihtne. Ent ka kõige pisemad elektrimootorid on organismis edasiliikumiseks liiga suured, jäädes oma mõõtmetelt millimeeterskaalasse. Teiseks koosneb iga elektrimootor paljudest eri osadest: magnetid, harjad, võll, metallkonstruktsioon jms. Lisaks käib tihtipeale mootoriga kaasas ka käigukast, mis aitab reguleerida ajami jõumomenti ja kiirust. Seega, kui soovime luua paarikümne mikromeetrise läbimõõduga elektrimootori, siis milliste mõõtmetega peaksid olema selle erinevad koostisosad? Ja kogu süsteemi funktsionaalsust silmas pidades võib täiendavalt küsida: mitut ajamit (või mootorit) üldse üks korralik *in vivo* ravirobot edukaks toimimiseks vajab? Pigem rohkem kui ühte. Ehk siit on selgelt näha, et n-õ mikrorobotid ei saa komponentide ehituses imiteerida oma suuremõõtmelisi eellasi. Tõenäoliselt ei ole võimalik vähendada traditsioonilist elektrimootorit sedavõrd pisikeseks, et suudaksime luua väiksema roboti kui 1 mm, mis sisaldaks enam kui ühte ajamit.

Liikudes väikesele skaalale, tuleb otsida uusi lahendusi – üks mikrorobotika tuleviku perspektiive võib peituda nn tehislühastes ehk elektromehaaniliselt aktiivsetes polümeerides (EAP). Elektromehaaniliselt aktiivsed materjalid muudavad oma kuju ja/või ruumala, kui neid elektriliselt stimuleerida. Neil materjalidel on tavapärase ajamsüsteemide ees mitmeid eeliseid, ent antud kontekstis on kõige olulisem nende lihtne ehitus ning sellest tulenev hõlbus miniaturiseeritavus.

Täiendavalt on EAP täiturid müravabad, väga kerged, hea jõu-massi suhtega ning võimaldavad oluliselt keerukamaid liigutusmustreid kui pöörleva võlliga elektrimootorid. Ka kulumisest tingitud probleemid on nende täituri jaoks võõrad, sest puuduvad omavahel liikuvad osad. Seetõttu võib üks EAP materjal sooritada sadu tuhandeid, kui mitte miljoneid töötükkideid.

Inglisekeelses kirjelduses on EAP-de ning teiste materjalide, mille füüsikalisi omadusi saab väliselt kontrollida, koondterminiks *smart materials* (eesti keeles kasutusel nii nutimaterjalid, intelligentsed kui ka arukad materjalid). Oluline on siinkohal täheldada, et nutimaterjal on oluliselt laiem mõiste kui tehislühaste, koondades enda alla ka nt materja-



Joonis 1. Dielektrilise elastomeeri tööpõhimõte.

lid, mille murdumisnäitajat või läbipaistvust annab elektrivälja või muu välise mõjuri toimel juhtida.

Tüüpiliselt on EAP-del ka anduromadused, st kui neid välise jõu toimel liigutada või kokku suruda, siis genereerivad need elektrivoolu. Kasutades ühe EAP riba juures nii selle andur- kui ka täituromadusi, saame nn isetundliku (ingl *self-sensing*) süsteemi, kus materjali enda mehhaanoelektrilist väljundit kasutatakse sisendina täituri tagasisidega juhtimisel.

Tehislihased võib üldise tööpõhimõtte põhjal jaotada kaheks põhi-klassiks: elektron- ja ioon-täituriid.

Nende materjalidega seonduvad uurimused võib omakorda jagada kolme rühma: uute materjalide arendamine, juhtimisteooria ning rakenduste väljatöötamine. Käesolev artikkel seab eesmärgiks anda ülevaade erinevatest tehislihasetüüpidest ning demonstreerida nendega seonduvaid saavutusi nii meil kui ka mujal.

ELEKTRON-EAP

Kaks kõige tuntumat elektronjuhtiva EAP alamklassi on ferroelektriline polümeer (tugineb piesoelektrilisele efektile) ning dielektriline elastomeer (DE), kus mehaaniline koste on tingitud plaatkondensaatori elektrodidevahelisest külgetõmbejõust. Käesolev peatükk käsitleb põhilikult just DE-täituriid, kuna viimastel aastatel võib täheldada selget positiivset trendi nendega seonduvates uurimistulemustes ja rakendustes [2]. Kõnekas näide on ka see, et 2011. aastal jõuti esimeste tavakasutajarakendusteni, mis sisaldasid DE-tehnoloogiat: turule jõudis taktiilne

Apple iPodi ümbris, mis annab kasutajale oluliselt mitmekesisemat tagasisidet kui tavapärane vibromootor¹.

Dielektriline elastomeertäitur (*DEA – dielectric elastomer actuator*) koosneb tavaliselt kolmest kihist: õhuke dielektrikkile, mille vastas-pindadele on kantud elastne elektroodikiht. Joonisel 1 on kujutatud dielektrilise täituri ehitus ja tööpõhimõte: kulonilised jõud pigistavad elastomeeri nii, et suureneb elektroodidega kaetud pindala. Lisaks, kui DE-täiturile rakendada pinge, siis selle paksus väheneb, mis aga omakorda tingib elektroodidevahelise elektrivälja ja tõmbejõu tugevnemise. Põhjalikku ülevaadet DE-täituritest ja nende rakendustest saab soovi korral lugeda Carpi jt raamatust „*Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers*“ [3].

Dielektriliste täiturite peamiseks eelisteks on deformatsiooni mas-taap, mis võib materjaliti ulatuda üle 200% algsest täituri pindalast, ning kilohertsidesse küündiv töösagedus [3,4]. Kuigi DEA-de tootmine on lihtne ja majanduslikult soodne, siis igapäevast kasutuselevõtmist takis-tab nende võrdlemisi kõrge toitepinge: 1-20 kV [3].

Seetõttu on DEA-uuringute peamiseks eesmärgiks vähendada toite-pinget, mis sõltub separaatorikile paksusest ja suhtelisest dielektrilisest läbitavusest. Vähem oluline ei ole ka selle materjali elastsusmoodul, millest oleneb saavutatav deformatsioon. Teine tähtis väljakutse on elektroodide loomine ning nende kinnitamine dielektrikkile külge. Tar-vis on luua hästijuhtivad elektroodid, mis veniksid dielektrikuga kaasa ning püsiksid selle pinnal ka pärast arvukaid töötsükleid.

Mitmetest väljakutsetest hoolimata ennustatakse DE-materjalidele suurt tulevikku nii teadusmaailmas kui ka olmeseadmetes. Juba tänasel päeval on valmistatud arvukalt erinevaid prototüüpe, mis demonstree-rivad nende materjalide võimalikke kasutusvaldkondasid. Akbari jt on valmistanud DEA-maatriksi, kus ühe täituri mõõtmed on 100 x 100 µm [5]. Sedavõrd väikese täiturite loomise peamiseks ajendiks on nn *bio-logy-on-chip* või *lab-on-chip* seadmed, mis lubavad üksikute rakkudega eksperimenteerimist. Analoogete tehnoloogia abil on Punning jt ehitau-nud omapärase kolmetäituri süsteemi, mis võimaldab nt suunata pi-sikest peeglit [6]. Mõlemal juhul kasutasid autorid täiturite valmistami-sel dielektrikuna PDMS-kilet, kus elastsed kuldelekroodid saavutatakse metalliioonide pommitamisega selle materjali pinnakihtidesse [5,6].

Carpi jt kasutavad DE-täitureid, et juhtida muudetava fookuskaugu-

1 www.vivitouch.com

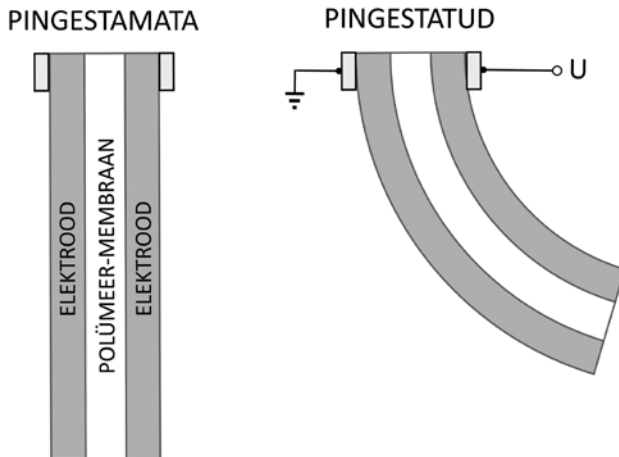
sega läätse, mis tulevikus võib olla igapäevane komponent videokamerates või fotoaparaatides [7]. Kaasaegsed puuetundlikud ekraanid ei võimalda kasutajal tajuda nuppe või saada muul moel sõrmedega tagasisidet ekraanilt. Ent kattes puuetundliku ekraani pisikeste nutimaterjalidest täituritega, saame neid üles-alla liigutades tekitada sõrmede all tunde, nagu see liiguks üle nuppude ja tähtede välja. Taoline tehnoloogia on eriti oluline nägemispuudega inimestele, kes sooviksid kasutada Braille' kirja rakendavat e-lugurit [8].

Anderson jt konstrueerisid laagri- ja metallivaba mootori, kus võlli ajavad ringi kuus süsinikpastast elektrodidega DE-täiturit toitepingel 2,5 kV. Kuigi hetkel on prototüüpmootori kiirused suurusjärgus 25 millipööret sekundis, siis autorite endi hinnangul saab tulevikus sedalaadi mootoriga teostada protseduure ka tugevas magnetväljas, nt kui kirurg vajab opereerimisel tuumamagnetresonantsseadme abi [9].

Ka DE-materjalide sensoromadused pakuvad võimalusi erinevateks rakendusteks, nt energiatootmises. Dielektrilise elastomeeri abil saab muundada mehaanilise liigutuse elektrienergiaks: efekt saavutatakse tehislhase mahtuvuse muutumisega. Laadides väljavenitatud DE-plaatkondensaatori ning lubades seejärel täituri taastada oma esialgne kuju, saame piisavalt olulise mahtuvuse muutuse, mis väljendub elektrodidevahelise pinge tõusus, ent kasvab ka kondensaatorisse salvestatud energia [3]. Kui elastomeeri väljavenitamiseks kasutada looduslikku ja piiramatut ressursi nagu merelained, saab niisugust tehnoloogiat kasutada taastuvenergia tootmisel. Ent DE-de võimsus on siiski pigem tagasihoidlik: 10-sentimeetrilises lainetuses genereeris üks DE-merepoi maksimaalselt 1,2 W, kuid poolmeetrise laine korral on eeldatav keskmine võimsus ligikaudu 50 W [10]. Arusaadavalt ei lahenda taoline ujuk Maa võimalikku energiakriisi, kuid suudab rahuldada nt ookeanise paigutatud navigeerimispoide energiavajaduse.

IOON-EAP

Ioonsetes EAP-des (IEAP) on mehaaniline deformatsioon tingitud ennekoike ionide liikumisest polümeerkarkassis. Klassikalise IEAP näitena võib välja tuua ioonjuhtiva polümeer-metallkomposiidi (*IPMC – ionic polymer-metal composite*), kus ioonpolümeermembraani (nt Nafioni) vastaspinnad on kaetud väärismetallist (nt plaatina või kuld) elektroodi-



Joonis 2. Ioon-EAP tööpõhimõte.

dega [11]. Aastal 1999 kirjeldasid Baughman jt uudset süsinikanotorudest valmistatud elektrodidega IEAP-d [12]. Täna teame, et tehislhaste elektrodimaterjalidena sobivad mitmed erinevad süsiniku allotroobid (nt süsinikaerogeel või karbiidne süsinik). Säärased tehislhased võib koondada üldnimetuse süsinik-polümeerkomposiit (CPC – *carbon-polymer composite*) alla. Kolmas oluline klass IEAP-sid on juhtivpolümeerist (nt polüpürrool) elektrodidega tehislhased, mida ingliskeelses kirjanduses tähistatakse lühendiga CP (*conducting polymer*) või CPA (*conducting polymer actuator*).

IEAP-de uuringute üks olulisi teaduskeskusi paikneb ka Eestis, kus Tartu Ülikooli arukate materjalide ja süsteemide laboris² tegeletakse prof Alvo Aabloo käe all ülalnimetatud täiturite ja sensorite arendamise, modelleerimise ja rakenduste väljatöötamisega.

Joonisel 2 on kujutatud IEAP-dele iseloomulik käitumine konfiguratsioonis, kus materjali üks ots on fikseeritud liikumatute kontaktide vahele. Kui rakendada pinnaelektrodide vahele pinge, siis näeme painutust. Kuigi IPMC, CPC- ja CP-täiturid on üldjoontes väga sarnased, siis nende toimimismehhanismid on pigem erinevad ning teadlaste jaoks jätkuva arutelu keskmeks.

IPMC puhul on membraan tüüpiliselt ise ioonne (*ionic*), st polüme-

2 www.ims.ut.ee

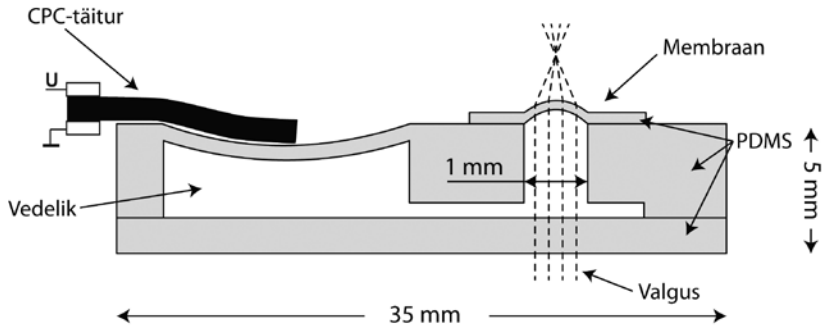
riahelaga on seotud anioonsed rühmad, ning polümeerkarkassi sisse viidud katioonid (nt Li^+) saavad selles vabalt liikuda. Veel sisaldab IPMC solvendi (nt vett) ning pingestamisel hakkavad katioonid liikuma negatiivse elektroodi suunas, sidudes endaga ka solvendi molekulidele. Arusaadavalt kasvab sellega osakeste kontsentratsioon negatiivse elektroodi läheduses ning antud pind venib välja, st materjal paindub positiivse elektroodi suunas [11].

Süsinikelektroodidega tehisliahaste korral on polümeermembraan ioone läbilaskev ning elektrolüüdina kasutatakse ionvedelikku (nt EMIBF_4), mis aga tähendab, et süsteemis saavad liikuda nii anioonid kui ka katioonid. Elektrivälja toimel liiguvad anioonid ja katioonid vastas-elektroodide lähedusse ja sisse ning liigutuse tekkimist võib taas kord põhjendada ühe pinna väljavenimisega, mis on tingitud sellest, et katioonid on suuremad kui anioonid [13].

Nii CPC kui ka IPMC puhul võib liigutust selgitada ka pinnaelektroodis tekkivate elektrostaatiliste protsessidega, mis on tingitud elektrilise kaksikkihi kujunemisest elektroodimaterjali piirpinnal. Eriti suur mõju võib neil protsessidel olla just CPC-de korral, kuna poorsel süsinikelektroodil on võrdlemisi suur eripind. Võib oletada, et reaalsuses on mõlemal mainitud protsessil oma mõju seda tüüpi IEAP-de liigutusele.

Juhtivpolümeeridel põhinevad täiturid on käsitletavatest IEAP-dest kõige omapärasemad: elektronjuhtiv polümeerelektrood vabastab redutseerimisel võrdlemisi suure ja liikumatu aniooni, mis „meelitab“ membraanist katioonid koos solvendi (nt propüleenkarbonaat) molekulidega enda juurde. Taas kord tingib taoline osakeste üleküllus ühe elektroodi pikenemise. Niisugune süsteem paindub negatiivse elektroodi suunas, st vastupidiselt tavapärasele IPMC- või CPC-täiturile. Ent vajadusel saab sünteesida ka CP-täitureid, kus just anioonid on mobiilsed, põhjustades hoopis täituri liigutust positiivse elektroodi suunas.

Üks IEAP-de olulisim eelis on võrdlemisi madal tööpinge, mis tavaliselt jääb vahemikku 1–3 V. Lisaks, nii CP- kui ka CPC-täiturid saab vajadusel teha täiesti metallivabad, mis muudab need materjalid suurepäraseks kandidaatideks *in vivo* robotikas ja/või *in vitro* bioloogilistes eksperimentides. Erinevalt DEA-dest ei eelda nende materjalide kasutamine sensorrežiimis süsteemi eelpingestamist, sest IEAP-riba painutamine välise jõuga tekitab ionide liikumise polümeerkarkassis, mis on omakorda mõõdetav elektroodidevahelise pinge või lühisvooluna [14].

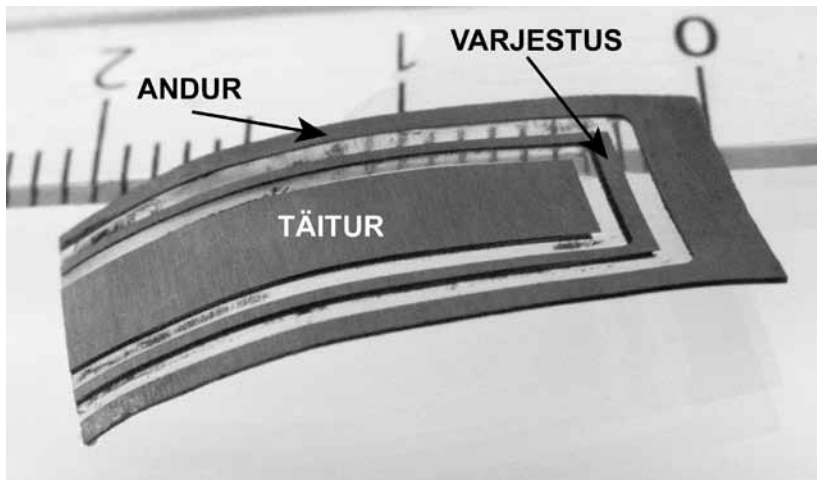


Joonis 3. Muudetava fookuskaugusega vedeliklääts.

Nagu eespool mainitud, on Tartu Ülikool IEAP-de valdkonnas üks juhtivaid teaduskeskusi, nt esimest korda maailmas valmistati just Eestis CPC-materjale, mille elektroodidena on kasutatud ka superkondensaatorites kasutusel olevat karbiidset süsinikku [13]. Samuti suudeti utiliseerida põlevkivi jääkprodukte, millest valmistati süsinikaerogeel-elektroodidega painduvaid täitureid [15]. Need tehislühased demonstreerivad väga tähelepanuväärset jõudu, suutes tõsta endast 165 korda suurema massiga esemeid [16]. IEAP-materjalide ühe näidisarakendusena valmistasid Vunder jt muudetava fookuskaugusega lätse, mille juhtimiseks kasutati just süsinikust elektroodidega tehislühaseid (joonis 3). Prototüüpläätse läbimõõt oli 1 mm ning fookuskaugust sai muuta vahemikus ∞ kuni 5 mm [17]. Taolist lättesüsteemi saab tulevikus kasutada nt *lab-on-chip* seadmetes, kus sooritatakse muu hulgas ka optilisi mõõtmisi.

Must jt demonstreerisid, et karbiidse süsiniku baasil EAP-sid saab kasutada nii liigutusanduri kui ka elektrigeneraatorina [18]. Kuigi CPC elektroodide vahele genereeritud pinge jäi alla 400 μV , on niisuguse mehhanoelektrilise kile omadusi võimalik rakendada mitmel viisil. Valmistades sellest materjalist kanga, mis muundab vibratsiooni elektrienergiaks, saab energiaallika väikese voolutarbega süsteemile. Samuti võib CPC paigutada liigutusanduriks väikestesse ja kitsastesse süsteemidesse, kuna materjali enda paksus on ligikaudu 300–500 μm .

Nagu eespool mainitud, on tavapärase IEAP-sensori väljund tingitud ionide liikumisest, mida põhjustab väline mehaaniline materjali painutamine. Ent hoides IEAP-täiturit üle pikema perioodi kõverdatud asendis, toimub ionide kontsentratsiooni ühtlustumine ning kaob



Joonis 4. Segmenteeritud elektroodidega isetundlik IPMC-täitur.

mõõdetav elektrisignaali. Seega ei võimalda taoline andursüsteem väga täpset positsiooni- või rikketuvastust. Vaadeldes aga komposiitmaterjali kui viiteliini, on võimalik luua füüsikaline mudel, mis kirjeldab IPMC või CPC painutust, mis ei ole tingitud vahetust ionide liikumisest, vaid materjali kõverusest sõltuvate takistite ja kondensaatorite jada- ja rööpühenduste ahelana [19].

Ent kui eesmärgiks on isetundlik täitur, mis muudaks kavandatava mikromõõtu süsteemi ehituse lihtsamaks, siis IEAP täitur- ja sensoromaduste modelleerimine on kõigest esimene samm täislahenduse teel. IPMC viiteliinis on toitepinge edasikandumine praktiliselt sama ajateguriga protsess kui mehaaniline liigutus, seega on pingestatud süsteemis vajalike kõverusest sõltuvate elektriliste parameetrite mõõtmine ülimalt keerukas. Ühe võimaliku lahendusena võib IPMC pinnale graveerida eraldi osad täiturpinge rakendamiseks ning sensorsignaali mõõtmiseks [20]. Joonisel 4 on kujutatud isetundlik IPMC: täitursegment liigutab kogu süsteemi ning tagasiside liigutuse kohta mõõdetakse andurelektroodi takistuse muutusena. Maandatud varjestuse roll on takistada täitursignaali levimist sensorile.

Peamiseks väljakutseks IEAP-de maailmas on optimeerimine täituri kiiruse ja jõu vahel. Reeglina, mida kiirem on IEAP painutus, seda väiksemat jõudu suudab see avaldada. Üldjoontes dikteerib siiski lõplikud

nõuded täituri omadustele (kiirus, jõud, kasutatud materjalid, mõõtmised jne) selle rakendusvaldkond.

Võttes arvesse IEAP-de spetsiifilisi omadusi, saab valmistada tehislhasest kardiostimulaatori, mis on tõmmatud paelana ümber südame [21]. Ajal, mil inimese süda töötab normaalselt, muundab rütmurpael liigutuse energiat elektriliseks, mis salvestatakse välisesse kondensaatoris või akusse, ning siis kui on tarvis südant ennast stimuleerida, tõmbub IEAP ümber südame järsult pingule, andes sellega abistava impulsi.

Kuna IEAP-d meenutavad oma käitumiselt bioloogilisi lihaseid, siis on mõistetav ka teadlaste soov valmistada neist elusloodusest inspireeritud roboteid, nt biomimeetilisi meduuse [22] või raikalasid [23], mis rakendavad just veekeskkonnas hästi toimivaid IPMC-täitureid. Kuid samaaegselt arendatakse imepisikesi CP-täitureid, mille töösagedused küündivad üle 100 Hz, et kasutada neid robotputukate tiibadena [24,25]. Kõikvõimalikud elusloodust matkivad robotid pakuvad eelkõige huvi loodusvaatlusi tegevatele teadlastele ning luureesmärkidel ka sõjatööstusele.

KOKKUVÕTE

Lõpetuseks võib tõdeda, et tehislhased on viimase 20 aasta vältel demonstreerinud õigusjärgsust tavapärastele elektrimootoritele ning nende kasutamine igapäevastes rakendustes ei ole mitte tulevikuküsimus, vaid kaasaegne lahendus. Sellest hoolimata on täna veel elektromehaaniliselt aktiivsete materjalide kasutamisega seotud mitmeid kitsendusi, mille ületamisega teadlased ja insenerid usinalt vaeva näevad.

Kuigi dielektrilised täituriid on odavad, töökindlad ning funktsioneerivad ka väga kõrgetel sagedustel, pidurdab kilovoltidesse küündiv tööpinge nende igapäevast rakendamist. Samas pakub DE-materjalide elektrigeneraerimisvõime huvi autonoomsete süsteemide energiaallikana.

Ioon-EAP suurim eelis on tuhandeid kordi madalam toitepinge, ent puudusena tuleb märkida täna veel võrdlemisi aeglast liigutuskirust. Süsteemis, kus kiirus ei ole faktor, saab juba praegu kasutada täitureid, mis liigutavad endast üle saja korra suurema massiga esemeid.

Teaduskirjanduses avaldatud prototüüpide rakenduste mitmekesisus

kinnitab aga, et tehisliahased ning nende kasutusvaldkonnad on sama mitmekülgsed kui nende looduses eksisteerivad eeskujud.

TÄNUAVALDUSED

Avaldan siirast tänu oma doktoritöö juhendajatele – prof Alvo Aabloole ja dr Andres Punningule. Suur aitäh läheb ka kogu TÜ arukate materjalide ja süsteemide labori töökale kollektiivile lõputute erialaste arutelude eest ning Mari Kikerpillile, kes aitas antud artiklit keeleliselt korrastada.

Käesoleva artikli valmimiseni viinud tegevusi on toetanud sihtfinantseeritav projekt SF0180008s08, Eesti Teadusfondi grantid 7811, 8553 ja 9236 ning doktorikool „Funktsionaalsed materjalid ja tehnoloogiad“, mida kaasrahastab Euroopa Sotsiaalfond projekti I.2.0401.09-0079 raames.

VIITED

- [1] Gomes, P. Surgical Robotics: Reviewing the Past, Analysing the Present, Imagining the Future. *Robot. Comput. Integrated Manuf.* **2011**, 27, 261-6.
- [2] Carpi, F.; Bauer, S.; De Rossi, D. Stretching Dielectric Elastomer Performance. *Science* **2010**, 330, 1759-61.
- [3] Carpi, F.; De Rossi, D.; Kornbluh, R.; Pelrine, R.; Sommer-Larsen, P., Eds. *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers: Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology*; Elsevier, 2008.
- [4] Pelrine, R.; Kornbluh, R.; Pei, Q.; Joseph, J. High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater than 100%. *Science* **2000**, 287, 836-9.
- [5] Akbari, S.; Shea, H. An Array of 100 μm x 100 μm Dielectric Elastomer Actuators with 80% Strain for Tissue Engineering Applications. *Sensor. Actuat. A-Phys* DOI: 10.1016/j.sna.2012.01.030
- [6] Punning, A.; Akbari, S.; Niklaus, M.; Shea, H. Multilayer Dielectric Elastomer Actuators with Ion Implanted Electrodes. *Proc. SPIE* **2011**, 7976, 79760U.
- [7] Carpi, F.; Frediani, G.; Turco, S.; De Rossi, D. Bioinspired Tunable Lens with Muscle-Like Electroactive Elastomers. *Adv. Funct. Mater.*

- 2011**, *21*, 4152-8.
- [8] Matysek, M.; Lotz, P.; Schlaak, H.F. Tactile Display with Dielectric Multilayer Elastomer Actuators. *Proc. SPIE* **2009**, *7287*, 72871D.
- [9] Anderson, I.A.; Tse, T.C.H.; Inamura, T.; O'Brien, B.M.; McKay, T.; Gisby, T. A Soft and Dexterous Motor. *Appl. Phys. Lett.* **2011**, *98*, 123704.
- [10] Kornbluh, R.D.; Pelrine, R.; Prahlaad, H.; Wong-Foy, A.; McCoy, B.; Kim, S.; Eckerle, J.; Low, T. From Boots to Buoys: Promises and Challenges of Dielectric Elastomer Energy Harvesting. *Proc. SPIE* **2011**, *7976*, 797605.
- [11] Shahinpoor, M.; Kim, K.J. Ionic Polymer-Metal Composites. I. Fundamentals. *Smart Mater. Struct.* **2001**, *10*, 819-33.
- [12] Baughman, R.H.; Cui, C.; Zakhidov, A.A.; Iqbal, Z.; Barisci, J.N.; Spinks, G.M.; Wallace, G.G.; Mazzoldi, A.; De Rossi, D.; Rinzler, A.G. *et al.* Carbon Nanotube Actuators. *Science* **1999**, *284*, 1340-4.
- [13] Torop, J.; Palmre, V.; Arulepp, M.; Sugino, T.; Asaka, K.; Aabloo, A. Flexible Supercapacitor-Like Actuator with Carbide-Derived Carbon Electrodes. *Carbon* **2011**, *49*, 3113-9.
- [14] Pugal, D.; Jung, K.; Aabloo, A.; Kim, K.J. Ionic Polymer-Metal Composite Mechanoelectrical Transduction: Review and Perspectives. *Polym. Int.* **2010**, *59*, 279-89.
- [15] Kaasik, F.; Torop, J.; Peikolainen, A.; Koel, M.; Aabloo, A. Carbon Aerogel Based Electrode Material for EAP Actuators. *Proc. SPIE* **2011**, *7976*, 79760O.
- [16] Torop, J.; Kaasik, F.; Sugino, T.; Aabloo, A.; Asaka, K. Electromechanical Characteristics of Actuators Based on Carbide-Derived Carbon. *Proc. SPIE* **2010**, *7742*, 76422A.
- [17] Vunder, V.; Punning, A.; Aabloo, A. Variable-Focal Lens using Electroactive Polymer Actuator. *Proc. SPIE* **2011**, *7977*, 79771E.
- [18] Must, I.; Kaasik, F.; Põldsalu, I.; Johanson, U.; Punning, A.; Aabloo, A. A Carbide-Derived Carbon Laminate used as a Mechanoelectrical Sensor. *Carbon* **2011**, *50*, 535-41.
- [19] Punning, A.; Johanson, U.; Anton, M.; Aabloo, A.; Kruusmaa, M. A Distributed Model of Ionomeric Polymer Metal Composite. *J. Intel. Mat. Syst. Str.* **2009**, *20*, 1711-24.
- [20] Kruusamäe, K.; Brunetto, P.; Graziani, S.; Punning, A.; Di Pasquale, G.; Aabloo, A. Self-Sensing Ionic Polymer-Metal Composite Actuating Device with Patterned Surface Electrodes. *Polym. Int.* **2010**, *59*, 300-4.

- [21] Shahinpoor, M.; Kim, K.J. Ionic Polymer-Metal Composites: IV. Industrial and Medical Applications. *Smart Mater. Struct.* **2005**, *14*, 197-214.
- [22] Yeom, S.-W.; Oh, I.-K. A Biomimetic Jellyfish Robot Based on Ionic Polymer Metal Composite Actuators. *Smart Mater. Struct.* **2009**, *18*, 085002.
- [23] Punning, A.; Anton, M.; Kruusmaa, M.; Aabloo, A. A Biologically Inspired Ray-Like Underwater Robot with Electroactive Polymer Pectoral Fins. In *IEEE Conference „Mechatronics and Robotics 2004“*, Aachen, Germany, 13-15 Sept. 2004; pp. 241-45.
- [24] Khaldi, A.; Plesse, C.; Soyer, C.; Troadec, D.; Vidal, F.; Cattan, E.; Chevrot, C.; Teyssie, D. Micro-Beam Actuator Based on Conducting Interpenetrating Polymer Networks: From Patterning Process to Actuation in Open Air. In *2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS 2011)*, Beijing, China, 5-9 June 2011; pp. 462-5.
- [25] Plesse, C.; Khaldi, A.; Wang, Q.; Cattan, E.; Teyssié, D.; Chevrot, C.; Vidal, F. Polyethylene oxide-polytetrahydrofurane-PEDOT Conducting Interpenetrating Polymer Networks for High Speed Actuators. *Smart Mater. Struct.* **2011**, *20*, 124002.

PLASMA JA KATALÜÜS VS KESKKONNAsAAsTE

INDREK JÕGI, MATTI LAAN

TÜ Füüsika Instituut

SISSEJUHATUS

Kaasaegne tsivilisatsioon põhineb elektrienergial, fossiilkütuseid kasutaval transpordil ja tervel müriaadil tööstuslikel protsessidel kõikvõimalike toodete valmistamiseks. Paraku on tehnoloogia arenguga kaasnevatel hüvedel oma hind, mille üheks komponendiks on keskkonnasaaste, mis tekib kõigi eeltoodud protsesside käigus ning on kahjulik nii inimeste tervisele kui ka ümbritsevale keskkonnale.

Olulise osa keskkonnasaastest moodustab õhusaaste, mida võib ühendite koostise, tekkeallikate ja eemaldusprotsesside põhjal jagada kaheks. Anorgaanilised ühendid, peamiselt lämmastikoksiidid (lühidalt NO_x) ja vääveloksiidid (lühidalt SO_x), tekivad valdavalt põlemisprotsessides (energeetika ja transport). Atmosfääris moodustavad need ühendid koos veeauruga happeid. Lämmastikoksiidid mängivad olulist rolli ka osooni lagunemisel kõrgemates atmosfäärikihtides.

Teine väga lai grupp saasteaineid on lenduvad orgaanilised ühendid (LOÜ)¹, millest osa pärineb kütuste põletamisest, kuid lisaks on paljude nende ühendite allikateks erinevad tööstusprotsessid. Siseruumide õhukvaliteeti mõjutavad oluliselt ka ühendid, mis pärinevad näiteks kosmeetikast (küünelakid, juuksegeelid), sünteetilisest põrandakattetest, kodukeemiast (puhastusvahendid, õhuvärskendajad) ja kirjatarvetest (markerid, printerid). Paljude ühendite sissehingamisega kaasnevad peavalud ja hingamisteede vaevused ning mitmed neist on tuntud ka vähitekitajatena. Omaette kahjulike ühendite rühma moodustavad dioksiinid, mis lagunevad aeglaselt ja akumulieruvad rasvades. Toiduahela astmetes ülespoole liikudes nende kontsentratsioon kasvab ja kuna veekogudes on toiduahelad eriti pikad, jõuavad nad just mereandide kaudu ka inimeste organismi.

¹ Ingl *Volatile Organic Compound* - VOC

MEETODID KESKKONNAsAASTE VÄHENDAMISEKS

Keskkonnasaaste vähendamiseks on kasutusel mitmed erinevad meetodid. Kui jätta kõrvale tsivilisatsiooni hüvedest loobumine, siis on valida peamiselt kahe erineva lähenemisviisi vahel. Üks võimalus on vähem saastava tehnoloogia kasutamine. Energia tootmisel tekib vähem saastet alternatiivenergiat kasutades (päikeseenergia või tuuleenergia), transpordis on perspektiivne kasutada naftasaaduste asemel vesinikku või elektrit. Tööstuses saab kasutusel olevad protsessid asendada protsessidega, mille käigus tekib vähem saasteaineid. Selline lähenemisviis on tõenäoliselt pikemas perspektiivis jätkusuutlikum, kuid enamasti on nende tehnoloogiate juurutamine lähitulevikus veel liiga kallisk.

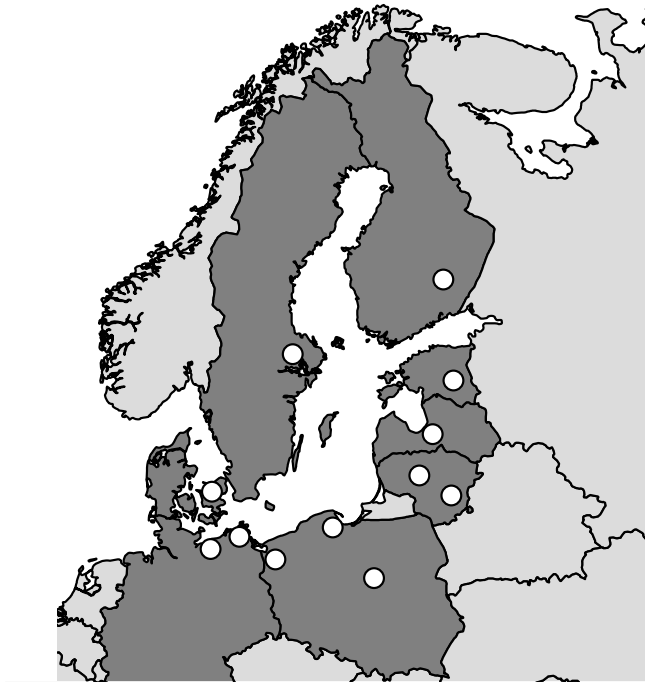
Teine lähenemisviis on olemasoleva tehnoloogia täiendamine seadmetega, mis tekkinud saasteained enne atmosfääri jõudmist eemaldavad. See lähenemine on juba praegu laialdaselt kasutusel, kuigi olemasolevate seadmete efektiivsus ja eksploatatsioonikulu pole sageli piisavalt hea ega vasta üha karmistuvatele regulatsioonidele.

Orgaaniliste ühendite eemaldamiseks on sageli kasutusel kõrgetel temperatuuridel (800–900 °C) põletamine, mille lõppsaaduseks on CO₂ ja H₂O. Paraku on see meetod energiamahukas ja majanduslikult õigustatud vaid suurte saasteainete kontsentratsioonide korral. Pealegi tekiavad põletamise käigus uued problemaatilised ühendid NO_x ja CO₂ naol.

Oksüdeerimiseks vajalikku energiakulu on võimalik vähendada katalüsaatorite abil. Nii on orgaaniliste ühendite oksüdeerimine osutunud efektiivseks juba temperatuuridel 400–500 °C. Lisaks on katalüsaatorite abil võimalik NO_x lagundada nii, et atmosfääri väljub vaid N₂ ja O₂. Katalüsaatorite korral on probleemiks nende hind ning ka eluiga, sest katalüsaatori pind kaotab aja jooksul aktiivsuse.

Põletamise asemel võib kasutada saasteainete sidumist vedelikesse või tahkete ainete pindadele. Absorptsioon vedelikesse võib küll ohtlikud ühendid heitgaasist eemaldada, ent sellega kaasneb vajadus saastunud vedelikku puhastada. Adsorptsioon poorsetele pindadele võimaldab eemaldatavaid ühendeid kontsentreerida ja mõningatel juhtudel hiljem taaskasutada. Samas on see meetod materjalikulukas, vastavad seadmed võtavad palju ruumi ja paljude heitgaasist leiduvate ühendite jaoks nad ei sobi (näiteks NO, mis moodustab sageli üle 90 % heitgaasist leiduvatest ühenditest, ei taha pindadele ja vedelikesse jääda).

Lisaks mainitud meetoditele leiavad üha laialdasemat kasutamist



Joonis 1. PlasTEP projekti on kaasatud 15 töörühma kõigest 8-st Läänemerd ümbritsevast EL riigist.

erinevad plasmatehnoloogiad, mis tihtipeale võimaldavad märgatavalt väiksemat energiakulu. Samas pole ka plasmatehnoloogia probleemideta: võivad tekkida uued ohtlikud ühendid nagu osoon ja vingugaas. Plasmatehnoloogia ei ole universaalne ja näiteks NO_x/SO_x eemaldamiseks tuleb seda integreerida teiste meetoditega [1].

Plasmatehnoloogia suur potentsiaal on vähemtuntud ja seetõttu on Läänemere regiooni programmi raames käimas projekt PlasTEP (*Plasma Technology for Environmental Protection*), mille peamiseks ülesanneteks on avalikkuse ja tehnoloogia potentsiaalsete kasutajate teavitamine ning plasmatehnoloogia evitamine. Plasmatehnoloogia evitamiseks töötatakse projekti raames välja plasmaseadmete prototüübid, mille abil saab tehnoloogia efektiivsust reaalsete saasteallikate juures katsetada. Lisaks tegeldakse uute kontseptsioonide arendamisega ja efektiivsuse hindamisega ning selle juures on oluline roll ka TÜ

gaaslahenduslaboril, kus uuritakse plasma ja katalüsaatorite koosmõju keskkonnasaaste eemaldamiseks.

MITTE-TASAKAALULINE PLASMA JA KATALÜSAATORID

Plasmatehnoloogia rakendamine keskkonnasaaste eemaldamisel baseerub termodünaamiliselt mittetasakaalulise plasma eripäral. Plasma on osaliselt või täielikult ioniseeritud gaas, milles on ligikaudu võrdne kogus mõlemamargilisi laenguid ja mis on makroskoopilises mõttes neutraalne. Tähtede plasma ja kaarleegi puhul on plasma kõikide komponentide (elektronid, ioonid, aatomid, molekulid) temperatuurid ligikaudu võrdsed. Säästulampide ja plasmateleerite plasmas ületab elektronide temperatuur (= keskmine kineetiline energia) aga mitmeid suurusjärke ülejäänud komponentide temperatuuri, seega on meil tegemist mittetasakaalulise plasmaga. Heitgaaside efektiivseks puhastamiseks on huvipakkavam ennekõike just seda tüüpi plasma.

Kuna elektronide mass on võrreldes aatomite ning molekulide massiga palju väiksem, omandavad nad kahe pörke vahel elektriväljas liikudes oluliselt suurema kiiruse. Elektroni elastsel pörkel raskemate osakestega kandub neile üle vaid tühine osa omandatud elektrivälja energiast. Seetõttu saavutavad elektronid elektriväljas palju suurema energia võrreldes ülejäänud gaasi moodustavate osakestega ja omandatud energia võib olla piisav mitteelastselt pörkeks: näiteks aatomite/molekulide ergastamine, molekulide dissotsiatsioon ja ionisatsioon. Tänu sellele asjaolule on võimalik elektrienergiat efektiivselt kasutada keemiliselt väga aktiivsete komponentide tekkeks (parimatel juhtudel kuni 30 % elektrienergiast).

Heitgaasides tekitatud plasmas on olulisemateks komponentideks hapnikuradikaal O, hüdroksüülradikaal OH ja hüdroperoksüülradikaal HO₂. Nende radikaalide abil on saasteainete oksüdeerimine väga efektiivne ja võib olla praktiliselt 100 %. Võrdluseks võib tuua termilise laundamise, kus üle 90 % energiast läheb kaotsi õhu kuumutamiseks.

Paraku ei vii plasmas tekkinud radikaalide toetatud reaktsioonid vaid soovitud saastekomponentide eemaldamisele. Näitena võib tuua reaktsioonid atomaarse hapniku osalusel. Kui eemaldatavate ühendite oksüdeerimine O radikaalidega on suhteliselt aeglane, reageerivad hapniku

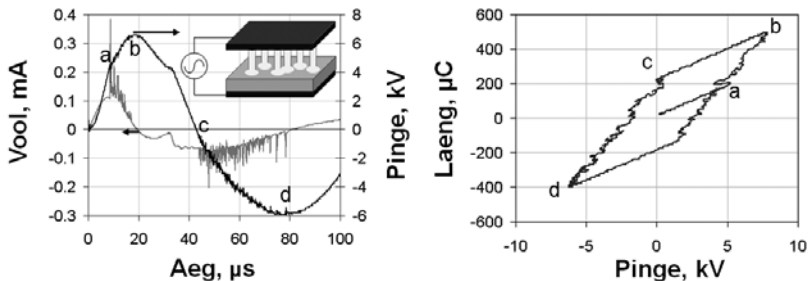
aatomid hapniku molekulidega tekitades osooni ($O + O_2 \rightarrow O_3$). Osoon on nende ühendite eemaldamisel veel vähem efektiivne. Lisaks radikaalide kulutamisele mittevajalikuks protsessiks on osoon ise kahjulik ega tohi suurtes kogustes keskkonda jõuda. Seetõttu on vajalik leida mooduseid, kuidas plasmast tekkivaid hapnikuühendeid just saasteainete eemaldamiseks selektiivsemalt ära kasutada.

Üks võimalus on kasutada plasmaga koos katalüsaatoreid, mis akumuleeriks plasmast tekkinud O radikaalid ja osooni enda pinnale. Sel moel aktiveerunud pind võib täiendavalt saasteaineid eemaldada ja seeläbi plasma efektiivsust suurendada. Lisaks võivad nn fotokatalüsaatorid kasutada plasmast pärinevat kiirgust täiendava koguse aktiivsete ühendite tekitamiseks. Katalüsaatori pind võib kinni püüda ka heitgaasis tekkivaid ühendeid ja tahma, andes plasmast tekkivatele radikaalidele kauem aega nende ühendite eemaldamiseks.

EKSPERIMENDIST

Katalüsaatorite ja plasma koostoimet uuritakse juba mitmeid aastaid ka Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi gaaslahenduslaboris. Meie nišiks antud valdkonnas on plasmakeemiliste protsesside uuringud väikesegabariidilistes plasmareaktorites. Kuna plasmaprotsessid on üsna hästi skaleeritavad, saab väiksemate kuludega hinnata ka suurte puhastusseadmete eeldatavat efektiivsust.

Plasma tekitatakse antud juhul barjäärilahendusreaktori abil, mis on osooni tootmiseks kasutusel juba üle 150 aasta. Reaktori eripäraks on ühe või mõlema elektroodi katmine dielektrikmaterjaliga (joonis 2). Meie puhul on dielektrikuga kaetud vaid üks elektrood. Piisavalt kõrge vahelduvpinge rakendamisel elektroodidele tekivad elektroodide vahel mikroahendused, mis kujutavad endast niitjaid plasmakanaleid. Lahenduskanal põhjustab elektrilaengu kogunemise dielektriku pinnale, mis viib voolu katkemiseni lühikese aja jooksul (tavaliselt 10–100 ns). Dielektrikbarjäärilahendusele ongi iseloomulik sadade või tuhandete lahenduskanalite teke ühe poolperioodi jooksul. Mikrokanalis on elektrivälja tugevus väga suur ja see võimaldab efektiivselt tekitada aktiivseid ühendeid. Teisalt, kuna lahenduskanal eksisteerib vaid lühikese aja jooksul, jääb gaasi temperatuur madalaks ja kanalis juba tekkinud ühendite lagunemise tõenäosus on väike.

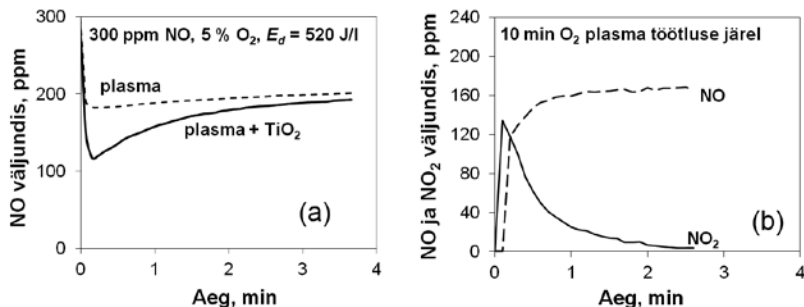


Joonis 2. Voolu ja pinge ajaline sõltuvus ning dielektrikul oleva laengu sõltuvus reaktorile rakendatud pingest (Lissajous' kujund). Vasakpoolsel joonisel on kujutatud täiendavalt dielektrikbarjäärilahenduses tekkivad mikrolahendused.

Plasmasse sisestatava energia hindamiseks kasutame Lissajous' kujundite meetodit, kus ühe perioodi jooksul dielektrikule koguneva laengu dünaamika esitatakse sõltuvana pingest (joonis 2 paremal). Barjäärilahendusreaktorit võib vaadelda kahe jadamisi ühendatud kondensaatorina, millest ühe moodustab lahendusvahemik ja teise moodustab dielektrik. Kui pinge jõuab väärtuseni, mil tekivad mikrolahendused (joonis 2, a), koguneb laeng dielektrikule. Pinge maksimumväärtuseni jõudes mikrolahendused lakkavad (joonis 2, b), kuid laeng dielektrikul jääb sinna püsima ka 0 V rakendatud pingel (joonis 2, c). Pinge polaarsuse muutudes liitub laengu poolt tekitatud elektrivälja rakendatud elektriväljaga ja seetõttu toimub läbilöökk madalamal pingel (joonis 2, c). Dielektrikule liigub vastasmärgiline laeng ja see jääb maksimumpinge saavutamisel taas dielektrikule (joonis 2, d). Tekkinud Lissajous' kujundi pindala annab meile lahendusse sisestatava energia ühe rakendatud vahelduvpinge perioodi jooksul (joonis 2).

Gaasis olevate ühendite (O_3 , NO, NO_2 , SO_2) kontsentratsioonid määrame registreerides neeldumisspektrid lainepikkuste vahemikus 200–500 nm. Katalüsaatorina kasutame nanokristallilist TiO_2 , mis on laialdaselt kasutusel fotokatalüsaatorina ja seetõttu on tema pinna omadusi põhjalikult uuritud. Võrdluseks oleme kasutanud ka Fe_2O_3 ja Al_2O_3 pulbreid.

Realse heitgaasi koostis varieerub sõltuvalt konkreetsest saasteallikast. PlasTEP projekti raames on erinevates laborites saadud tulemuste võrdlemiseks võetud kasutusele standardne segu, milles on 400 ppm NO, 500 ppm CO, 500 ppm C_3H_6 , 5 % CO_2 , 5 % H_2O , 10 % O_2 ja ülejäänud N_2 . Meie katsetes varieeriti NO ja O_2 kontsentratsioone suuremates piirides.



Joonis 3. TiO_2 toime NO oksüdeerimisele plasmas toatemperatuuril 330 ppm NO ja 5 % O_2 gaasisegu korral (a). NO oksüdeerimine TiO_2 pinnal pärast pinnatöötlust hapniku plasmas (b).

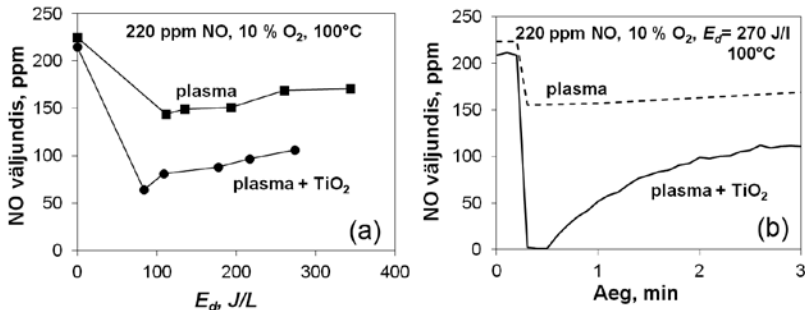
NO OKSÜDEERIMINE PLASMA JA KATALÜSAATORI KOOSTOIMEL

Esialgssed katsed viidi läbi võimalikult lihtsates tingimustes, kus segus oli vaid NO, O_2 ja N_2 [2,3]. Alates 5 % O_2 kontsentratsioonist toimusid plasmas toatemperatuuril peamiselt oksüdeerimisreaktsioonid, kus väljundis tekkis NO_2 ning suuremate võimsuste korral tekkis väljundis ka N_2O_5 ja O_3 [3].

Eksperimentidest selgus, et TiO_2 olemasolu suurendas NO eemaldamist vaid mõne minuti jooksul (joonis 3a). Väljundis oli sel ajal ka summaarne NO_x kogus väiksem. Kuna NO molekulid ise toatemperatuuril TiO_2 pinnale ei adsorbeeru, võis oletada, et täiendav NO oksüdeerimine toimus TiO_2 pinnal tänu sinna adsorbeerunud plasmas tekkinud hapniku ühenditele (näiteks O aatom). Oksüdeerumise käigus tekkinud NO_2 ja NO_3 takistasid edasist NO oksüdeerimist pinnal [4].

Seda oletust kinnitasid ka täiendavad katsed, kus reaktoris asuvat TiO_2 pinda töödeldi eelnevalt O_2 plasmaga ja seejärel juhiti reaktoris NO. O_2 plasmaga töödeldud pinnal tekkis seejärel tõepoolest NO_2 , mis mõnda aega pinnalt desorbeerus (joonis 3b). Seega leidis kinnitust oletus, et plasmas tekkivad hapniku ühendid jäävad TiO_2 pinnale, kus nad oksüdeerivad NO kiiresti NO_2 -ks.

Temperatuuri kasvades NO_x ühendite desorptsioon kasvab [4], samas kui plasma enda NO oksüdeerimise võime väheneb [5]. Meie katsed näitasid, et katmata elektroodide puhul temperatuuril 100 °C vähenes plasma NO oksüdeerimise võime oluliselt, kuid TiO_2 abil oli võimalik



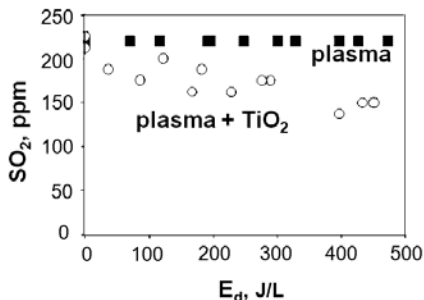
Joonis 4. NO eemaldamine ilma ja koos TiO₂ katalüsaatoriga reaktori korral 100 °C juures 3 minutit pärast töötuluse algust sõltuvalt reaktorisse antavast energiast (a) ja ajalised muutused konstantsel energial (b).

NO oksüdeerimist suurendada (joonis 4). Nii nagu toatemperatuuril, vähenes NO oksüdeerimine ajas, kuid TiO₂ omas ka pikaajalist toimet. Seejuures oli NO₂ kontsentratsioon väljundis suurem kui TiO₂ katalüsaatorita reaktori korral. Seega toimib TiO₂ kõrgematel temperatuuridel katalüsaatorina ja tasandab temperatuuri negatiivset mõju plasma NO oksüdeerimise võimele.

Veeaur on heitgaasides oluline komponent ja omab plasmakeemilistele protsessidele tugevat mõju. Meie katsed näitasid, et võrreldes kuiva heitgaasiga muudab 2 % H₂O lisamine NO eemaldamise efektiivsemaks. Vee molekulide dissotsieerumisel tekkivad OH radikaalid on veelgi aktiivsemad oksüdeerijad kui O radikaalid ja nende toimel tekivad HNO₂ ja HNO₃. TiO₂ katalüsaatoriga reaktoris oli NO eemaldamine veelgi efektiivsem.

SO₂ OKSÜDEERIMINE PLASMA JA KATALÜSAATORI KOOSTOIMEL

Lisaks NO eemaldamisele hübriidses protsessis oleme uurinud ka plasma ja TiO₂ toimet SO₂ oksüdeerimisele. SO₂ oksüdeerimine ainult plasmaga on väheefektiivne, kuna O aatomid oksüdeerivad SO₂ võrreldes NO_x-ga palju aeglasemalt [6]. Seda näitasid ka meie eksperimendid, kus SO₂ kontsentratsioon praktiliselt ei muutunud (joonis 5). TiO₂ katalüsaatori lisamine reaktorisse suurendas SO₂ oksüdeerimist märgatavalt. Eri- nevalt NO-st, mille korral katalüütiline toime avaldus alles kõrgematel



Joonis 5. SO₂ eemaldamine katmata ja TiO₂ kaetud reaktori korral.

temperatuuridel, toimus SO₂ korral oksüdatsioon juba toatemperatuuridel ja täiendav temperatuuri kasv tulemust märgatavalt ei mõjutanud. Veeauru lisamine suurendas SO₂ oksüdeerimist juba ilma TiO₂ katalüsaatorita, kuna OH radikaal on võrreldes O radikaaliga oluliselt aktiivsem. TiO₂ täiendavat efekti antud juhul ei avaldanud.

KOKKUVÕTE

Kokkuvõtvalt on eksperimendid katalüsaatori ja plasma hübriidreaktoritega näidanud, et sellisel moel on võimalik heitgaaside eemaldamise efektiivsust suurendada. Nii NO kui ka SO₂ korral võimaldab katalüsaator täiendavalt eemaldada 10–30 % kahjulikke ühendeid. Saadud tulemus osundab, et katalüsaatori lisamine plasmareaktorisse omab perspektiivi erinevates tehnoloogilistes seadmetes.

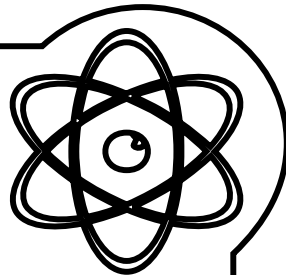
Vaatamata selgelt avalduvale katalüsaatori efektile on endiselt selgusetu, kuidas toimuvad pinnaprotsessid mikroskoopilisel tasandil. Meie esialgsed tulemused teiste nanopulbriliste katalüsaatoritega näitavad, et radikaalide efektiivsemaks kasutamiseks on otsustav roll täita poorsel pinnal ning konkreetne materjal nii suurt tähtsust ei oma.

TÄNUAVALDUSED

Käesolevas artiklis tutvustatud uurimistööd on finantseeritud ETF granti 6654 ja Läänemere regiooni programmi projekti PlasTEP poolt.

VIITED

- [1] S. Barman, L. Philip, *Environ. Sci. Technol.* **40**, 1035 (2006)
- [2] I. Jõgi, V. Bichevin, M. Laan, A. Haljaste, H. Käämbre, *Plasma Chem. Plasma Process.* **29**, 205 (2009)
- [3] I. Jõgi, V. Bichevin, M. Laan, A. Haljaste, H. Käämbre, V. Sabre, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **47**, 22817 (2009)
- [4] J. Haubrich, R.G. Quiller, L. Benz, Z. Liu, C.M. Friend, *Langmuir*, **26**, 2445 (2010)
- [5] C.R. McLarnon, B.M. Penetrante, *SAE Paper No.* 982433 (1998)
- [6] A.B. Saveliev, G.J. Pietsch, A.R. Murtazin, A. Fried, *Plasma Sources Sci. Technol.* **16**, 454 (2007)



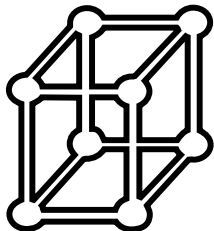
**XLII
EESTI
FÜÜSIKAPÄEVAD**

JA

**XXXIV
FÜÜSIKAÕPETAJATE PÄEVAD**

23. JA 24. MÄRTS 2012

TARTUS



23.-24. MÄRTS 2012. A

TARTUS

REEDE, 23. MÄRTS

**Dorpati konverentsikeskus
(Soola 6)**

Tervitused	10:00
EFS preemiade kätteamine, teadusteatri elementidega	10:10
<i>Kohvipaus</i>	11:40
Nobeliloeng	12:00
Arved Sapar (TO) Alternatiiv tumeda kosmoloogia paradigmat	12:25
Laur Järv (TÜ FI) Einsteini üldrelatiivsusteooria laiendused ja parametrizeeritud post-Friedmanni formalismi loomine kosmoloogias	12:50
<i>Lõuna</i>	13:20
Raivo Tamkivi (Tallinna Teaduspark Tehnopol) Eesti teaduspargid ja füüsika roll nende arengus	14:20
Nikolay Voznesenskiy (VTT-NTM OÜ) High accuracy interferometer for optical testing based on diffraction etalon	14:40
Martin Neerot (TÜ) EstCube-2 missioon QB50 nanosatelliitide võrgustikus	15:00
<i>Kohvipaus</i>	15:30
Mihkel Pajusalu¹, Margus Rätsep¹, Arvi Freiberg^{1,2} (¹ TÜ FI, ² TÜ MRI) Kvantmehaanika looduslikus fotosünteesis?	15:45
Henn Voolaid, Svetlana Ganina (TÜ) Täiendõpe reaalinete õppejõududele	16:05

Els Heinsalu (KBF1)

Konkureerivad Browni ja Levy uitlejad. 16:15

Arved Sapar (TO)

Uusi tulemusi ja ideid täheatmosfääride füüsikast ja
modelleerimisest 16:45

Kohvipaus. 17:10

EFS Üldkogu 17:25

Seltsiõhtu 18:30

LAUPÄEV, 24. MÄRTS

**Teaduskeskus AHHA
(Sadama 1)**

Avamine, tervitused 10:00

Svetlana Ganina, Henn Voolaid (TÜ)

Gümnaasiumi füüsikaõpetaja magistriõppe võimalustest TÜs 10:10

Margit Timakov (EÕL)

EÕL tegevusest ja tulevikust 10:20

Indrek Peil (Saaremaa Ühisgümnaasium)

Füüsika ainekava I kursus. Ülevaade küsitlusest. 10:40

Peet-Märt Irdt (Nõo Realgümnaasium)

Loodusainete õppesuuna eksami arendusest 11:00

Kohvipaus. 11:20

Taavi Adamberg (TÜ)

Füüsika õppet ja õpetamisest Rootsis. 11:50

Kaido Reivelt (EFS, TÜ FI)

Uutest (e-)õpikutest 12:35

Füüsikaõpetajate osakonna üldkogu. Tegevusaruanne.

Juhatuse ja esimehe valimised. Arutelud ja plaanid 2012/2013 13:00

ETTEKANNETE SISUKOKKUVÕTTED

ALTERNATIIV TUMEDA KOSMOLOOGIA PARADIGMALE

ARVED SAPAR

Tartu Observatoorium

Praegune vaatlustega seostatud paradigma tumedast kosmoloogiast baseerub suuresti neljal hüpoteesil.

1. Graviteeruva aine seisumassi tihedus Universumis on väga lähedane nn kriitilisele tihedusele, millele vastab lõpmatu paisuv tasaruum.
2. Ülivarases arengufaasis, kuid pärast Plancki ühikuniversumi moodustumist kvantfluktuatsiooni tulemusena, toimus senitundmatu osakese, inflantoni toimel Universumi ülikiire, nn inflatsiooniline (umbes eksponentsiaalne) paisumine vähemalt 30 suurusjärku. See viis homogeense (ühtlase ainetihedusega) ja isotroopse (eelissuundadeta) Universumi kujunemisele koos aine ja antiaine tekkega ergastatud energiarikkast hüpoteetilisest valevaakumist. Meenutuseks, lõpmatu ühtlase Universumi hüpotees viis omal ajal Giordano Bruno tuleriidale.
3. Äsjaselt Nobeli preemiaga pärjatud vaatlusandmete tõlgendamisel leiti, et Universum on taas hakanud paisuma kiirenevalt ja vastava universaalse tõukejõu kujundab tundmatu päritoluga tumeenergia, mida on üle 70% graviteeruvast materiasst.
4. Nähtamatu ja vaid gravitatsioonilises interaktsioonis tavalise, nn barüonainega (ca 5% koguinest) tähtedes on ka umbes 20% galaktikates ja galaktikaparvedes paiknevast ainest. See järeldub eelkõige tähtede kiirustest ringjoonelistel orbiitidel galaktikates.

Alternatiivne kosmoloogia baseerub järgmistel seisukohtadel.

1. Nii tasaruum kui ka hüperboolne ruum on kosmoloogiavõrrandis põhimõtteliselt alati lõpmatud. Seetõttu ainetihedus Universumis

võib olla allakriitiline. Tumeenergia on sel juhul tõlgendatav Universumi kineetilise paisumisenergiana, mis ületab potentsiaalset energiat ja viib Universumi oodatust kiiremale paisumisele. Universum on läinud oma viimastel arenguetappidel kineetilise energia dominantseks ja ajas oodatust kiiremini paisuvaks.

2. Kui Universum on lõpmatu, siis pole erilist mõtet oletada inflatsioonilise paisumise vajalikkust. Sel juhul juba Plancki ajahetkel ületas Universumi mastaap 30 suurusjärku Plancki pikkusühikut. Sel juhul on ka mõiste Suur Pauk selgemapiiriline ja algab hetkest null.
3. Tumeaine on tõlgendatav neutriinodena, mille keskmine seisueenergia on mõne elektronvoldi suurune. Sellised mitterelativistlike kiirustega neutriinod on Universumi paisumisel jahtunud peaaegu 4 suurusjärku madalamale temperatuurile kui footonite kosmiline mikrolainefoon, temperatuuriga umbes 2,7 K. Sellised neutriinod moodustavad galaktikates ulatusliku konstantse sügavusega potentsiaaliaugu, mille mõjul kujunevadki vajalikud orbitaalkiirused tähtede ringliikumisel galaktikates.

Valemid, millele toetun, on minu poolt tuletatud ja publitseeritud põhiliselt juba aasta enne kosmilise mikrolainefooni avastamist A. Penzias ja R. Wilsoni poolt ning analüüsitud siin esitatud aspektis möödunud aastal konverentsil.

Kosmoloogide kohta ütles L. Landau: Sageli eksitakse, kuid kunagi ei kahelda. See käib eelkõige alghetke lähedusse ekstrapolatsiooni kohta piiratud teadmistest lähtudes.

EINSTEINI ÜLDRELATIIVSUSTEOORIA LAIENDUSED JA PARAMETRISEERITUD POST-FRIEDMANNI FORMALISMI LOOMINE KOSMOLOOGIAS

LAUR JÄRV

TÜ Füüsika Instituut

Ettekanne tutvustab võimalust, et universumi kiireneva paisumise efekt pole tingitud mitte tumeenergiaks nimetatud tundmatust materiaaliigist, vaid kosmilistes mastaapides avalduvast Einsteini üldrelatiivsus-

teooria modifikatsioonist. Sellest ajendatuna on viimasel paaril aastal aktuaalseks teemaks tõusnud nn parametrizeeritud post-Friedmanni formalismi loomine, mille abil oleks ühtses raamistikus võimalik võrrelda kosmoloogilistes täppisvaatlustes avalduda võivaid kõrvalekaldeid üldrelatiivsusteooria standardkosmoloogia aluseks olevast Friedmanni mudelist väga erinevate laiendatud gravitatsiooniteooriate poolt ennustatuga. Selline lähenemine oleks analoogne 1960-ndatel aastatel välja töötatud parametrizeeritud post-Newtoni formalismile, mis vaadeldes proovikeha aeglast liikumist nõrgas gravitatsiooniväljas võimaldab anda eksperimentaalsed piirangud gravitatsiooniteooriale keskmises, Maa ja Päikesesüsteemi mastaabis. Ettekande lõpus tuleb pisut juttu ka sellest, kuhu niisuguses kontekstis asetub TÜ FI teoreetilise füüsika laboris tehtav uurimistöö.

EESTI TEADUSPARGID JA FÜÜSIKA ROLL NENDE ARENGUS

RAIVO TAMKIVI

Tallinna Teaduspark Tehnopol

- Teadusparkide arengu Eestis käivitasid füüsikud ja see areng on jõudnud rahvusvahelisele tipptasemele.
- Teaduspargid on teaduse ja ettevõtluse sildstruktuurid päris mitmes mõttes.
- Teadusparkide ja teaduse vahelise suhtluse tõenäolisteks raskuspunktideks on:
 - * inimesed (sh tudengid),
 - * teadus- ja arendustöö tulemused,
 - * üldine ja spetsiifiline ekspertiis,
 - * suhted kõrgtehnoloogia suurettevõtetega.
- Füüsika ja teadusparkide side võiks olla praegusest tugevam, mida selleks teha?

www.tehnopol.ee

TEHNOPOL on keskkond teadmismahukatele ettevõtetele. Pakume väärtust lisavaid äriarendusteenuseid ning mugavat asukohateenust.

ESTCUBE-2 MISSIOON QB50 NANOSATELLIITIDE VÕRGUSTIKUS

MARTIN NEEROT

Tartu Ülikool

ESTCube-2 missioon on osaleda QB50 projektis, mis on Eesti, Läti, Rootsi ja Sloveenia ühisprojekt. Meie satelliit viib läbi väheuuritud ionosfääri mõõtmisi ja katsetab esmakordselt kosmoses miniatuurset külma gaasi tõukemootorit. ESTCube-2 on Eesti Tudengisatelliidi Programmi järgmine väljakutse pärast varsti valmivat ESTCube-1.

Järgmine projekt, millest meie meeskond planeerib osa võtta, on QB50 nanosatelliitide võrgustik. QB50 on von Karmani Instituudi projekt, mille raames saadetakse kosmosesse 50 satelliiti, mille eesmärk on läbi viia paralleelseid ionosfäärimõõtmisi. QB50 satelliite ehitavad erinevad haridus- ja teadusasutused üle maailma. Neil kaheühikulistel (üks ühik on 10 cm × 10 cm × 10 cm) satelliitidel on üks kahest võimalikust teadusaparaatide komplektist, mis võtavad poole satelliidi ruumalast. Võimalikud komplektid koosnevad kas ionide ja neutraalsete osakeste massispektromeetrist (*Ion and Neutral Mass Spectrometer*) ja atomaarse hapniku detektorist või Langmuiri sondist. Lisaks on satelliitidel laserreflektorid ja temperatuuriandurid. Komplektid antakse meeskondadele koordineerija poolt. Meeskondade ülesandeks on ehitada satelliitide alamsüsteemid ja soovitatavalt lisada olemasolevasse ruumi enda teadusmissioon. Meie plaan on lisada satelliidile külma gaasi tõukemootor.

QB50 ionosfääriuuritud võimaldavad teha mõõtmisi üheaegselt 40 nanosatelliidil ja anda ulatuslikke andmeid väheuuritud ionosfääri kohta. Selline suurejooneline projekt eeldab koostööd ja teatavaid standardiseerimisi.

Külma gaasi tõukemootor on Rootsi firma NanoSpace väljaarendatud tehnoloogia, mille kontrollsüsteemi arendab Sloveenia Space-SI. Miniatuurne külma gaasi tõukemootor on kosmoses varem kasutamata mootor, mis on nanosatelliitidele sobiv, kuna nanosatelliitidele esitatavad nõuded ei luba ionmootorite ja pürotehnika kasutamist. Külma gaasi tõukemootor oleks rakendatav orbiidi kontrollimisel ja satelliidi asendi muutmisel.

KVANTMEHAANIKA LOODUSLIKUS FOTOSÜNTEESIS?

MIHKEL PAJUSALU¹, MARGUS RÄTSEP¹, ARVI FREIBERG^{1,2}

¹TÜ Füüsika Instituut

²TÜ Molekulaar- ja Rakubioloogia Instituut

Valgusenergia kogumise põhieesmärgid on nii looduses kui ka inimtehnoloogias üldjoontes samad: toota elektrivoolu, mida saaks hiljem kasutada keemiliste reaktsioonide läbiviimiseks või mehaanilise töö tegemiseks. Siiski on pooljuhtidel põhinevates päikesepaneelides ja eluslooduses tingimused väga erinevad. Päikesepaneelide loomisel kasutatakse kõrgeid temperatuure ja tavaliselt üliharuldasi keemilisi elemente. Looduses aga saadakse hakkama väga levinud keemiliste elementidega ja kasutades füsioloogilisi temperatuure. Lisaerinevus tuleneb ka sellest, et pooljuhtides on võimalik laengute edasikandumine ja otseselt elektrivoolu tekkimine. Elusorganismides olevad valgud aga reeglina elektrit ei juhi. Kuidas saab looduslik fotosüntees toimuda? Oma töös suutsime tuvastada ühe võimaliku mehhanismi.

Keskendusime fotosünteesivatele purpurbakteritele. Nende fotosünteesilistes membraanides on erinevaid mikroskoopia ja kristallograafia meetodeid kasutades suudetud leida väga korrapäraseid klorofüllis sisaldavaid valgustruktuure. Suure korrapärasuse tõttu meenutavad need kristalle ja kristallides on ammu tuntud delokaliseeritud ergastused – eksitonid, mis võimaldaks energia ülekannet ilma elektronide ülekandeta. Samas looks eksitonid ka võimaluse luua süsteem, mis oleks võimeline väga paindlikult valgusenergiat neelama ja transportima. Siiski on sellisel tasemel kvantmehaaniliste nähtuste esinemine bioloogilistes organismides seni tõestamata.

Efekti olemasolu tõestamiseks uurisime eelpoolnimetatud valgustruktuure ja fotosünteesilisi membraane optilise spektroskoopia meetoditega ning lõime kvantmehaanilise mudeli nendes esinevate efektide kirjeldamiseks [1]. Varasemalt on neid süsteeme uuritud ainult väga madalatel temperatuuridel, kuid need ei vasta reaalses organismides eksisteerivatele tingimustele. Töö käigus õnnestus fotosünteesilistes membraanides toatemperatuuril eksperimentaalselt tuvastada kiirguse polarisatsiooni anisotroopia miinimumid ja üheselt tõestada nende põhjustatus eksitonnähtuste poolt. Tulemused tõestavad üheselt eksitonide esinemise nendes proovides ka toatemperatuuril ja seega ka reaalses elusates bakterites.

Bakterites toimuvate protsesside parem mõistmine aitaks näiteks toota odavamaid ja laiemalt levinud ühenditest koosnevaid päikese-paneele. Lisaks võimaldaks süsteemi parem tundmine tulevikus luua modifitseeritud organisme, mis suudaksid valgust palju efektiivsemalt koguda, suurendades nii näiteks põllukultuuride tootlikkust.

- [1] M. Pajusalu, M. Rätsep, G. Trinkunas, A. Freiberg, Davydov Splitting of Excitons in Cyclic Bacteriochlorophyll *a* Nanoaggregates of Bacterial Light-Harvesting Complexes between 4.5 and 263 K. *ChemPhysChem* 12 (2011) 634–644

TÄIENDÕPE REAALAINETE ÕPPEJÕUDUDELE

HENN VOOLAI, SVETLANA GANINA

TÜ koolifüüsika keskus

Aastal 2009 toimus esimene kõrgkooli reaalinete õppejõududele mõeldud täiendõppe kursus *Reaalteaduste didaktika*. Initsiatiiv sellise kursuse läbiviimiseks tuli TÜ LoTe prodekaan Mart Noormalt. Põhjuseks oli fakt, et FI õppejõudude näitajad olid tudengiküsitluste põhjal madalamad LoTe keskmistest näitajatest. Selle põhjusi võib olla mitu, kuid üks on kindlasti meie õppejõudude (ja teiste õppetööd tegevate inimeste) nõrk õppe-metoodiline ettevalmistus.

Moodustati meeskond kursuse läbiviimiseks koosseisus: Mart Noorma, Kalev Tarkpea, Henn Voolaid, Svetlana Ganina, Ly Sõõrd ja Karin Laansalu-Veskioja LoTe-st ning Mari Karm sotsiaal- ja haridusteaduskonnast. Kursus algas avaüritusega Pühajärvel ja lõppes kahepäevase seminariga Rõuges. Toimus üldse 8 õppepäeva. Kursuse lõpetajaid oli 26.

Eesmärkideks olid:

- tutvustada erinevaid õppestrateegiaid ja -taktikaid
- ärgitada mõttevahetust füüsikaõppe eesmärkidest ja õpiväljunditest
- vahetada kogemusi füüsikaõppemeetoditest ja -võtetest.

Kursus viidi läbi, aga kasutegur jäi oodatust madalamaks. Näiteks loengute ühiskülastused koos neile järgnevate aruteludega ei õnnestunud hästi, sest oli raske leida aegu, mis sobinuks esinejale ja arutlejatele.

Mõned loengukülastused ja arutelud toimusid, kuid need ei hõlmanud kõiki kursuselasi.

Ka teiste ürituste korral oli tunda korraldajatepoolset ebalust ja ülesannete hajuvust. Suur kasu oli Mari Karmist, kes aitas meid palju nii oma erialateadmiste kui suhtekorraldajana.

Edaspidi on kursusi toimunud igal aastal, mullu isegi 2 kursust, üks Tartus, teine Tallinnas. Väljasõiduseminaridest oleme loobunud, kuna need ei õigustanud ennast. Korraldavas meeskonnas on toimunud muudatusi ja mullu olid seal Svetlana Ganina, Aile Tamm, Siiri Velling, Ly Sõõrd, Taavi Vaikjärv ja Henn Voolaid. Kursuse sisu ja struktuur on välja kujunenud ja läbiviijad omandanud uusi kogemusi. Viimane kursus õnnestus oluliselt paremini kui esimene kursus.

Praegu on kursuse üldine eesmärk tutvustada ja harjutada oma aine loovat ja kaasahaaravat õpetamist. Käsitletakse konkreetseid klassikalisi õppevorme (loeng, seminar, praktikum) ning leitakse võimalusi nendes kasutada üliõpilasi kaasahaaravaid õpetamisvõtteid (dispuut, rollimäng, arutelu jt).

Suurt tähelepanu pööratakse väljundipõhisele õppele, õppe- ja hindamismeetoditele ning hindamiskriteeriumidele.

Reaalse õppetöö analüüsimiseks esineb iga kursuslane mingil õppepäeval loengu-, seminari- või praktikumifragmendiga, mida teised kursused pärast analüüsivad.

Reaalteaduste didaktika kursuse on siiani lõpetanud 77 inimest, neist 45 FI-st. Teised on olnud TÜ keemikud ja matemaatikud, EMÜ, TTÜ ja Tallinna IT kolledži õppejõud.

Osalejate tagasiside kursuse sisu ja korralduse suhtes on olnud positiivne. Planeerime sellel aastal jätkata samas vaimus, lisame rohkem praktilisi ülesandeid ja arvestame õppejõudude konkreetsete soovidega, et saada abi oma õppe-metoodilise töö parandamiseks.

KONKUREERIVAD BROWNI JA LEVY UITLEJAD

ELS HEINSALU

Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut

Interakteeruvate osakeste süsteemid aitavad modelleerida ja mõista mitmeid erinevate valdkondade probleeme. Käesolevas ettekandes käsitletakse bioloogilisi mudeleid, kus sama liigi isendid sooritavad kahe-dimensionaalset Markovi uitliikumist ning reprodutseeruvad ja surevad. Ruumiline liikumine vastab kas tavalisele difusioonile, mis on iseloomustatav Gaussi hüpetega (Browni uitlejad), või superdifusioonile, mis on iseloomustatav Levy lendudega (Levy uitlejad). Isenditevahelise konkurentsiga seoses vaadeldakse järgmist kolme olukorda: a) konkurents puudub, b) globaalne konkurents, kus paljunemine ja surm on mõjutatud kõigi teiste süsteemi kuuluvate isendite poolt, c) mingi isendi paljunemise ja surma tõenäosused sõltuvad teiste isendite arvust naabruskonnas (lõpliku ulatusega mittelokaalne interaktsioon).

Globaalse ning lõpliku ulatusega mittelokaalse interaktsiooniga süsteemide vahel ilmnevad olulised erinevused. Globaalse interaktsiooni korral on osakeste ruumiline jaotus seotud difusiooni tüübiga. Difusiooni mõlema tüübi korral koosnevad tüüpilised konfiguratsioonid ühest või paarist klastrist. Levy uitlejate korral ilmnevad keskmise kobara kuju ning klatri läbimõõdu ja massikeskme liikumise tõenäosusjaotustes pikad sabad. Browni uitlejate korral pikad sabad puuduvad. Sarnane situatsioon leiab aset ka interaktsiooni puudumise korral, kuid siis on indiviidide arvu fluktuatsioonide efektid palju suuremad. Mittelokaalse lõpliku ulatusega interaktsioonide korral on olukord oluliselt erinev. Esiteks, üksik klaster asendub klastrite perioodilise mustriga, kusjuures perioodilisus on määratud interaktsiooni raadiuse poolt. Kobarate liikumine on tugevalt piiratud naaberkobarate poolt. Lisaks sellele vähendab interaktsiooni raadius pikkade Levy hüpete mõju, nii et klastrite kujud ei oma üldiselt pikkasid sabasid ning ruumiline konfiguratsioon on seega mõlemat tüüpi difusiooni korral sarnasem. Lõpetuseks on lõpliku ulatusega mittelokaalse interaktsiooniga süsteemides uuritud ka süsteemi evolutsiooni seoses erinevate gruppide ellujäämise või kadumisega. Ilmneb, et erinevate gruppide segunemine ja konkurents on tugevalt mõjutatud difusiooni poolt.

UUSI TULEMUSI JA IDEID TÄHEATMOSFÄÄRIDE FÜSIKAST JA MODELLEERIMISEST

ARVED SAPAR

Tartu Observatoorium

Kuumadeks täheatmosfäärideks loetakse täheatmosfääre, kus võib arvestamata jätta molekulid ning piirduda aatomite ja ioonidega täheplasmaga. Selliste täheatmosfääride spektrite põhiosa paikneb vaakumultravioletses spektripiirkonnas ja on rikas neeldumisspektrijoonte poolest. Selliste täheatmosfääride (efektiivsete temperatuuridega 9 000 – 50 000 K ja väikeste raskuskiirendustega 10^2 cm/sec² hõreda atmosfääriga ülihiidtähtedest kuni tunduvalt tihedamate peajada tähtedeni raskuskiirendustega suurusjärgus 10^5 cm/sec²) modelleerimise ja neis toimuvate füüsikaliste protsesside uurimisega olen ühe läbiva teemana tegelnud nn Tõravere tähelinnaku algaegadest alates.

Täheatmosfääri modelleerimine jaguneb mitmeks erieesmärgiliseks osaks.

1. Täheatmosfääri termodünaamilise oleku, s.o temperatuuri ja rõhu sõltuvuse leidmine sõltuvalt massi tulptihedusest (g/cm²).
2. Ionisatsiooniastmete ja ergastusseisundite hõive leidmine oluliste aatomite ja ioonide jaoks.
3. Neeldumiskoeffitsiendi leidmine spektrijoonte jaoks (andmebaasis *ca* pool miljonit joont) ja pidevas spektris (neeldumisristlõiked elektronide seotud-vaba siiretel).
4. Vesiniku spektrijoonte profiilifunktsioonide uute analüütiliste valemite leidmine seisundite Lorentzi sumbumisprofiili, Doppleri soojusliikumise profiili, seisundite Starki nihete Holtsmarki profiili ja atomaarseisundite nn kanguruhüpete tulemusena elektrostaatilises väljas (A. Sapar, R. Poolamäe).
5. Kiirguslevi võrrandi lahendamine, kiirgusvoo spektri arvutus.
6. Temperatuurijaotuse parandamise meetodite väljatöötamine konstantse summaarse kiirgusvoo leidmiseks.

Varasematest meetoditest mõne suurusjärgu võrra täpsema kiirgusvoo konstantsuse ja lokaalse kiirgusliku tasakaalu annab kiirgusvoo ja kiirgustasakaalu hälvetele vähimruutude rakendamine Levenbergi-Marquardti meetodil, kus leitakse Jakobiaan ja Hessiaan

ning seejärel parandatakse temperatuurijaotust Broydeni meetodil (R. Poolamäe, A. Sapar). Samal teel saab väga täpselt määrata kõrvalkaldeid lokaalsest termodünaamilisest tasakaalust täheatmosfäärides.

Ettekannet ilmetatakse mitmesuguste arvutustulemustega.

GÜMNAASIUMI FÜÜSIKAÕPETAJA MAGISTRIÕPPE VÕIMALUSTEST TÛS

SVETLANA GANINA, HENN VOOLAID

TÜ koolifüüsika keskus

Gümnaasiumi loodusteaduste (ka füüsika) õpetajaks võib õppida Tartu Ülikooli magistrantuuris 2 aastat või avatud ülikoolis 2,5 aastat. Milleks peaks Eesti füüsikaõpetaja läbima magistriõpinguid? Ühest vastust sellele küsimusele pole, igauks vastab endale ise. Toome siin välja mõned positiivsed asjaolud, mis magistrantuuri läbimisega kaasnevad.

Kuna aastal 2011 kinnitati uus gümnaasiumi füüsika õppekava, ilmnes vajadus täiendada oma teadmisi füüsika vallas. Paljud praegu koolides töötavad õpetajad on oma hariduse omandanud veel nõukogude ajal. Fundamentaalses klassikalises füüsikas ei ole küll poliitilise olukorra muutumisel midagi muutunud, kuid tehnika ja tehnoloogia areng on teinud tohutu sammu edasi. Füüsikaõpetaja peaks nende muutustega kursis olema. Gümnaasiumi füüsika ainedidaktilises moodulis on näiteks sellised ained: eksperimentaalne koolifüüsika, füüsika ja tehnika, füüsika meie ümber, globaalfüüsika jne.

Nii nagu on muutunud viimasel ajal meie ühiskond, on muutunud ka meie õpilased ja nende ootused õppimisele. Tänapäeva õppur on iseteadlik ja iseseisev, IT vallas kompetentne, on sündinud, kasvanud ja elanud infoühiskonnas, ta on interaktiivne, suhtlev ja ootab suhtlemist ning on kriitiline. See kõik viitab sellele, et ta ei saa rahul olla õpetamisega, mis seni on toimunud. Kuidas teha nii, et tal oleks huvitav mitte ainult internetis, vaid ka füüsika tunnis? Kuidas panna särama ta silmad ja suunata teda kasutama 21. sajandi tehnoloogiaid füüsika õppimisel? Nendele küsimustele vastavad TÛs sellised ained nagu

füüsika didaktika, füüsika õpetamine gümnaasiumis, füüsika õppe-meetodid, aktiivõpe füüsika õpetamisel, informatsiooni- ja kommuni-katsioonitehnoloogia füüsikahariduses.

Samas on toimumas muutused gümnaasiumi õppekavades. Nagu kõrg- ja kutsehariduses on toimunud üleminek väljundipõhisele õpe-le, toimub see varsti ka gümnaasiumihariduses. Suurt osa sellega seoses saab õppida magistriõpingutes üldpedagoogilistes ainetes. Uuemad neist on: uurimuslik õpe, loodusteaduste didaktika, haridus-tehnoloogia loodusteadustes jne.

EFS uuringud näitasid, et paljudel gümnaasiumi füüsikaõpetajatel puudub tegelikult füüsiku baasharidus. Füüsikat koolides õpetavad matemaatikud, keemikud, loodusõpetajad ja isegi kehalise kasvatus-e õpetajad. Sel juhul on gümnaasiumi füüsikaõpetaja eriala omanda-misel võimalik paljud ained VÕTAgale üle kanda ja keskenduda füüsika ainete õppimisele.

Magistrikraadi omandamisel on peale silmaringi laiendamise ka puht-pragmatilised põhjused. Õpetaja atesteerimisel on magistri-kraad soodustavaks faktoriks vanemõpetaja või õpetaja-metoodiku ametijärgu taotlemisel.

Kõik, kes me siin täna oleme, oleme tegelikult füüsika austajad ja patrioodid. Mõelge magistrantuuris õppimise peale kas statsionaarses või avatud ülikooli õppes, soovitage kolleegidele, keda täna siin pole, ja ootame teid augustis dokumentide vastuvõtul.

MAGNETVÄLJA SIMULAATORI ARENDAMINE ESTCUBE-1 JAOKS

HANNES HALJASTE
TÜ Füüsika Instituut

Stendietekande eesmärgiks on näidata Tartu Ülikooli Füüsika Instituudis ESTCube-1 alamsüsteemi ADCS juures läbiviidavas bakalaureuse-töös tehtut. Töö eesmärgiks on ehitada valmis seade, millega oleks või-malik simuleerida homogeenset magnetvälja tugevusega kuni 3 gaussi ehk 0,3 mT.

Tegevusplaan eesmärgi saavutamiseks:

1. Leida sobiv lahendus koos vajalike parameetritega magnetvälja tekitamiseks.
2. Kerida vajalikud poolid.
3. Ehitada raam poolidele.
4. Konstrueerida seade, millega tekitada vajaliku suurusega elektrivoolu poolides.
5. Luua vajalik arvutiprogramm elektrivoolu juhtimiseks poolides.
6. Teha vajalikud mõõtmised, et teada saada tegelik magnetvälja tugevus ja homogeensus.

ESTCube-1 ülesandeks on testida kümnemeetrise nanojuhtme võimalikku kasutamist elektrilise päikesepurje arendamise juures. ADCS ehk *Attitude Determination and Control System* on alamsüsteem, mis peab tagama satelliidi asukoha määramise ja kontrollimise Maa orbiidil. ADCS uurimiseks ja käitumise põhjuste kindlakstegemiseks maa-kera pinnal on vaja luua kontrollitud magnetväli.

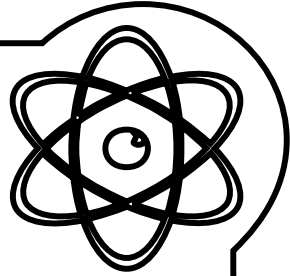
Magnetväli peab olema piisavalt tugev, et oleks võimalik teste läbi viia ilma segavate kõrvalmõjudeta: Maa magnetväli, mõõtmisvahendite, arvutite ja muude elektrooniliste seadmete poolt tekitatud magnetväljad. Vajalik on Maa magnetväljast kuni kuus korda tugevama magnetvälja tekitamine. Sellise tugevusega magnetvälja saab kasutada erinevate sensorite ja seadmete testimiseks.

Töö käigus konstrueeritakse Helmholtzi mähis ja vajalik juhtimisüsteem, et simuleerida vajalikku magnetvälja. Selle lahenduse mõttes välja Saksamaa füüsik Hermann von Helmholtz rohkem kui sajand tagasi. Helmholtzi mähis koosneb kahest samasugusest keritud poolist, mis on omavahel ühendatud nii, et vool läbiks neid samas suunas. Poolid on üksteisest asetatud kaugusele, mis on võrdne nende raadiusega. Teoreetiline magnetvälja tugevus Helmholtzi mähise keskpunktis on võimalik leida valemist (1) ning selle punkti ümbruses peaks magnetväli olema homogeenne:

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{2}{3}} \frac{\mu_0 n l}{r}. \quad (1)$$

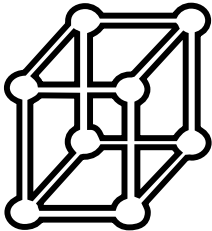
Väljundid:

1. Satelliidi liikuma panemine ja peatamine tekitatud magnetvälja abil.
2. Uurida magnetvälja omadusi ja kasutada erinevaid võtteid magnetvälja juhtimiseks.
3. Teha kindlaks, kas simuleeritud magnetväli on piisav satelliidi testimiseks.



**EESTI FÜÜSIKA
SELTS**

2011



EFS AUKIRJAD JA PREEMIAID

EFS AASTAPREEMIA 2011

DIPLOM

Eesti Füüsika Selts tunnistab oma aastapreemia vääriliseks

Ivo Heinmaa

maailmas unikaalsete madalatemperatuursete kõrglahutusega tahkise-TMR mõõtepeade konstrueerimise ning eduka rakendamise eest.

Tartus, 22. märtsil 2011. a

EFS esimees

EFS AUKIRJAD 2011

Eesti Füüsika Selts tunnustab aukirjaga

Oskar Noorkõiv'u

Tähetorn Orion'i asutamise ja eestvedamise eest.

Tartus, 22. märtsil 2011. a

EFS esimees

Eesti Füüsika Selts tunnustab aukirjaga

Jaak Jaaniste't

pikaajalise tulemusliku töö eest astronoomia ja füüsika järjekestvuse kindlustamisel Eestis ning seoses Tartu Tähetorni uue tulemisega.

Tartus, 22. märtsil 2011. a

EFS esimees

EFS TÄNUTÄHED

Eesti Füüsika Selts annab tänutähed neile, kes on eelmisel aastal korda saatnud EFS tegevuseesmärke toetavaid silmapaistvaid tegusid:

Henn Voolaid korraldas füüsikaõppejõudude didaktika kursust
Anu Reinart viis läbi EstSpacE'i konverentsi
Ergo Nõmmiste ehitab Eesti kiirekanalit MAX-LABis
Riina Murulaid ja **Jaani Paaver** algatasid ja hoidsid tegusana füüsika-
 õpetajate võrgustiku
Tõnis Eenmäe näitas üles kodanikualgatust

EESTI FÜÜSIKA SELTSI JUHATUSE 2011. AASTA TEGEVUSARUANNE

Traditsioonilised Eesti füüsikapäevad toimusid 22.–23. märtsini Tartus TÜ Tähe 4 õppehoones. Füüsikapäevad organiseerisid Kaido Reivelt, Aile Tamm, Jaak Jõgi ja Riina Murulaid. Füüsikapäevade raames toimus 22. märtsil EFSi üldkogu, millel kinnitati seltsi juhatuse tegevus- ja majandusaruanne. Tööpäeva lõpetas traditsiooniline seltsiõhtu Tähe 4 kohvikus.

Füüsikapäevadel kuulutati välja EFSi aastapreemia, mille sai Ivo Heinmaa (KBFI) maailmas unikaalsete madaltemperatuursete kõrglahutusega tahkise-TMR mõõtepeade konstrueerimise ning eduka rakendamise eest. EFSi aukirjad said Jaak Jaaniste pikaajalise tulemusliku töö eest astronoomia ja füüsika järjekestvuse kindlustamisel Eestis (ning seoses Tartu Tähetorni uue tulemisega) ja Oskar Noorkõiv Tähetorn Orion'i asutamise ja eestvedamise eest.

Ilmus EFSi aastaraamat 2010 (toimetajad Anna Aret, Helle Kaasik ja Piret Kuusk). EFSi listi seltsid.efs@lists.ut.ee ja EFSi kodulehte (www.fuusika.ee/efs) haldab Kaido Reivelt.

9.–10. märtsini toimunud Eesti koolinoorte 58. füüsikaolümpiaadil sai EFSi eriauhinna (ajakirja *Scientific American* aastatellimuse) Jaan Toots (Tallinna Reaalkool).

Taavi Adambergi ja Alex Nõomaa vedamisel jätkas oma tööd Teadusbuss Suur Vanker. Töötati välja kaks uut etendust: bioloogiaetendus ja mustkunstietendus. Toimus 75 teadusbussi reisi 6 kavaga. Iga reisi raa-

mes külastati 1–3 kooli või üritust. Aktiivselt käis teadusteatri tegemas ca 25 üliõpilast, külastati 49 kooli. Teadusbussi meeskonna eestvõttel toimus TÜ loodus- ja tehnoloogiateaduskonnas juba viiendat korda kursus „Teadus aimeloengutes“, millel osales ca 40 ja mille lõpetas 16 erinevate erialade üliõpilast ning mille raames nad said esmase kogemuse teadusteatri tegemisest ning teaduse populariseerimisest.

Septembris ilmus esimene osa eestikeelsest kõrgkoolide füüsikaõpikust – David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker „Füüsika põhikursus“ (*Fundamentals of Physics*). Tõlke valmimise ajalugu on pikk – protsessiga alustati juba 2007. a. Erilise tänu pälvivad toimetaja Piret Kuusk ja küljendaja Atko Remmel, kelle rahumeelne visadus tagas selle, et trükkimine lõpuks teoks sai. Õpiku teine osa ilmub 2012. a märtsis. Õpiku väljaandmist toetavad riiklik programm „Eestikeelsete kõrgkooliõpikute koostamine ja väljaandmine 2008–2012“, Tartu Ülikool ja Eesti Teaduste Akadeemia.

Jätkus füüsikaportaali (www.fyysika.ee) arendamine. Uudisteportaali (www.fyysika.ee/uudised) peatoimetaja Aile Tamme vedamisel moodustati tõlkijate-toimetajate meeskond (Stiina Kristal, Uku Pütsepp, Anu Mets), kes regulaarselt vahendab välisallikate teadusuudiseid. Lisaks sellele oleme tulemuslikult innustanud Eesti teadlaseid kirjutama oma teadustulemusi kajastavaid lühiartikleid, mis on samuti ilmunud uudisteportaaalis.

EFS on koostöös TÜ teaduskooliga korraldanud TÜ teaduslaagreid (www.teaduslaager.ee). 2011. a teaduslaager toimus kahes vahetuses, 11.–17. juulini ja 18.–25. juulini Kloogaranna noortelaagris. Esimeses vahetuses osales 120 5.–7. klassi õpilast, teises vahetuses osales 102 8.–9. klassi õpilast. Kummaski vahetuses olid õpilased jagatud viieks rühmaks, iga päeva sisustas üks teema. Teemadeks olid füüsika, keemia, materjaliteadus, bioloogia ja raketiteadus. Juhendajateks olid Tartu Ülikooli üliõpilased ja magistrandid, laagri ettevalmistamisel osalesid ka doktorandid ja teadurid.

EFS koos TÜ loodus- ja tehnoloogiateaduskonna ning TÜ teaduskooliga jätkas füüsika, keemia ja bioloogia õpikodade programmi, kus 7.–12. klasside nutikatele ja motiveeritud õpilastele pakutakse loodusteaduste (füüsika, keemia, bioloogia) eksperimendil põhinevat eriõpet, mis aitaks kompenseerida koolide võimaluste erinevusi õpilastele loodusteadusliku hariduse andmisel. Töös on neli programmi (kaks füüsikas, üks bioloogias ja üks keemias), iga programm vastab $8 \times 4 = 32$ tunnile. 2011. a

toimus 455 õpikoda, töötas (kahe õppeaasta peale kokku) 148 rühma, kus osales *ca* 1500 õpilast.

Füüsikaõpetajate osakond korraldas seminari 6.–8. jaanuarini Saal. Seal käsitleti uurimuslikku õpet põhikoolis ja gümnaasiumikursust „Füüsikalise looduskäsitluse alused“ ning tehti ühistööd gümnaasiumi viie kohustusliku kursuse tunnijaotuskava koostamiseks.

27.–29. juunini toimus Tallinnas TTÜ Küberneetika Instituudis ja KBFI füüsikaõpetajate 9. suvekool. Osales 42 õpetajat. Kuulati loenguid ja külastati laboreid, kõneldi kaosest ja kompleksüsteemidest, solitoniidest, fraktalitest, Eesti magnetlaborist, tuumamagnetresonantsist jm. Külastati Riigikogu ja kohtuti akadeemik Ene Ergmaga.

Tänu KBFI teadlaste tõsisele pealehakkamisele viibis 16 füüsikaõpetajat 22.–29. oktoobrini CERNis. Kuulati loenguid CERNi ajaloost, elementaarosakestest ja nende uurimistest, kiirendite ja detektorite hingeelust. Vaadati lineaarkiirendit, kust saab alguse LHC-sse suunduv prootonite voog, ja tsüklist ioonide kiirendit. Käidi CCC-s (detektorite kontrollkeskuste kontrollkeskuses), jõuti 10 meetri kaugusele LHC-st (80 meetri sügavusel). Töökeeleks oli inglise keel; üritus oli rahastatud HTMi poolt.

11.–12. novembrini toimus Tartumaal Voorel II EFS füüsikaõpetajate sügisseminar, mille peateemaks oli „Füüsika uus õppekava ja selle rakendamine“. Avaloengu pidas akadeemik Peeter Saari, tutvustati uusi õppematerjale, viidi läbi energia-teemaline näidistund. Toimus gümnaasiumi ainekava õppeprotsessi kirjelduse analüüs ja täiendamine, põhikooli füüsikaõpetajad osalesid õpikodade baasil toimunud praktilises töös. Füüsikaõpetajate võrgustiku tööd kajastab veebileht www.fuusika.ee/vorgustik.

Aasta lõpul valmis esimene EFSi poolt initsieeritud uuele õppekavale vastav gümnaasiumi füüsikaõpik – Indrek Peili „Mehaanika“. Õpik antakse välja nii traditsioonilisel paberkujul kui ka e-õpikuna. Kokkulepped on sõlmitud ka ülejäänud nelja uue õppekava gümnaasiumiõpiku väljaandmiseks.

Eesti Füüsika Selts on läbi aasta organiseerinud GLOBE Eesti tegevust (www.globe.ee), kasutades selleks Euroopa Sotsiaalfondi projekti vahendeid. Läbi on viidud GLOBE uurimistööde konkurs, 10.–13. märtsini toimus aastaegade ja bioomide koolitus Võrus, 27.–29. juunini toimus kaugseire suvekool Nelijärvel, 08.–11. augustini toimus GLOBE suvelaager Jõulumäel (osales 150 õpetajat ja õpilast), 23.–24. septembrini

toimus õpilaskonverents Paide Gümnaasiumis ning 02.–03. detsembrini toimus õpetajate seminar Tartus. Läbi aasta oleme ette valmistanud Eesti õhusaaste mõõtmise kampaaniat (www.fyysika.ee/ohusaaste), loodud on kaugseire põhitõdesid tutvustav veebileht (www.globe.ee/kaugseire). Eesti delegatsioon koosseisus Kaido Reivelt ja Ketlin Piir osales Ukrainas toimunud GLOBE Euroopa ja Euraasia aastakonverentsil, kus Kaido Reivelt valiti GLOBE Euroopa ja Euraasia juhatuse liikmeks. GLOBE programmi põhilisteks eestvedajateks on olnud Ketlin Piir, Karli Kütt ja Laura Altin, tihedam koostöö on 2011. aastal olnud Kilingi-Nõmme Gümnaasiumiga, Paide Gümnaasiumiga ja Kääpa Põhikooliga.

Noorfüüsikute osakonna eestvedamisel korraldati 27.–29. juunini Nelijärvel kolmiküritus, mis koosnes EFSi täppisteaduste suvekoolist, GLOBE kaugseire suvekoolist ja TÜ energiaakadeemiast. Osales ligi 200 õpilast ja noorteadlast erinevatest Eestimaa nurkadest. 28.–30. oktoobri toimus Voore puhkekeskuses EFSi täppisteaduste sügiskool, kus osales 92 tudengit, teadlast ja õppejõudu. Kuulati üle 30 tunni loenguid ja seminare. Töö toimus paralleelselt kahes auditooriumis. Teemadest käsitleti biofüüsikat, keskkonnafüüsikat, kosmose- ja nanotehnoloogiasid, psühholoogiat ja arutleti füüsikahariduse teemadel. Sügiskoolis sai kokku ka „Hea õppejõu klubi“ ning Eesti Tudengisatelliidi rahvusvaheline meeskond. Organisaatoriteks olid Kaido Reivelt ja Ketlin Piir.

2011. a astus EFSi 4 uut liiget. EFS kuulub jätkuvalt Euroopa Füüsikaühingusse.

EFSi ettevõtmisi toetasid aastal 2011 TÜ Füüsika Instituut, Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut, Eesti Teaduste Akadeemia, Haridus- ja Teadusministeerium, Tiigrihüppe SA, Hasartmängumaksu nõukogu, Tartu Ülikool, Tartu Observatoorium ja Eesti Keele Instituut. Täname kõiki toetajaid ja loodame koostöö jätkumist.

Eesti Füüsika Seltsi juhatuse liikmed:

Kaido Reivelt Silver Lätt Raivo Stern Taavi Adamberg

Tartus,
7. veebruaril 2012. a

AASTA PILT 2011



27.-29. juunini 2011 toimus Nelijärve Puhkekeskuses kolmiküritus, kus said kokku Täppisteaduste suvekool, TÜ Energiaakadeemia ja GLOBE kaugseire suvekool. Osa võttis üle kaheksa õpilase, tudengi, õpetaja ja teadlase. Pildil on hetk ürituse lõpetamiselt.

EFS LAIENDATUD JUHATUS 2011. AASTAL

Kaido Reivelt
esimees

Tartu Ülikool, Riia 142, 51014 Tartu
Tel./faks: +372 737 4623 / 738 3033
E-mail: kaidor@fi.tartu.ee

Raivo Stern
aseesimees

Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut,
Akadeemia tee 23, 12618 Tallinn
Tel./faks: +372 639 8309 / 639 8393
E-mail: stern@kbfii.ee

Silver Lätt
aseesimees

Tartu Ülikool, Riia 142, 51014 Tartu
E-mail: silver.latt@ut.ee

- Taavi Adamberg** Tartu Ülikool, Riia 142, 51014 Tartu
Tel./faks: +372 5668 0032 / 738 3033
E-mail: taavi@fysika.ee
- Raavo Josepson** Tallinna Tehnikaülikool, Ehitajate tee 5,
19086, Tallinn
Tel./faks: +372 620 3210 / 620 3367
E-mail: raavo.josepson@ttu.ee
- Helle Kaasik** Tartu Ülikool, Riia 142, 51014 Tartu
Tel./faks: +372 737 4707 / 738 3033
E-mail: helle.kaasik@ut.ee
- Madis Kiisk** Tartu Ülikool, Riia 142, 51014 Tartu
E-mail: madis.kiisk@ut.ee
- Katrin Laas** Tallinna Ülikool, Narva mnt 25, 10120 Tallinn
Tel./faks: +372 6409 408 / 6409 418
E-mail: klaas.82@hotmail.ee
- Anu Reinart** Tartu Observatoorium, Tõravere, 61602 Tartumaa
Tel./faks: +372 741 0265 / 741 0205
E-mail: reinart@aai.ee
- Aile Tamm** Tartu Ülikool, Riia 142, 51014 Tartu
E-mail: aile.tamm@ut.ee
- Margus Saal** Tartu Ülikool, Riia 142, 51014 Tartu
E-mail: margus@fi.tartu.ee
- Jaak Jõgi** Lääte Ühisgümnaasium, Lääte sjsk, 60502 Lääte
Tel./faks: +372 733 4180 / 733 4184
E-mail: jaak.jogi@gmail.com

EFS UUED LIIKMED

Mihkel Heidelberg
Ando Aasa
Jaan Paaver
Erkki Tempel

TÄPPISTEADUSTE SUVEKOOL 2011

Noorfüüsikute osakonna eestvedamisel korraldati 27.–29. juunini Neli-järvel kolmiküritus, mis koosnes EFSi täppisteaduste suvekoolist, GLOBE kaugseire suvekoolist ja TÜ energiaakadeemiast. Osales ligi 200 õpilast ja noorteadlast.

LOENGUKAVA

Esmaspäev, 27. juuni

13:45 – 14:00	Avasõnad
14:00 – 15:30	Erik Puura (TÜ TI). Eesti energiavalikud
15:30 – 18:30	Karl Kruusamäe (TÜ TI). Robotid asendamas inimkonda
18:30 – 19:15	Taavi Adamberg (TÜ). Eesti Füüsika Seltsi tegemistest

Teisipäev, 28. juuni

9:30 – 11:00	Jaan Praks (Aalto Ülikool). Planeetide kaugseire
11:00 – 12:30	Kristjan Kannike (KBFI). Kiirendid ja tumeaine
12:30 – 13:15	Raivo Hein. Taevavaatlused ja kosmoseturism
14:15 – 15:00	Martin Järvekülg (TÜ FI). Materjalide mikrodisain sool-geel meetodil
15:00 – 16:00	Leo Võhandu (TTÜ). Kuidas andmetele ülalt alla vaadata
17:45 – 19:15	Erkki Truve (TTÜ). Geneetika ja füüsika

Kolmapäev, 29. juuni

9:30 – 11:00	Roland Pihlakas (TÜ). Sipelgad, matemaatika, lennuliiklus
11:00 – 12:00	Tanel Ainla. Ränioru salajane ajalugu

TÄPPISTEADUSTE SÜGISKOOL 2011

28.–30. oktoobrini toimus Voore puhkekeskuses EFSi täppisteaduste sügiskool, kus osales 92 tudengit, teadlast ja õppejõudu. Kuulati üle 30 tunni loenguid ja seminare.

LOENGIKAVA

Reede, 28. oktoober

- | | |
|---------------|---|
| 13.45 – 14.00 | Avasõnad |
| 14.00 – 14.45 | Aarne Männik (TÜ). Atmosfäärifüüsika Eesti Keskonnaobservatooriumis |
| 14.45 – 16.15 | Endla Lõhkivi (TÜ). Teadus kultuuris ja kultuuriteaduses: Eesti füüsika kui töökeskkonna kultuuri uuringust 2005–2008 |
| 16.15 – 17.00 | Vladimir Hižnjakov (TÜ FI). Mesosüsteemid: heeliumitilkade spektraalsed omadused |
| 17.30 – 19.15 | Agu Laisk (TÜ). Elu Mõte |

Laupäev, 29. oktoober

- | | |
|---------------|--|
| 9.30 – 10.15 | Mart Noorma (TÜ). ESTCube |
| 10.15 – 11.00 | EFS tegemistest |
| 11.00 – 12.00 | Andi Hektor (CERN). CERN: Higgs, tumeaine, neutriinod... |
| 13.00 – 14.30 | Maarja Kruusmaa (TTÜ). Biorobootikast |
| 14.30 – 15.30 | Dominique Unruh (TÜ). Quantum cryptography |
| 15.30 – 16.15 | Friedrich Kaasik (TÜ). Elektroaktiivne komposiitmaterjal |
| 16.45 – 17.45 | Meelis Sildoja (Aalto University). Optilisest metroloogiast |
| 17.45 – 19.15 | Harry Lehto (University of Turku). Astrobiology: Topics and Research |
| 20.15 – 22.00 | Tudengite ja õppejõudude kohtumine |

Pühapäev, 30. oktoober

- | | |
|---------------|--|
| 9.30 – 11.00 | Enn Lust (TÜ). Kõrgtehnoloogilised materjalid jätkusuutlikuks arenguks |
| 11.30 – 13.00 | Jaan Kalda (CENS). Teaduse tippkeskus CENS: kompleksüsteemidest meis ja meie ümber |

EFS FÜÜSIKAÕPETAJATE I SEMINAR

Füüsikaõpetajate võrgustiku aktiiv kogunes 6.–8. jaanuarini Saka mõisas. Esimese seminari teema oli võrgustiku algatamine.

KAVA

Neljapäev, 6. jaanuar

14.00 – 14.30	Enn Pärtel. Sissejuhatus „Mis on uurimuslik õpe“
14.30 – 15.15	Enn Pärtel. Näidistund „Soojusülekanne“
15.30 – 16.15	Henn Voolaid. Näidistund „Heli ja selle omadused“
16.30 – 17.15	Rühmatöö „Mis on uurimuslik õpe näidistundide põhjal“
17.15 – 19.00	Rühmade ettekanded/ arutelud
20.00	Arutelud, seltskondlik tegevus

Reede, 7. jaanuar

9.30 – 10.15	Kalev Tarkpea. Näidistund I. „Printsiibid füüsikas – kõige üldisemad tõdemused looduse kohta. Võrdlus aksiomidega matemaatikas“
10.30 – 11.15	Jaan Paaver. Näidistund II. „Printsiibid füüsikas – kõige üldisemad tõdemused looduse kohta. Võrdlus aksiomidega matemaatikas“
11.15 – 13.00	Rühmatöö „Gümnaasiumi füüsika I kursus – Füüsilise looduskäsitluse alused“
15.00 – 15.45	Jaak Jõgi. Loeng „Mõõtmine ja mõõtemääramatus“
16.00 – 19.00	Praktiline töö „Mõõtmine ja mõõtemääramatus“

Laupäev, 8. jaanuar

9.30 – 10.30	Teise päeva rühmatööde kokkuvõtete ettekanded
10.45 – 12.30	Gümnaasiumi ainekava kursuste tunnijaotuskava – rühmatöö
12.30 – 13.00	Rühmatööde tulemused

EFS FÜÜSIKAÕPETAJATE SUVEKOOL 2011

FÜÜSIKAALASED TEADUSUURINGUD EESTIS

27.–29. juunini toimus Tallinnas KBFIs ja TTÜ Küberneetika Instituudis füüsikaõpetajate 9. suvekool, milles osales 42 õpetajat.

KAVA

Esmaspäev, 27. juuni

- | | |
|---------------|---|
| 11.00 – 12.15 | Priit Sarv. Mikro-, meso- ja makropoorsed materjalid ja katalüüs |
| 12.15 – 13.30 | Juhan Subbi. Tahkel oksiidil põhineva kütuseelemendi arendamisest Eestis |
| 14.15 – 15.30 | Raivo Stern. Kvant-faasisiirded ja Eesti magnetlabor |
| 15.30 – 16.45 | Toomas Rõõm. Mida näeb kauge infrapunaspetskoopiaga |
| 16.45 – 17.45 | Ivo Heinmaa. Tuuma magnetresonants vedelikes ja tahkistes, mis ja kuidas? |
| 17.45 – 19.00 | Georg Liidja. Inimesed kiirgusväljades |

Tutvumine KBFI õpperuumidega ja laboratooriumidega.

Teisipäev, 28. juuni

- | | |
|---------------|---|
| 9.00 – 10.15 | Jüri Engelbrecht. Kaos ja kompleksüsteemid |
| 10.15 – 11.30 | Andrus Salupere. Solitonid – kaunid ja mitmenäolised mittelineaarsed lained |
| 11.30 – 12.45 | Jaan Kalda. Fraktaalsus looduses ja ühiskonnas |
| 12.45 – 14.00 | Marko Vendelin. Kuidas arendada füüsikat ja tervet mõistust südameraku uuringutel |
| 14.00 – 16.00 | Ringkäik TTÜ õppehoones, lõuna |
| 16.00 – 17.15 | Matti Laan. Spektrid ja energaetika |

Kolmapäev, 29. juuni

Kohtumine akadeemik Ene Ergmaga

EFS FÜÜSIKAÕPETAJATE II SÜGISSEMINAR

FÜÜSIKA UUS ÕPPEKAVA JA SELLE RAKENDAMINE

11.-12. novembrini toimus Tartumaal Voorel II EFS füüsikaõpetajate sügisseminar, milles osales üle 100 inimese.

KAVA

Reede, 11. november

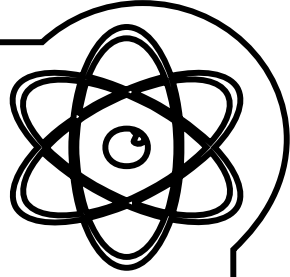
12.00 – 12.05	Riina Murulaid. Avasõnad
12.05 – 13.00	Peeter Saari. Kuidas selgub füüsikas tõde
13.00 – 14.00	Siim Oks. Eesti füüsikaõpetajate retk CERNi
15.00 – 16.15	Eveli Raudla. Näidistund: Energia muundurid
16.15 – 19.00	Kalev Tarkpea, Riina Murulaid. Gümnaasiumi füüsika õppeprotsess – ideed, kogemused, rühmatöö gümnaasiumi õpetajatele Jaan Paaver. Praktilised tööd ja õpikodade kogemus, praktiline rühmatöö põhikooli õpetajatele
20.00	Jututoad, vestlusringid jms

Laupäev, 12. november

9.15 – 10.45	Uued õpikud ja õppematerjalid: <ul style="list-style-type: none"> - Jaak Kikas. David Halliday, Robert Resnick ja Jearl Walker, „Füüsika põhikursus“ - Indrek Peil. „Mehaanika“ - Enn Pärteli, Reemo Voltri õppematerjalid - Kaido Reivelt: ilmumas on...
10.45 – 12.15	Rühmatööde kokkuvõtted
12.15 – 13.00	Riina Murulaid, Jaan Paaver, Kaido Reivelt. Info – uue õppekava kursused (Innove), võrgustiku kodu-lehekülg, suvekool

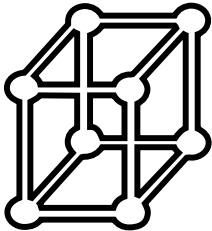
RAAMATUS KASUTATUD LÜHENDID

CERN	Euroopa tuumauuringute keskus (<i>Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire</i>)
EML	Eesti Masinatööstuse Liit
EMÜ	Eesti Maaülikool
ETA	Eesti Teaduste Akadeemia
ETF	Eesti Teadusfond
ETIS	Eesti Teadusinfosüsteem
EÕL	Eesti Õpilasliit
HTM	Haridus- ja Teadusministeerium
IAEA	Rahvusvaheline Aatomienergiaagentuur (<i>International Atomic Energy Agency</i>)
KBFI	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut
KTH	Rootsi Kuninglik Tehnoloogiainstituut
NUST	Norra Teadus- ja Tehnoloogiaülikool
RTU	Riia Tehnikaülikool
TLÜ	Tallinna Ülikool
TO	Tartu Observatoorium
TUT	Tampere Tehnoloogiaülikool
TTÜ	Tallinna Tehnikaülikool
TTÜ AM	TTÜ elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituut
TTÜ EEI	TTÜ elektroenergeetika instituut
TTÜ FI	TTÜ füüsikainstituut
TTÜ KI	TTÜ keemiainstituut
TTÜ Kübi	TTÜ Küberneetika Instituut
TTÜ MHI	TTÜ mehhanotroonika instituut
TTÜ MTI	TTÜ materjalitehnika instituut
TTÜ STI	TTÜ soojustehnika instituut
TRÜ	Tartu Riiklik Ülikool (1940–1941 ning 1944–1989)
TÜ	Tartu Ülikool
TÜ FI	TÜ Füüsika Instituut
TÜ KFK	TÜ LOTE koolifüüsika keskus
TÜ KI	TÜ keemia instituut
TÜ LOTE	TÜ loodus- ja tehnoloogiateaduskond
TÜ MRI	TÜ molekulaar- ja rakubioloogia instituut
TÜ TI	TÜ tehnoloogiasinstituut
TÜ ÖMI	TÜ ökoloogia ja maateaduste instituut



FÜÜSIKAKROONIKA

2011



I. TÖÖKORRALDUS

- Algas Tartu Observatooriumi peahoone ümber- ja juurdeehitus. Toimub vana osa põhjalik rekonstrueerimine ning senisele umbes 2000 ruutmeetritele lisandub veel 720 ruutmeetrit. Maksma läheb see ilma käibemaksuta 3 353 327 eurot. Töid teostab YIT Ehitus, maja anti ehitajale üle 8. augustil, lepingu järgi peab see valmima 1. augustiks 2012. Observatooriumi peahoones Tõraveres ametis olnud inimesed asusid ajutistesse tööruumidesse Tõraveres (teleskoopide tornid, nn kombinaathoone 1. korrus, OÜ Interspectrumi ruumid) ja Tartus (Tartu Ülikooli füüsikamaja, Tähe 4), paljud töötavad kodus.
- Detsembris jõudis Tartu Teaduspargis lõpule NanoLabi ehitus. EASi toel valminud hoones on umbes 600 ruutmeetrit rakenduslikuks uurimistööks ja tootearenduseks mõeldud laboratooriumipinda, millest umbes poole moodustab spetsiaalne tolmuvaba keskkond materjalitehnoloogiaga seotud uurimistöödeks. Kompleks valmis TÜ FI, Tartu Teaduspargi ja Eesti Nanotehnoloogiatega Arenduskeskuse (NanoTAK) initsiatiivil ja koostöös ning on eeskätt mõeldud ettevõttele suunatud uurimistöö läbiviimiseks. Lähiaastatel viiakse NanoLabis ellu NanoTAKi uurimisprogrammi, aga tulevikus nihkub rõhuasetus järjest enam ettevõttele poolt läbiviidavatele uurimis- ja arendustöödele.
- TÜ Füüsika Instituudile projekteeritakse uut maja Tartusse Maarjamõisa teaduslinnakusse Viljandi mnt 42. Plaanis on ehitada uus kaasaegne hoone, mis kataks ära kogu TÜ füüsika-alase teadus- ja õppetööga seotud vajadused. Ehitust on kavas alustada 2012. a.
- 2011. a jooksul valiti TÜ Füüsika Instituudis teoreetilise füüsika vanemteaduriteks Margus Saal ja Rein Saar, keskkonnanfüüsika vanemteaduriks Hannes Tammet, optika ja spektroskoopia vanemteaduriteks Valter Kiisk ja Yuriy Orlovskiy, optika ja plasmoonika vanemteaduriks Leonid Dolgov, optika ja gaaslahenduse vanemteaduriks Peeter Paris, plasmatehnoloogia vanemteaduriks Indrek Jõgi, atmosfäärifüüsika vanemteaduriks Mikhail Sofiev, tahkisefüüsika vanemteaduriks Vitali Nagirnõi, biofüüsika vanemteaduriks Kõu Timpmann, materjaliteaduse vanemteaduriteks Tanel Tätte, Raivo Jaanis, Eduard Feldbach, Tanel Käämbre, Rünno Lõhmus ja Vambola Kisand, teoreetilise füüsika teaduriks Aleksandr Pištšev, väljateooria füüsika teaduriks Küllike Rägo, tahkiseteooria teaduriks Niina Voropajeva, tahkisefüüsika teaduriteks Vladimir Babin ja Sergey Omelkov,

materjaliteaduse teaduriteks Aile Tamm, Margus Marandi, Sergei Vlassov, Martin Järvekülg, Margus Kodu, Veera Krasnenko ja Arne Kasikov, biofüüsika teaduriks Liina Kangur, optika ja spektroskoopia teaduriteks Aleksandr Lisovski, Eduard Aleksanyan ja Aleksandr Popov, atmosfäärifüüsika teaduriks Erko Jakobson, aerosoolifüüsika teaduriteks Sander Mirme ja Janek Uin, meditsiinifüüsika lektoriks Jüri Vedru, meditsiinifüüsika assistendiks Simon Vigonski ning arvu-
titehnika assistendiks Margus Rosin. Anti soovitus valida materjali-
teaduse juhtivteaduriks Kaupo Kukli (valiti TÜ nõukogus 01.07.2011),
nanomaterjalide optika ja spektroskoopia juhtivteaduriks Ilmo Sildos
(valiti TÜ senatis 13.01.2012), astrofüüsika professoriks Peeter Tenjes
(valiti TÜ senatis 13.01.2012), kõrgete energiatega füüsika professoriks
Stefan Groote või Martti Raidal (valiti TÜ senatis 13.01.2012), emerit-
dotsendiks Ando Ots (nimetati TÜ senatis 13.01.2012).

- 2012. aasta jaanuarist rakendub ametlikult Tartu Ülikooli uus kaas-
ajastatud juhtimismudel, mis hakkab ülikooli tegevusse kaasama ka
väliseid partnereid. Jaanuaris alustavad ülikooli uute juhtorganite-
na tööd nii muudetud funktsioonidega nõukogu kui ka senat. Nõu-
kogu koosseisu kuulub 11 liiget: TÜ eelmise nõukogu poolt esitatud
Toomas Asser, Toivo Maimets, Peeter Saari, Jüri Sepp ja Paul Varul,
Eesti Teaduste Akadeemia esitatud Kari Olavi Raivio ning haridus- ja
teadusministeeriumi poolt esitatud Kaja Tael, Toomas Kiho, Kersti
Kaljulaid, Vahur Kraft ja Aku Sorainen. Nõukogu koosseisu kinnitas
viieks aastaks Vabariigi Valitsus oma 22. detsembri istungil.
- 21. okt valiti Tartu Ülikooli 21-liikmeline senat. Senat on ülikooli aka-
deemiline otsustuskogu, kes vastutab ülikooli õppe- ning teadus- ja
arendustegevuse eest ning tagab selle kõrge kvaliteedi. Muuhulgas
võtab senat vastu ülikooli põhikirja ja esitab selle nõukogule kinni-
tamiseks. Senati koosseisu kuuluvad rektor senati esimehena ning 21
liiget, kellest 16 liiget valisid ülikooli õppejõud ja teadustöötajad ning
viis üliõpilaste esindajat valis TÜ üliõpilasesindus 16. oktoobril. *Rea-
lia et naturalia* valdkonnast valiti senati liikmeteks:
 - Leho Ainsaar, ökoloogia ja maateaduste instituudi direktor
 - Maia Kivisaar, mikroobigeneetika professor, molekulaar- ja raku-
bioloogia instituut
 - Enn Lust, füüsikalise keemia professor, keemia instituudi direktor
 - Jaak Vilo, bioinformaatika professor, arvutiteaduse instituudi juha-
taja.

Loodusteaduste üliõpilastest valiti senatisse LOTE doktorant Friedrich Kaasik ja matemaatika- informaatikateaduskonna bakalaureuseastme üliõpilane Erik Raudsepp.

- 7. dets valiti Eesti Teaduste Akadeemia akadeemikuks täppisteaduste alal KBFI vanemteadur Martti Raidal ja akadeemikuks materjalitehnika alal TTÜ metallide tehnoloogia professor Jakob Kübarsepp.
- TÜ Eesti Mereinstituudi vanemteadur Henn Ojaveer juhtis kuni 2010. aastani ülemaailmse mereuuringute programmi „Census of Marine Life“ Euroopa osa. Nüüd jätkub programm aastani 2020 ja juhtkomiteesse arvati ka Ojaveer, kes on seal üks kolmest Euroopa esindajast.

II. VÄITEKIRJADE KAITSMINE

DOKTORITÖÖD

Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi nõukogu

- 3. juunil kaitses **Elmo Tempel** doktoritöö „Tracing galaxy evolution by their present-day luminosity function“ (Galaktikate evolutsiooni mõistmine nende heledusfunktsiooni abil) PhD kraadi saamiseks astrofüüsika erialal. Juhendajad dr Enn Saar (TO) ja dr Peeter Tenjes (TÜ FI). Oponendid prof emer Mauri Valtonen (Tuorla Observatoorium, Turu Ülikool, Soome) ja DSc Tõnu Viik (TO).
- 22. augustil kaitses **Janek Uin** doktoritöö „Electrical separation for generating standard aerosols in a wide particle size range“ (Elektriline separeerimine standardaerosoolide genereerimiseks osakeste suuruse laias vahemikus) PhD kraadi saamiseks rakendusfüüsika erialal. Juhendajad dr Eduard Tamm (TÜ) ja dr Aadu Mirme (TÜ). Oponendid prof Jyrki Mäkelä (Tampere University of Technology, Soome) ja dr Veljo Kimmel (EMÜ).
- 22. augustil kaitses **Sander Mirme** doktoritöö „Development of Nanometer Aerosol Measurement Technology“ (Nanomeeter-aerosooli mõõtmistehnoloogia arendamine) PhD kraadi saamiseks keskkonnanäfüüsika erialal. Juhendaja dr Aadu Mirme (TÜ FI). Oponendid prof Jorma Keskinen (Tampere University of Technology, Soome) ja dr Kalju Eerme (TO).
- 23. augustil kaitses **Svetlana Ganina** doktoritöö „Hajusandmetega

ülesanded kui üks võimalus füüsikaõppe efektiivsuse tõstmiseks“ (Dispersed Data Problems as an Option to Increase the Effectiveness of Physics Studies) PhD kraadi saamiseks füüsikahariduse erialal. Juhendaja dots Henn Voolaid (TÜ FI). Oponendid prof Rein-Karl Loide (TTÜ) ja prof Andris Broks (Läti Ülikool, Riia).

- 24. augustil kaitses **Joel Kuusk** doktoritöö „Measurement of top-of-canopy spectral reflectance of forests for developing vegetation radiative transfer models“ (Metsade atmosfäärialuse spektraalse peegelduskoefitsiendi mõõtmine taimkatte kiirguslevimudelite arendamiseks) PhD kraadi saamiseks rakendusfüüsika erialal. Juhendajad DSc Andres Kuusk (TO) ja dr Mart Noorma (TÜ). Oponendid dr Jouni Peltoniemi (Finnish Geodetic Institute, Soome) ja dr Tarmo Kõuts (TTÜ Meresüsteemide Instituut).
- 25. augustil kaitses **Raul Rammula** doktoritöö „Atomic layer deposition of HfO₂ - nucleation, growth and structure development of thin films“ (Hafniumdioksiidi aatomkihtsadestamine - nukleatsioon, kasv, ja struktuuri muutused kiledes) PhD kraadi saamiseks rakendusfüüsika erialal. Juhendajad prof Jaan Aarik (TÜ FI) ja prof Väino Sammelselg (TÜ FI). Oponendid prof Marek Godlewski (Poola Teaduste Akadeemia Füüsika Instituut) ja prof Juris Purans (Läti Ülikooli Tahkisefüüsika Instituut, Riia).
- 26. augustil kaitses **Anti Hirv** doktoritöö „Estimation of time delays from light curves of gravitationally lensed quasars“ (Gravitatsiooniläätsest põhjustatud kvasarite mitmikujutiste vaheliste ajanihete mõõtmine) PhD kraadi saamiseks astrofüüsika erialal. Juhendaja dr Jaan Pelt (TO). Oponendid prof Luitje Vincent Ewoud Koopmans (Kapteyn Astronomical Institute, Groningen, Holland) ja prof Lutz Wisotzki (Leibniz-Institut für Astrophysik (AIP), Potsdam, Saksamaa).
- 31. augustil kaitses **Sergei Nakonetšnoi** doktoritöö „Исследование электронно-дырочных и интерстициал-вакансионных процессов в монокристаллах MgO и LiF методами термоактивационной спектроскопии“ (Elektron-auk- ja interstitsiaal-vakantsprotsesside uurimine MgO ja LiF monokristallides termoaktivatsioon-spektroskoopia meetoditega; Investigation of the electron-hole and interstitial-vacancy process in MgO and LiF single crystals using thermoactivation spectroscopy methods) PhD kraadi saamiseks tahkisefüüsika erialal. Juhendajad dr Tiit Kärner (TÜ FI) ja prof Aleksandr Luštšik (TÜ FI). Oponent dr Anatoli Popov (Läti Ülikool, Riia).

- 15. novembril kaitses **Niina Voropajeva** doktoritöö „Elementary excitations near the boundary of a strongly correlated crystal“ (Elementaarergastused tugevalt korreleeritud kristalli pinna lähedal) PhD kraadi saamiseks füüsika erialal. Juhendaja DSc Aleksei Šerman (TÜ FI). Oponendid DSc Andrei Mikheenkov (Institute for High Pressure Physics, Russian Academy of Sciences, Troitsk ja Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudnõi, Venemaa) ja dots Mihhail Klopov (TTÜ FI).

Tartu Ülikooli materjaliteaduse doktorinõukogu

- 4. juulil kaitses **Martin Järvekülg** doktoritöö „Tubular microstructures by Hf, Zr and Ti butoxide gel sheet rolling“ (Mikrorull-struktuurid geel-kile rullumise teel Zr, Ti ja Hf butoksiidist lähtudes) PhD kraadi saamiseks materjaliteaduse erialal. Juhendajad dr Ants Lõhmus (TÜ FI) ja dots Uno Mäeorg (TÜ KI). Oponendid dr Marco Natali (Institute of Inorganic Chemistry and Surface Science ICIS-CNR, Padova, Itaalia) ja dr Mihkel Koel (TTÜ KI).
- 4. juulil kaitses **Sergei Vlassov** doktoritöö „Investigation of nano-scale interactions and mechanical properties of nanostructures using quartz tuning fork based real-time measurements“ (Nanostruktuuride uuringud nanoskaalas vastastikmõjude ja mehaanilisete omaduste väljaselgitamiseks kasutades helihargi tüüpi kvartsresonaatorit) PhD kraadi saamiseks materjaliteaduse erialal. Juhendaja dr Rünno Lõhmus (TÜ FI). Oponendid dr Ion Marius Sivebæk (Technical University of Denmark) ja dr Valdek Mikli (TTÜ).
- 7. juulil kaitses **Margus Kodu** doktoritöö „Pulsed laser deposition of magnesium oxide and barium ternary oxides for plasma display protective layers“ (Magneesiumoksiidi ja baariumi kolmikoksiidide õhukeste kilede impulss-lasersadestamine plasmakuvarite kaitsekihtide rakenduseks) PhD kraadi saamiseks materjaliteaduse erialal. Juhendaja dr Raivo Jaaniso (TÜ FI). Oponendid dr Sanjay K. Ram (Universidade Nova de Lisboa, Portugal) ja dr Sergei Bereznev (TTÜ).

Tartu Ülikooli Keemia Instituudi nõukogu

- 13. mail kaitses **Margus Marandi** doktoritöö „Electroformation of Polypyrrole Films: *In-situ* AFM and STM Study“ (Polüüpürroolkilede

elektroformeerumine: *in-situ* AFM ja STM uuringud) PhD kraadi saamiseks anorgaanilise keemia erialal. Juhendajad prof Väino Sammel (TÜ KI) ja prof Jüri Tamm (TÜ KI). Oponent prof Mikhael Levi (Bar-Ilan Ülikool, Iisrael).

- 29. augustil kaitses **Dana Martin** doktoritöö „The QSAR/QSPR approach for predicting the properties of carbon nanostructures“ (QSPR/QSAR lähenemine süsiniknanoosakeste omaduste ennustamiseks) PhD kraadi saamiseks molekulaartehnoloogia erialal. Juhendaja prof Mati Karelson (TÜ KI). Oponent dr Mart Saarma (Helsingi Ülikool, Soome).
- 20. detsembril kaitses **Heisi Kurig** doktoritöö „Electrical double-layer capacitors based on ionic liquids as electrolytes“ (Ioonsetel vedelikel baseeruvad elektrilise kaksikkihi kondensaatorid) PhD kraadi saamiseks keemia erialal. Juhendajad prof Enn Lust (TÜ KI) ja dr Alar Jänes (TÜ KI). Oponent prof François Béguin (University of Orléans, Prantsusmaa).

Tartu Ülikooli keskkonnatehnoloogia õppekavade teaduskraadi andev ühisnõukogu

- 1. aprillil kaitses **Siiri Velling** doktoritöö „Microbial BOD biosensor for wastewater analysis“ (Mikroorganismidel põhinev BHT biosensor reovee analüüsimiseks) PhD kraadi saamiseks keskkonnatehnoloogia erialal. Juhendaja prof Toomas Tenno (TÜ KI). Oponent prof Bo Mattiasson (Lundi Ülikool, Rootsi).
- 25. augustil kaitses **Riina Lepik** doktoritöö „Biodegradability of Phenolic Compounds as Single and Mixed Substrates by Activated Sludge“ (Fenoolsete ühendite biodegradeeritavus üksik- ja segasubstraatidena aktiivmuda toimel) PhD kraadi saamiseks keskkonnatehnoloogia erialal. Juhendaja prof Toomas Tenno (TÜ KI). Oponent prof Bo Mattiasson (Lundi Ülikool, Rootsi).
- 31. augustil kaitses **Liis Marmor** doktoritöö teemal „Ecology and bioindicative value of epiphytic lichens in relation to air pollution and forest continuity“ (Epifüütsete samblike ökoloogia ja bioindikatsiooniline väärtus seoses õhusaaste ja metsa järjepidevusega) PhD kraadi saamiseks keskkonnatehnoloogia erialal. Juhendaja dots Tiina Randlane (TÜ ÖMI). Oponent prof Pier Luigi Nimis (Trieste Ülikool, Itaalia).

Tallinna Tehnikaülikooli doktoritööde kaitsmiskomisjonid

- 17. märtsil kaitses **Eduard Latõšov** doktoritöö teemal „Soojuse ja elektri koostootmise analüüsi mudel“ (Model for the Analysis of Combined Heat and Power Production) PhD kraadi saamiseks soojusenergeetika erialal. Juhendaja prof Andres Siirde (TTÜ, STI). Oponendid dots Rolf Ulseth (NUST, Norra), prof Juhan Valtin (TTÜ, EEI), dots Villu Vares (TTÜ, STI).
- 28. märtsil kaitses **Atanas Katerski** doktoritöö „Chemical Composition of Sprayed Copper Indium Disulfide Films for Nanostructured Solar Cells“ (Pihustussadestatud vaskindiumdisulfiid kilede keemiline koostis ja rakendus nanostruktuursetes päikesepatareides). Juhendaja juhtivteadur Malle Krunks (TTÜ). Oponendid prof Rositza Yakimova (Linköpingi Ülikool, Rootsi) ja prof Väino Sammelselg (TÜ).
- 30. märtsil kaitses **Kristi Timmo** doktoritöö „Formation of Properties of CuInSe_2 and $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ Monograin Powders Synthesized in Molten KI“ (Kaaliumjodiidsulandaja keskkonnas kasvatatud monoterapulbrite CuInSe_2 ja $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ omaduste kujundamine). Juhendaja juhtivteadur Mare Altosaar (TTÜ). Oponendid dr Charlotte Platzer-Björkman (Uppsala Ülikool, Rootsi) ja juhtivteadur Kaupo Kukli (TÜ).
- 27. aprillil kaitses **Kert Tamm** doktoritöö „Wave Propagation and Interaction in Mindlin-Type Microstructured Solids: Numerical Simulation“ (Lainelevi ja interaktsiooni numbriline modelleerimine Mindlini tüüpi mikrostruktuursetes tahkistes). Juhendaja prof Andrus Salupere (TTÜ). Oponendid dr Jiří Plešek (Tšehhi Vabariigi TA Termomehaanika Instituut, Praha, Tšehhi Vabariik) ja dr Alexey V. Porubov (Venemaa TA Mehaanikaprobleemide Instituut, Sankt-Peterburg, Venemaa).
- 10. juunil kaitses **Oliver Järvik** doktoritöö “Intensification of Activated Sludge Process – the Impact of Ozone and Activated Carbon” (Aktiivmudaprotsessi intensiivistamine – osooni ja aktiivsöe mõju). Juhendaja dots Inna Kamenev (TTÜ). Oponendid dr Arto Laari (Lappeenranta Tehnoloogiaülikool, Soome), dr Walter Z. Tang (Florida Rahvusvaheline Ülikool, USA) ja dr Anne Menert (TTÜ).
- 13. juunil kaitses **Andrei Surzhenkov** doktoritöö teemal „Terase pinnale duplekstöötlus“ (Duplex Treatment of Steel Surface) PhD kraadi saamiseks materjalitehnika erialal. Juhendaja prof Priit Kulu (TTÜ,

MTI). Oponendid prof Petri Vuoristo (TUT, Soome) ja prof Jakob Kübarsepp (TTÜ, MTI).

- 15. juunil kaitses **Steffen Dahms** (Saksamaa, Jena) doktoritöö teemal „Erinevate materjalide difusioonkeevitus“ (Diffusion Welding of Different Materials) PhD kraadi saamiseks materjalitehnika erialal. Juhendajad prof Renno Veinthal (TTÜ, MTI) ja Günter Köhler (Jena Institute für Fügetechnik und Werkstoffprüfung). Oponendid dr Ilmars Zalite (RTU, Läti), prof Rein Laaneots (TTÜ, MHI) ja dr Aleksei Hõbemägi (EML).
- 16. juunil kaitses **Jürgen Riim** doktoritöö teemal „Pindepaksusetalonnide kalibreerimismeetodid“ (Calibration Methods of Coating Thickness Standards) PhD kraadi saamiseks mehhatroonika erialal. Juhendaja prof Rein Laaneots (TTÜ, MHI). Oponendid prof Jānis Rudzītis (RTU, Läti) ja prof Toomas Kübarsepp (TTÜ, MHI).
- 22. juunil kaitses **Ingrid Sumeri** doktoritöö „The Study of Probiotic Bacteria in Human Gastrointestinal Tract Simulator“ (Probiootilised bakterid inimese seedetrakti simulaatoris). Juhendaja prof Toomas Paalme (TTÜ). Oponendid prof Marika Mikelsaar (TÜ) ja dr Stefan Roos (Rootsi Põllumajandusteaduste Ülikool, Uppsala).
- 26. septembril kaitses **Triinu Poltimäe** doktoritöö „Thermal analysis of crystallization behaviour of polyethylene copolymers and their blends“ (Polüetüleenide kopolümeeride ja nende segude kristalliseerumise termiline analüüs). Juhendaja prof Andres Krumme (TTÜ), kaasjuhendaja dr Elvira Tarasova (TTÜ). Oponendid prof Vincent B.F. Mathot (SciTe B.V., Holland; Leuveni Katoliiklik Ülikool, Belgia) ja dr Ants Lõhmus (TÜ).
- 25. novembril kaitses **Mariliis Sihtmäe** doktoritöö „(Eco)Toxicological Information on REACH-Relevant Chemicals: Contribution of Alternative Methods to in vivo Approaches“ (Alternatiivsed läheneemisviisid in vivo meetoditele (öko)toksikoloogilise teabe kogumisel REACH-kemikaalide kohta). Juhendajad dr Anne Kahru (KBFI) ja emeriitprof Rein Munter (TTÜ). Oponendid prof Horst Spielmann (Berliini Vaba Ülikool, Saksamaa) ja dots Karin Reinhold (TTÜ).
- 1. detsembril kaitses **Liina Kaupmees** doktoritöö „Selenization of Molybdenum as Contact Material in Solar Cells“ (Molibdeeni kui päikesepatarei kontaktmaterjali seleniseerimine). Juhendaja juhtivateadur Mare Altosaar (TTÜ). Oponendid dr Alberto Bollero (IMDEA Nanociencia, Madrid, Hispaania) ja Ants Lõhmus (TÜ).

- 5. dets kaitses **Tanel Peets** doktoritöö „Dispersion Analysis of Wave Motion in Microstructured Solids“ (Lainete dispersioon mikrostruktuuriga materjalides). Juhendaja prof Jüri Engelbrecht (TTÜ Kübl). Oponendid prof Hui-Hui Dai (Hong Kongi Linnaülikool, Hiina) ja dr Jiri Plešek (Tšehhi Vabariigi TA Termomehaanika Instituut, Praha, Tšehhi Vabariik).
- 6. detsembril kaitses **Olga Velts** doktoritöö „Oil Shale Ash as a Source of Calcium for Calcium Carbonate: Process Feasibility, Mechanism and Modeling“ (Põlevkivituhk kaltsiumkarbonaadi toormena: protsessi teostatavus, mehhanism ja modelleerimine). Juhendaja juhtivteadur Rein Kuusik (TTÜ), kaasjuhendaja emeritprof Juha Kallas (TTÜ; Lappeenranta Tehnoloogiaülikool, Soome). Oponendid prof Thomas van Gerven (Leuveni Katoliiklik Ülikool, Belgia) ja emeritprof Rein Munter (TTÜ).
- 15. detsembril kaitses **Kadri Koppel** doktoritöö „Food Category Appraisal Using Sensory Methods“ (Toidukategooriate väärindamine kasutades sensoorseid meetodeid). Juhendaja prof Toomas Paalme (TTÜ), kaasjuhendaja prof Edgar Chambers IV (Kansase Riiklik Ülikool, USA). Oponendid prof Heli Tuorila (Helsingi Ülikool, Soome) ja dr David Mela (Unilever R&D, Holland).
- 20. detsembril kaitses **Siim Link** doktoritöö teemal „Puit- ja rohtbiomassi koksides reageerimisvõime“ (Reactivity of Woody and Herbaceous Biomass Chars) PhD kraadi saamiseks soojusenergeetika erialal. Juhendajad prof Aadu Paist (TTÜ, STI) ja dr Stelios Arvelakis (Ateena Rahvuslik Tehnikaülikool). Oponendid prof Truls Liliedahl (KTH, Rootsi) ja v.teadur Ülo Rudi (TTÜ mitmefaasiliste keskkondade teaduslabor).

Tallinna Ülikooli loodusteaduste doktorinõukogu

- 14. oktoobril kaitses **Anna Šeletski** doktoritöö „Summeerimismenetluste võrdlus Rieszi tüüpi peres summeerimisväljade, koonduvuskii- ruste ja statistilise koonduvuse järgi“ (Comparison of Summability Methods by Summability Fields, Speeds of Convergence and Statistical Convergence in a Riesz-Type Family) PhD kraadi saamiseks füüsika õppekaval. Juhendaja prof Anne Tali (TLÜ). Oponendid prof Eberhard Malkowsky (Fatih Ülikool, Türgi) ja prof Toivo Leiger (Tartu Ülikool).
- 19. oktoobril kaitses **Natalja Timohhina** doktoritöö „Südamerakkude molekulaarne süsteemne bioenergeetika: mitokondriaalne interak-

tosoom“ (Molecular System Bioenergetics of the Heart Cells: Mitochondrial Interactosome) PhD kraadi saamiseks füüsika õppekaval. Juhendajad prof Valdur Saks (Joseph Fourier Ülikool, KBFi) ja dots Tuuli Käämbre (TLÜ, KBFi). Oponendid prof Kent Sahlin (Swedish School of Sport and Health Sciences GIH) ja prof Tiit Land (TLÜ).

III. ÕPPETÖÖ

- Tartu Ülikoolis olid 2011. a avatud füüsikaga seonduvad õppekavad:
 - bakalaureuseõppes: arvutitehnika, füüsika, haridusteadus (loodusteaduslikud ained), infotehnoloogia, keskkonnatehnoloogia, materjaliteadus, ökoloogia ning elustiku kaitse;
 - magistriõppes: arvutitehnika, füüsika, gümnaasiumi loodusteaduste õpetaja, infotehnoloogia (kuni 2010./11. õ.-a), keskkonnatehnoloogia, kultuuriväärtuste säilitamine (kuni 2010./11. õ.-a), materjalid ja protsessid jätkusuutlikus energeetikas, materjaliteadus, rakenduslik mõteteadus, tuumaenergeetika ja tuumaohutus (alates 2011./12. õ.-a), ökoloogia ning elustiku kaitse;
 - doktoriõppes: füüsika, keskkonnatehnoloogia, loodusteaduslik haridus, materjaliteadus, molekulaartehnoloogia, tehnika ja tehnoloogia.
- Tartu Ülikooli doktoriõppesse võeti:
 - füüsika erialal: Siim Ainsaar, Aris Auzans, Cagatay Ipbüker, Lauri Kaldamäe, Raul Laasner, Jaan Laur, Marek Oja, Martynas Pelakauskas, Arvo Tõnisoo, Karlis Zalite;
 - materjaliteaduse erialal: Tauno Kahro, Triin Kangur, Vladimir Kondratyev, Maido Merisalu, Marko Part, Aigi Salundi, Eliko Töldsepp, Kathriin Utt;
 - keskkonnatehnoloogia erialal: Laura Daija, Sergey Egorov, Hannes Keernik, Martin Ligi, Kristjan Oopkaup, Alar Saluste, Teele Sildvee;
 - tehnika ja tehnoloogia erialal: Piret Arukuusk, Friedrich Kaasik, Sandra Koit, Pavel Kudrin, Kent Langel, Renata Melnikova, Vijay Pal Singh, Kadri Töldsepp, Meeri Visnapuu, Anne-Mari Willmore;
 - loodusteadusliku hariduse erialal: Maria Isabel Runnel, Katrin Saage.
- TÜ magistriõppesse võeti:
 - füüsika erialal: Anari Jalakas, Taavi Hein, Kristel Kosk, Annika Ruusmann, Dmitri Šutov, Velle Toll, Andreas Valdmann, Mihkel Veske, Ott Vilson;

- materjaliteaduse erialal: Artjom Berholts, Julia Dubovik, Kätlin Korovetski, Kaspars Laizans, Tõnis Lulla, Kaido Siimon, Marta Tarkanovskaja;
- keskkonnatehnoloogia erialal 37 üliõpilast;
- erialal „Materjalid ja protsessid jätkusuutlikus energeetikas“ 16 üliõpilast;
- gümnaasiumi loodusteaduste õpetaja erialal 40 üliõpilast;
- rakendusliku mõõteteaduse erialal 13 üliõpilast;
- arvutitehnika erialal 9 üliõpilast.
- Tartu Ülikooli 3-a bakalaureuseõppe lõpetasid:
 - arvutitehnika erialal: Sven Kautlenbach, Aare Puussaar;
 - füüsika erialal: Karen Atabekjan, Anari Jalakas, Kristel Kosk, Rait Käpp, Sven Oras, Mattias Rennel, Dmitri Šutov, Indrek Sünter, Heiko Teemusk, Dmitri Teras, Jaak Vaabel, Mikk Vahtrus, Andreas Valdmann – *cum laude*, Mihkel Veske;
 - infotehnoloogia erialal: Kait Elbe, Sergei Ivanov, Erki Koop, Leonid Kuritsin, Ahto Leitu, Lauri Vaikjärv;
 - keskkonnatehnoloogia erialal: Anneli Allikmaa, Ott Alvela, Allar Anso, Marjaane Bruus, Mikk Espenberg, Lauri Hingla, Indrek Jakobsoo, Kadri Kaarna, Kristo Kalbe, Mari Kirss, Arthur Kivi, Helen Koger, Kristel Kroon, Kaur Kõue, Sven Marga, Malve Marjak, Marta Mõistus, Anni Oviir, Kaarel Paabut, Andres Pallon, Anette Sepp, Holar Sepp, Martin Tomingas, Cris-Tiina Türkson, Sandra Vijar;
 - materjaliteaduse erialal: Artjom Berholts, Tõnis Lulla, Marta Tarkanovskaja ja Andres Värva.
- Tartu Ülikooli loodus- ja tehnoloogiateaduskonna magistriõppe (3+2) lõpetasid:
 - loodusteaduse magister:
 - * füüsika: Tanel Ainla – *cum laude*, Siim Ainsaar, Lauri Kaldamäe, Glen Kelp, Raul Laasner, Jaan Laur, Madis Lõhmus – *cum laude*, Marek Oja, Ott Rebane – *cum laude*, Simon Vigonski;
 - * füüsikaline ja elektrokeemia: Piret Pikma;
 - * heitmete tehnoloogia: Kristiina Ehapalu, Aimar Kivirüüt, Kätlin Pitman – *cum laude*, Alar Saluste, Tauri Tampuu;
 - * keskkonnaseire tehnoloogia: Hannes Keernik – *cum laude*, Martin Ligi – *cum laude*, Kalev Päädam;
 - * kultuuriväärtuste säilitamine: Jaan Keerdo;

- * rakendusfüüsika: Silver Leinberg;
- * teoreetiline füüsika: David Niinepuu;
- * ökosüsteemide tehnoloogia: Taavi Paal, Kadi Rammul, Argo Ronk, Nele Salvet, Ave Uustal;
- * ökotehnoloogia: Sille Holm, Sander Jahilo, Järvi Järveoja – *cum laude*, Kristjan Oopkaup, Indrek Talpsep, Sirle Trestip;
- tehnikateaduse magister:
 - * arvutitehnika: Tiit Ginter, Ramon Rantsus, Teet Tilk;
 - * materjaliteadus: Friedrich Kaasik, Tauno Kahro, Triin Kangur, Maido Merisalu, Marko Part, Ivo Romet, Aigi Salundi – *cum laude*, Indrek Tallo, Eliko Töldsepp – *cum laude*, Kathriin Utt, Meeri Visnapuu – *cum laude*;
 - * rakenduslik mõõteteadus: Cagatay Ipbüker, Martynas Pelakauskas – *cum laude*;
- haridusteaduse magister (füüsikaõpetaja): Taavi Adamberg, Kristel Hankov, Andres Juur, Hille Kesa, Andres Kuura ja Einike Reinvelt.
- Tallinna Ülikooli füüsika doktorandid olid Anna-Liisa Ikart (juh Tõnu Laas), Katrin Laas (juh Romi Mankin), Neeme Lumi (juh Astrid Reker), Anna Saksa (juh Andi Kivinukk, Maria Zeltser), Aia Simm (juh Erkki Soika), Tarmo Metsmägi (juh Andi Kivinukk), Veroonika Širokova (juh Tõnu Laas) ja Berit Väli (juh Tõnu Laas).
- TLÜ magistrandid:
 - füüsika erialal: Jana Paju (juh Jaanis Priimets), Peeter Tamm (juh Tõnu Laas), Martin Vällik (juh Tõnu Laas);
 - füüsikaõpetaja erialal: Virgi Einaste (juh Kirsti Solvak), Kristi Koosa (juh Anneli Roode), Alis Langemets (juh Katrin Laas), Merit Masso (juh Erkki Soika ja Helin Puksand), Merike Martsepp (juh Kirsti Solvak ja Tõnu Laas) ja Julia Tsõgankova (juh Tõnu Laas).
- TLÜ bakalaureuseõppes lõpetas füüsika erialal Peeter Tamm.
- TLÜ füüsika eriala magistriõppe lõpetas Piret Avila.
- TTÜ füüsikainstituudis õppisid:
 - rakendusfüüsika doktorantuuris: Erkki Kask (juh prof Jüri Krustok), Himani Khanduri (juh KBFI van.teadur Raivo Stern ja prof Jüri Krustok), Mario Mars (juh van.teadur V.-V. Pustõnski, kaasjuhendaja V. Harvig), Marion Murumaa (juh KBFI van.teadur Martti Raidal, teadur Andi Hektor, dots Pavel Suurvarik), Tõnis Oja (juh prof R.-K. Loide), Reio Põder (juh KBFI van.teadur Juhan Subbi ja dots Pavel Suurvarik), Jaak Toomela (juh dots M. Klopov);

- tehnilise füüsika magistrantuuris (3+2 õppekaval): Aleksandr Graf, Irina Jelissejeva, Kaspar Kaarlep, Alan Kalda, Maria Kesa, Lauri Laanmets, Triini Leetmaa, Martin Lints, Merily Murd, Taavi Neier, Laur Peedu, Elli Pilk, Radu Prekup, Aet Põldma, Styna Randmaa, Joonas Rihma, Hans Tiismus, Taaniel Uleksin ja Eduard Vaselo.
- TTÜ magistriõppe (3+2) lõpetasid loodusteaduse magistri kraadiga tehnilise füüsika erialal Rait Rand, Päivo Simson ja Richard Villenberg.
- TTÜ magistriõppe (3+2) lõpetasid tehnikateaduse magistri kraadiga erialal „Materjalid ja protsessid jätkusuutlikus energeetikas“ Nirmal Adhikari, Karin Maria Ainsaar, Toomas Danneberg, Imre Drovtar, Aleksandr Jarkov, Franz Lehner, Karol Lindvere, Christian Neubauer, Urmas Raudsaar, Ren Zhang, Marilyn Tilkson, Laura Elisa Valle Rios ja Raigo Veisberg.
- TTÜ tehnilise füüsika õppekava lõpetasid loodusteaduste bakalaureuse kraadiga tehnilise füüsika erialal Victor Alari, Alan Kalda, Viktoria Kudrjajtseva, Martin Lints, Harles Nigulas, Laur Peedu, Artur Sossin, Hans Tiismus, Tarmo Unt ja Elli Valla.
- Eesti Maaülikoolis kaitsesid kaugseirealased magistritööd Tauri Arumäe, Alo Eenmäe, Rain Rämönen ja Eva Salu.
- Atmosfäärifüüsikaalased bakalaureusetööd, mida juhendasid TO teadurid, kaitsesid Eesti Mereakadeemias Aleksei Vaštšenko ja Eesti Maaülikoolis Marko Loogus.
- Üliõpilaste teadustööde riiklikul konkursil 2011 premeeriti järgmisi autoreid loodusteaduste ja tehnika valdkonnas:
 - rakenduskõrgharidusõppe ja bakalaureuseõppe üliõpilaste astmes:
 - * I preemia (960.- eurot) Svetlana Tšupova (TÜ), konkursitöö „Uued meetodid pürasolidiinide ja nende homoloogide sünteesil“ eest;
 - * II preemia (650.- eurot) Kateryna Primar (TTÜ), konkursitöö „Madalamolekulaarsete ligandide mõju insuliini fibrillide detekteerimisele Tioflaviin T abil“ eest;
 - * III preemia (160.- eurot) Marti Arak (TTÜ) ja Evely Raudmets (TTÜ), konkursitöö „Treilerpaat“ eest;
 - * Tänukirjad: Kristel Jukk (TÜ), Kristel Kosk (TÜ), Mare Oja (TÜ);
 - magistriõppe üliõpilaste astmes:
 - * I preemia (1600.- eurot) Heiki Erikson (TÜ), konkursitöö „Hapniku elektrokeemiline redutseerumine nanostruktuursetel pal-laadiumelektroodidel“ eest;

- * I preemia (1600.- eurot) Madis Lõhmus (TÜ), konkursitöö „Üliühikeste optiliste impulsside difraktsioon binaarset faasimodulatsiooni tekitavatel ringsümmeetrilistel difraktsioonivõredelt“ eest;
- * II preemia (1300.- eurot) Liivar Kongi (TTÜ), konkursitöö „Seade õlireostuse likvideerimiseks väikeveekogudelt“ eest;
- * II preemia (1300.- eurot) Kadriann Tamm (TTÜ), konkursitöö „Väävliühendite käitumine põlevkivituha leostamisel ja märgkarboniseermisel“ eest;
- * III preemia (700.- eurot) Priit Eek (TTÜ), konkursitöö „11R-lipoksügenaasi röntgen-kristallstruktuur“ eest;
- * III preemia (700.- eurot) Aigi Salundi (TÜ), konkursitöö „Viskoosel alusel ujuva geelkile pragunemise selgitamine uue rullstruktuuriga materjali väljatöötamiseks“ eest;
- * Tänukirjad: Jaanika Aavik (TTÜ), Kaia-Liisa Habicht (TLÜ), Raul Laasner (TÜ);
- doktoriõppe üliõpilaste astmes:
 - * I preemia (1600.- eurot) Anneli Kruve (TÜ), konkursitöö „Maatriksefektid elektropihustusionisatsiooniallikas vedelikukromatograafilisel massispektromeetrilisel analüüsil“ eest;
 - * I preemia (1600.- eurot) Aleksei Lissitsin (TÜ), konkursitöö „Banachi ruumide kumerad aproksimatsiooniomadused“ eest;
 - * II preemia (1300.- eurot) Meelis Kull (TÜ), konkursitöö „Statiline rikastatuse analüüs geeniregulatsiooni uurimiseks loodud algoritmides“ eest;
 - * II preemia (1300.- eurot) Monika Mortimer (TTÜ), konkursitöö „Sünteesiliste nanoosakeste bioloogiliste efektide hindamine üherakulistel pro- ja eukarüootsetel organismidel“ eest;
 - * III preemia (700.- eurot) Margus Niitsoo (TÜ), konkursitöö „Oraakliga musta kasti eraldused rakendustega ajatembeldusele“ eest;
 - * III preemia (700.- eurot) Raul Rammula (TÜ), konkursitöö „Hafniumdioksiidi aatomkihtsadestamine - nukleatsioon, kasv, ja struktuuri muutused kiledes“ eest;
 - * Tänukirjad: Kairi Kivirand (TÜ), Marju Laars (TTÜ), Kristi Timmo (TTÜ).
- Eesti Teaduste Akadeemia üliõpilastööde konkursi füüsikaga seotud töödest said auhinna 400.- eurot järgmised üliõpilastööd:

- Jaanika Aavik (TTÜ) magistritöö „Tuhavee omaduste selgitamine kaltsiumkarbonaadi sadestustingimuste optimeerimiseks“ (juh juhtivteadur Rein Kuusik, kaasjuh emeritprof Juha Kallas);
 - Victor Alari (TTÜ) teadusartikkel „Merepõhja indutseeritud tuulelainete murdumine Eesti rannikumeres“ (juh van.teadur Urmas Raudsepp);
 - Jürgen Jänes (Amsterdami Ülikool) magistritöö „Mitmeskaalaliste N-keha süsteemide tõhus integreerimine“ (juh dr Federico Inti Pelupessy ja prof Simon Portegies Zwart);
 - Mare Oja (TÜ) bakalaureusetöö „Molekulaardeskriptorite kasutamine ravimite ja mitteravimite struktuuriruumi kirjeldamiseks ja haiguspõhiste ravimikategooriate piiritlemiseks“ (juh dr Uko Maran);
 - Kadriann Tamm (TTÜ) magistritöö „Väävliühendite käitumine põlevkivituha leostamisel ja märgkarboniseerimisel“ (juh juhtivteadur Rein Kuusik, kaasjuh teadur Mai Uibu);
 - Olga Tribštok (TTÜ) magistritöö „Lainetuse tingimuste võrdlus Eesti ja Leedu rannavetes“ (juh akad Tarmo Soomere);
 - Marko Vainu (TLÜ) magistritöö „Häiringute peegeldused järvede veebilansis Kurtina järvestu kolme umbjärve näitel“ (juh dr Jaanus Terasmaa ja dr Elve Lode).
 - Tudengite teadusartiklite konkursil TalveAkadeemia 2011 auhinnati järgnevaid töid:
 - I aste
 - * 1. koht Victor Alari „Lainetuse energia potentsiaal Eesti territoriaalmeres“;
 - * 2. koht Riin Rikas „Lüülsamba funktsionaalsed näitajad idiopaatilise skolioosiga naistel“;
 - * 3. koht Kadri Runnel „Mis toimub puutüve sees – kõdupuidu tiheduse kirjeldamisest resistograafia“;
 - II aste
 - * 1. koht Jaan Niitsoo „Kompaktluminofoorlampide kasutuselevõtu mõju elektrivõrgule“;
 - * 2. koht Piret Toonpere „Tuuleturbiinide müra ja varjutus Kõrkküla-Kestla tuulikupargi näitel“;
 - * 3. koht Mihkel-Madis Laas „Energiakulu mikrostsenaariumite analüüs kaubanduskeskuse külastuse näitel“.
- Nii I kui II astme kolme parimat autasustati TalveAkadeemia stipendiumitega: 1. koht – 300 EUR, 2. koht – 200 EUR ja 3. koht – 100 EUR.

Publiku lemmikud olid Victor Alari ning Piret Toonpere.

- Äriideede konkursile „Tiiger 2011“ laekus 16 ideed. Konkursi üldvõitjaks ja ühtlasi parimaks ideeks nano- ja materjalitehnoloogia valdkonnas osutus Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudis professor Alvo Aabloo juhitud arukate materjalide ja süsteemide laboris tegutsevate doktorantide Indrek Musta ja Friedrich Kaasiku idee „Seadmed elektrienergia tootmiseks mehaanilisest vibratsioonienergiast“. Äriideede konkurss „Tiiger 2011“ on korraldatud Eesti-Läti programmi projekti SIB Net raames ja toetusel.
- 4. mail toimus TÜ Füüsika Instituudi tudengistipi konkurss. Bakalau-reuseastmes sai esikoha Andreas Valdmann (350 eurot), teise koha Kristel Kosk (300 eurot), kolmanda koha Marta Tarkanovskaja (200 eurot) ning neljanda koha Tõnis Lulla ja Artjom Berholts (mõlemad 100 eurot). Magistriastmes jagasid esikohta Raul Laasner ja Marek Oja (mõlemad 500 eurot), teist kohta Eliko Tõldsepp ja Triin Kangur (mõlemad 350 eurot), kolmandat kohta Aigi Salundi ja Lauri Kaldamäe (mõlemad 240 eurot) ning neljandat kohta Kathriin Utt, Tõnis Arroval, Hannes Keernik ja Marko Part (igaüks 150 eurot).
- Tartu Observatooriumi teadusliku nõukogu otsusega sai Ernst Julius Öpiku nimelise stipendiumi TÜ doktorant Jaan Laur ja Juhan Rossi nimelise stipendiumi TÜ doktorant Martin Ligi.
- 4. juulist 26. augustini osalesid kümme Eesti tudengit CERNi suveüli-õpilaste programmis Šveitsis Genfis: Raul Laasner, Marion Murumaa, Aune Nigol, Joosep Pata, Erik Randla, Andres Tiko, Siim Tolk, Taaniel Uleksin, Hardi Veermäe ja Kadi Liis Saar.
- 22.–28. okt osalesid 16 Eesti füüsikaõpetajat nädalasel füüsikaõpe-tajate koolitusel CERNis, Šveitsis Genfis: Eveli Raudla, Maila Visnap, Sergei Pavlov, Siim Oks, Kristjan Vällik, Karl Erlenheim, Kätlin Hein, Kadri-Ly Trahv, Jaan Paaver, Madis Reemann, Valdo Kalling, Aarne Silas, Riina Murulaid, Virgi Einaste, Vello Mägi ja Olle Arak.

IV. TEADUSÜRITUSED EESTIS

- 9. veebr toimus Tartus, vastvalminud AHHA keskuses rahvusvaheli-ne seminar „Kosmose uurimise uusimad trendid 2011“, milles osales üle 100 kosmosevaldkonnas tegutseva spetsialisti. Seminaril esitleti Tartu Observatooriumi teadus- ja arendustegevuse prioriteete aas-

tateks 2011–2015 ning EL 7. raamprogrammi projekti EstSpace tulemusi. Ettekannetele järgnes pidulik EstSpace nõuandva kogu istung renoveeritud Tartu Tähetornis, kus akadeemilise ettekandega esines akad Jaan Einasto. 10. veebr viisid EstSpace nõuandva kogu liikmed läbi seminarid astronoomia, kaugseire ja kosmosetehnoloogia valdkondades.

- 10.–11. veebr toimus Tõraveres ja Tartus EL 7. raamprogrammi projekti ESAIL „Elektrilise päikesepurje tehnoloogia“ nõupidamine. Elektrilise päikesepurje tehnoloogia kohta saab lähemalt lugeda www.electric-sailing.fi.
- 22.–23. märtsini toimusid Tartus, TÜ Tähe 4 õppehoones XLI Eesti füüsikapäevad ja XXXIII füüsikaõpetajate päevad. 22. märtsil toimus Eesti Füüsika Seltsi üldkogu. Traditsiooniliselt kuulusid füüsikapäevade programmi meie füüsikute viimase aja uurimistulemusi tutvustavad ettekanded ja arutlused füüsikateaduse ja -hariduse tulevikust. Füüsikapäevade korraldustoimkond: Ilmar Kink, Jaak Jõgi, Kaido Reivelt.
- 27.–29. apr tähistati Tartu Tähetorni 200. aastapäeva. Pidustused algasid 27. aprillil aktusega Tartu Ülikooli aulas, kus teiste hulgas andis oma soojad tervitused ajaloolisele Tähetornile ja tänapäeva astronoomidele edasi Eesti Vabariigi president Toomas Hendrik Ilves. Üritus jätkus vabas õhus vastrenoveeritud Tähetorni muuseumi piduliku avamisega. 28. ja 29. aprillil toimus TÜ ajaloo muuseumi valges saalis teaduskonverents „Expanding the Universe“, mille temaatikas olid esindatud nii astronoomia ja geodeesia ajalugu Tartus kui tänapäevased teadussuunad astronoomias, mis on lähtunud Tartus tekkinud ideedest. Konverentsist võttis osa umbes 60 inimest 10 riigist, esitati ligi 20 ettekannet. Pidustuste ajaks ilmus ka Lea Leppiku (TÜ ajaloo muuseum) koostatud 216-leheküljeline suureformaadiline rikkalikult illustreeritud raamat „Tartu Tähetorn“, mille tekst on paralleelselt nii eesti kui inglise keeles.
- 6.–8. juunini toimus Tartus Dorpati konverentsikeskuses konverents „2nd European Nanomanipulation Workshop“. Konverentsil osales üle 50 nanotriboloogia eksperdi. Täpsem info nanomanipulation.ut.ee.
- 27.–29. juunini toimus Nelijärve Puhkekeskuses EFS täppisteaduste suvekool. Kavas olid ettekanded energeetikast, robotikast, astronoomiast, osakestefüüsikast, materjaliteadusest, geneetikast jm. Suvetooli korraldasid Kaido Reivelt (TÜ FI) ja Aigar Vaigu (TÜ FI).

Samal ajal samas kohas toimusid ka gümnaasiumiõpilastele ja loodusainete õpetajatele mõeldud Energiaakadeemia (www.teaduslaager.ee/?page_id=349) ja GLOBE kaugseire suvekool (www.globe.ee/globe/seminar/satelliit/).

- 21.–22. sept peeti Tartus seitsmendat iga-aastast Tartu – Tuorla observatooriumide ühisseminari, mille teemaks oli seekord „Universumi kaugvaatlemine“. Seminarist osavõtjaid oli üle kolmekümne, lisaks Tartu Observatooriumi kosmoloogidele ja tähefüüsikutele ning Tuorla Observatooriumi astronoomidele oli osavõtjaid ka Tartu Ülikoolist, TÜ Füüsika Instituudist, KBFist Martti Raidali rühmast ja Soome ESO Astronoomiakeskusest. Kokku peeti üle kahekümne ettekande ja hulgaliselt arutelusid.
- 28.–30. okt toimus Voore Puhkekeskuses EFS täppisteaduste sügis-kool. Ettekannete teemadeks olid atmosfäärifüüsika, füüsikakultuur, Eesti tudengisatelliit, kvantkrüptograafia, materjaliteadus, astrobioloogia, kompleksüsteemid jm. Korraldasid Kaido Reivelt ja Ketlin Piir. Täpsem info www.fyysika.ee/fyysika/nofyl/.

V. TEADUSTÖÖ

- 31. jaanuaril avati II taotlusvoor teaduse tippkeskuste arendamiseks, mille raames 2011. aasta juulis langetas sihtasutus Archimedes otsused struktuuritoetuste raha jagamiseks teaduse tippkeskustele järgnevalt:
 - Eesti Maaülikool, Ülo Niinemetsa juhitud „Keskkonnamuutustele kohanemise tippkeskus“ 3 054 552,95 eurot;
 - Tartu Ülikool, Vladimir Hižnjakovi juhitud keskus „Mesosüsteemide teooria ja rakendused“ 2 901 099,84 eurot;
 - Tartu Ülikool, Enn Lusti juhitud keskus „Kõrgtehnoloogilised materjalid jätkusuutlikuks arenguks“ 2 870 086,58 eurot;
 - Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut ja Tartu Observatoorium, Martti Raidali juhitud keskus „Dark Matter in (Astro)particle Physics and Cosmology“ 1 473 583,16 eurot;
 - Tallinna Tehnikaülikool, Jüri Engelbrechti juhitud „Mittelineaarse te protsesside analüüsi keskus“ 2 729 927,47 eurot.

Nende tippkeskuste tegevused toimuvad aastatel 2011–2015. Raha tippkeskuste toetuseks tuleb Euroopa Regionaalarengu Fondist, mil-

lele lisandub toetuse saajate omafinantseering ja täiendav toetus Eesti riigilt.

- Euroopa Liidu struktuuritoetuste meetme „Teadusaparatuuri ja -seadmete kaasajastamine“ alameetmest „Riikliku tähtsusega teaduse infrastruktuuri kaasajastamine“ rahastatava 9 projekti hulgas on kaks füüsikaga seotud projekti: „Eesti Keskkonnaobservatoorium“ (toetus 4 243 733,5 EUR) ja „Nanomaterjalid – uuringud ja rakendused“ (NAMUR) (4 940 370,4 EUR). Investeeringute kava kinnitati 10.03.2011. Projekti „Eesti Keskkonnaobservatoorium“ toel hakatakse mitmete Eesti teadus- ja arendusasutuste koostöös (Tartu Ülikool, Eesti Maaülikool, Tartu Observatoorium, Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut) ellu viima SMEAR tüüpi (www.atm.helsinki.fi/SMEAR) atmosfääri ja biosfääri koostoime uurimisaama rajamist, mis on Eesti teaduse infrastruktuuri teekaardi oluline osa. Eesti Keskkonnaobservatooriumi juhtimiseks moodustati TÜ rektori korraldusega Eesti Keskkonnaobservatooriumi nõukogu, mille esimees on Leho Ainsaar, TÜ ÖMI direktor. NAMUR koosneb tipplaboritest TTÜs ja TÜs, kus hakkavad asuma teadus- ja arendustegevuse probleemide lahendamiseks vajalikud mikro- ja nanoskoopia seadmed, millega saab analüüsida materjalide erinevate omaduste väljaselgitamise võimalusi ning millele lisanduvad tehnoloogilised seadmed materjalidele uute funktsionaalsete omaduste andmiseks.
- 17. veebruaril kinnitas valitsus 2011. aasta riigi teaduspreemiate saajad. Pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest antavad 38 347 euro suurused riigi teaduspreemiad said akadeemikud Vladimir Hižnjakov (TÜ FI) ja Ülo Lille (TTÜ). Eelneva nelja aasta jooksul valminud ja avaldatud parimate teadustööde eest antavad 19 174 euro suurused riigi teaduspreemiad said:
 - Gennadi Vainikko – täppisteaduste alal uurimuste tsükli „Südamlikud Volterra integraalvõrrandid“ eest;
 - Mart Min – tehnikateaduste alal teadustöö „Signaalid impedantspektroskoopias: originaalsed meetodid, uudsed rakendused“ eest;
 - Anne Kahru – geo- ja bioteaduste alal uurimuste tsükli „Sünteesiliste nanoosakeste ökotoksikoloogia ja toksilisuse mehhanismid“ eest.
- Tegutses TÜ ja TTÜ doktorikool „Funktsionaalsed materjalid ja tehnoloogia“ (FMTDK). Doktorikool on asutatud Eesti vastava ala

juhtivate ülikoolide ning teadus-arendusasutuste poolt koostöös välismaiste partneritega eesmärgiga arendada ja tõhustada doktoriõpet materjalitehnoloogiate valdkonnas. Doktorikooli põhieesmärgiks on tagada doktoriõppe kvaliteet ja tõsta efektiivsust materjaliteaduse ning -tehnoloogia ja nende aluseks olevate keemia ja füüsika valdkondades, suurendades märgatavalt doktoritöö kaitsnute arvu ja vastava õppe rahvusvahelistumist. Doktorikool koondab materjaliteaduse ja tehnoloogia alasesse doktoriõppesse TÜ loodus- ja tehnoloogiateaduskonna, TTÜ keemia- ja materjalitehnoloogia teaduskonna, matemaatika-loodusteaduskonna ja mehaanikateaduskonna vastavatel õppekavadel tegutsevate doktorantide paremiku. Doktorikooli kaasrahastab Euroopa Liit (toetussumma 1 504 711,82 EUR perioodil 01.09.2009 kuni 31.08.2014).

- 3.-4. märtsini toimus Tallinnas hotell Nordic Forum konverentsikeskuses FMTDK esimene teaduskonverents.
- 20.-22. juunini toimus Otepääl Pühajärve puhkekeskuses FMTDK suvekool „G. Tammanni osa kaasaegse tehnoloogia kujunemises“
- 17.-19. aug toimus Pärnus FMTDK suvekool koos Helsingi Aalto Ülikooli doktorikooliga „Advanced Materials and Processes“.

Doktorikooli veebileht asub aadressil www.fi.tartu.ee/doktorikool.

- 15. dets kuulutasid Ameerika Ühendriikide suursaadik Michael Polt ja riigikogu esimees Ene Ergma välja kaks Eesti-Ameerika 2011. aasta innovatsiooniahinna saajat. Võitjaks osutus erafirma GrabCAD ja teise koha pälvis Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi taotlus „Transatlantic collaboration in medical technology“, mille autoriteks olid Koit Mauring TÜ FIst ja Eric Tkaczyk Michigani Ülikoolist. 2011. aastal esimest korda toimunud konkursi korraldasid USA suursaatkond, Ameerika Kaubanduskoda Eestis ja Balti-Ameerika Vabaduse Fond. Auhind on mõeldud tunnustuseks Eesti ja USA sidemetele ning innovaatilisele mõtlemisele.
- TTÜ sõlmis lepingu SA Keskkonnainvesteeringute Keskusega projekti „Valgusreostuse pikaajaliste muutuste uurimine Tallinnas ja valgusreostuse hetkeseisu määramine Eestis“ teostamiseks 27. juunist 2011 kuni 31. dets 2012.
- TLÜ osaleb programmi „IAEA Coordinated Research“ projektis „Investigations of Materials under High Repetition and Intense Fusion-Relevant Pulses“ alamprojektiga „Nonlinear Processes at Mesoscale Plasma-Materials Interactive Systems“. Projekti juht TLÜs on Tõnu Laas.

- 2011. aasta jooksul toimus Tartu Observatooriumi 1,5-meetrise teleskoobi juhtimissüsteemi moderniseerimine. Teleskoop on nüüd täielikult arvuti abil juhitav. Tarkvara võimaldab suunata teleskoopi kiiresti ja sujuvalt etteantud koordinaatidega objektile. Tööd teostas AS ABB.
- Jätkusid KBFI, TO ja TÜ FI kosmoloogia töörühmade ühised fundamentaalfüüsika seminarid.
- TÜ FI Tähe tn hoones toimusid teoreetilise füüsika, astrofüüsika, meditsiinifüüsika ja biomeditsiinitehnika, gaaslahenduse, didaktilise füüsika ja keskkonnanfüüsika seminarid ning teadusbussi infotunnid.
- TÜ FI Riia 142 hoones jätkusid tööd spektroskoopia ja materjalifüüsika seminarid ning nanotehnoloogia tudengiseminar.
- Tartu Observatooriumis toimusid traditsioonilised astronoomia ja atmosfäärifüüsika seminarid, alustas tööd observatooriumi ühisseminar.

TEADUS- JA ARENDUSASUTUSTE SIHTFINANTSEERITAVAJD TEADUSTEEMASID 2011. AASTAL

Tartu Ülikool

- SF0182732s06 Ökosüsteemi süsiniku ja veevoogude interaktsioon muutuv keskkonnas Söber, Anu 2006-2011, 149 030 eur.
- SF0182747s06 Madalatemperatuurilise gaaslahendusplasma ja tahkise vastasmõju uurimine
Laan, Matti 2006-2011, 88 920 eur.
- SF0182724s06 Keerukate süsteemide modelleerimine stohhastiliste meetoditega
Kollo, Tõnu 2006-2011, 40 090 eur.
- SF0182712s06 Suuremahuliste ja keeruliste arvutusülesannete lahendamise meetodid, arvutuskeskkonnad ja rakendused
Vilo, Jaak 2006-2011, 97 690 eur.
- SF0180042s07 Infotehnoloogiliste ja nanoelektroniliste rakendustega tahkiskihstruktuurid
Kukli, Kaupo 2007-2012, 76 710 eur.
- SF0180013s07 Kondenseeritud aine ja fundamentaalväljade teooria
Hižnjakov, Vladimir, 2007-2012, 233 020 eur.
- SF0180058s07 Madaladimensionaalsed struktuurid ja nende rakendused
Kikas, Jaak 2007-2012, 330 010 eur.
- SF0180055s07 Bioloogiliselt oluliste molekulide ja molekulaarkomplekside füüsikalised uuringud
Freiberg, Arvi 2007-2012, 114 590 eur.
- SF0180037s07 Kiiritusnähtused laia keelutsooniga funktsionaalmaterjalides
Luštšik, Aleksandr 2007-2012, 237 350 eur.

- SF0180073s07 Uute optika- ja spektroskoopiameetodite arendamine ja rakendamine materjali- ja plasmatuurینگutes
Saari, Peeter 2007-2012, 128 990 eur.
- SF0180046s07 Pinnanähtused tahkisefüüsikas ja -tehnoloogias
Sammelselg, Väino 2007-2012, 464 010 eur.
- SF0180043s08 Nanomeeterosakeste tekkimine ja aerosooliosakeste mõõtmespektri kujunemine nõrgalt ioniseeritud atmosfääri keskkonnas
Hõrrak, Urmas 2008-2013, 100 190 eur.
- SF0180061s08 Molekulide ja molekulaarsüsteemide keemiliste ja füüsikaliste parameetrite mõõtemetodite arendus ja rakendused
Leito, Ivo 2008-2013, 88 920 eur.
- SF0180081s08 Rakendusmatemaatika ja mehhaanika mudelid
Lellep, Jaan 2008-2013, 88 100 eur.
- SF0180002s08 Protsessid modifitseeritud piirpindadel ja faasides ning nende rakendused uueteübilistes energia allikates ning superkondensaatorites
Lust, Enn 2008-2013, 283 660 eur.
- SF0180127s08 Maastike aineriing muutuvates kliima- ja maakasutuse tingimustes ning selle ökotehnoloogiline reguleerimine
Mander, Ülo 2008-2013, 205 490 eur.
- SF0180178As08 Relevantse loodusteadusliku hariduse osa teadmistepõhises ühiskonnas: multidimensionaalse loodusteadusliku kirjaoskuse kujundamise modelleerimine ja rahvusvaheline evalvatsioon
Rannikmäe, Miia 2008-2012, 20 110 eur.
- SF0180038s08 Numbrilise ilmaennustuse arendamine õhukeskkonna prognooside suunas
Rõõm, Rein 2008-2013, 83 940 eur.
- SF0180135s08 Protsessid makro- ja mikroheterogeensetes ning nanomõõtmes süsteemides ning vastavad tehnoloogilised rakendused
Tenno, Toomas 2008-2013, 116 790 eur.
- SF0180056s09 Kriitilised ja stohhastilised nähtused mittelineaarsetes füüsikalistes süsteemides
Õrd, Teet 2009-2014, 77 650 eur.

TÜ Tehnoloogiainstituut

- SF0180008s08 Ioonised elektroaktiivsed polümeersed materjalid, nende juhtimine ja rakendused
Aabloo, Alvo 2008-2013, 85 500 eur.

TÜ Eesti Mereinstituut

- SF0180012s08 Keskkonna väikse- ja suuremastaabilise muutlikkuse interaktiivne mõju Läänemere ökosüsteemi protsessidele
Kotta, Jonne 2008-2013, 145 650 eur.
- SF0180104s08 Hüdrodünaamiliste protsesside ja nende mõju uurimine põhjelaestikule kõrgtiheda modelleerimise ning eksperimentaal mõõtmiste baasil
Suursaar, Ülo 2008-2013, 140 260 eur.
- SF0180009As11 Optiliselt keerukate ranniku- ja sisevete kaugseire ja optika
Kutser, Tiit 2011-2016, 100 190 eur.

Tallinna Tehnikaülikool

- SF0142737s06 Missioonikriitiliste sardsüsteemide elektroonsed komponendid ja alamsüsteemid
Min, Mart 2006-2011, 203 510 eur.

FÜÜSIKAKROONIKA

- SF0142719s06 Tehnoloogiliste protsesside intensiivistamine aktuaalsete keskkonna-probleemide lahendamiseks
Munter, Rein 2006-2011, 82 010 eur.
- SF0142714s06 Elektrit juhtivate polümeerimaterjalide omaduste uurimine ja modifitseerimine kasutamiseks funktsionaalsete materjalidena ning elektronseadiste komponentidena
Õpik, Andres 2006-2011, 168 450 eur.
- SF0140024s07 Energiaressursside säästlik kasutamine ja protsesside täiustamine põletusseadmetes
Ots, Arvo 2007-2012, 211 640 eur.
- SF0140070s08 Kolmemõõtmelised mudelid aerosoolsete kanal-, gradient- ja keerisvooluste modelleerimiseks ning lahendused tehnoloogilistes protsessides
Kartušinski, Aleksander 2008-2013, 120 230 eur.
- SF0140072s08 Vedeliku ja konstruktsiooni koostoime mehhaanika
Koppel, Tiit 2008-2013, 95 500 eur.
- SF0140092s08 Õhukesekiliselised ja nanostruktuursed materjalid keemilistel meetoditel
Krunks, Malle 2008-2013, 108 600 eur.
- SF0140091s08 Kõvapinded ja pinnatehnika
Kulu, Priit 2008-2013, 113 340 eur.
- SF0140062s08 Mitmefaasiliste tribomaterjalide arendamine ja tehnoloogia
Kübarsepp, Jakob 2008-2013, 202 250 eur.
- SF0140099s08 Uued materjalid ja tehnoloogiad tuleviku päikeseenergeetikale
Mellikov, Enn 2008-2013, 257 670 eur.
- SF0140090s08 Toidu süsteemibioloogia ja füüsika
Paalme, Toomas 2008-2013, 111 690 eur.
- SF0140113Bs08 Mehhatroonika- ja tootmissüsteemide proaktiivsus ja käitumismudelid
Tamre, Mart 2008-2013, 66 230 eur.
- SF0140041s08 Töökindlate sardüsteemide disain
Ubar, Raimund 2008-2013, 236 850 eur.
- SF0140028s09 Põlevkivi ja kütuste segude termokeemilise töötlemise uued tehnoloogiad
Luik, Hans 2009-2014, 84 540 eur.
- SF0140011s09 Algebra ja analüüsi kaasaegsed rakendusmeetodid diferentsiaal- ja integraalvõrrandite teoorias, matemaatilises füüsikas ja statistikas
Puusemp, Peeter 2009-2014, 41 920 eur.

TTÜ Küberneetika Instituut

- SF0322709s06 Usaldusväärsed tarkvara- ja inimkeele tehnoloogiad
Uustalu, Tarmo 2006-2011, 158 460 eur.
- SF014007s08 Mittelineaarne dünaamika ja kompleksüsteemid
Engelbrecht, Jüri 2008-2013, 297 250 eur.
- SF014083s08 Mittelineaarset, puuduliku informatsiooni ja keeruka struktuuriga matemaatilised mudelid
Kangro, Inga 2008-2013, 87 050 eur.
- SF0140018s08 Keerukate mittelineaarsete juhtimissüsteemide süntees
Kotta, Ülle 2008-2013, 121 990 eur.
- SF0140007s11 Lainetuse dünaamika ja rannikutehnika
Soomere, Tarmo 2008-2013, 62 430 eur.

TTÜ Meresüsteemide Instituut

- SF0140017s08 Läänemere vee- ja ainevahetusprotsessid muutuvate välismõjude tingimustes
Elken, Jüri 2008-2013, 158 350 eur.

Tallinna Ülikool

- SF0132723s06 Mittelineaarsed stohhastilised protsessid nano- ja ökosüsteemides: teooria ning rakendused materjaliteadustes ja ökoloogias
Mankin, Romi 2006-2011, 66 150 eur.
- SF0180178Bs08 Erinevate interdistsiplinaarsuse dimensioonide mõju loodusteadusliku kirjaoskuse kujundamisel
Reiska, Priit 2008-2012, 35 160 eur.

Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut

- SF0690063s08 Mehhanismid ja interaktsioonid toksikoloogias ja toksinoloogias: *in vitro* mudelid
Kahru, Anne 2008-2013, 180 330 eur.
- SF0180114Bs08 Integreeritud energeetilise metabolismi regulatsioonimehhanismid lihaskudedes
Saks, Valdur 2008-2013, 105 200 eur.
- SF0690034s09 Tuumamagnetresonantsi meetodi uued arendused ja rakendused
Heinmaa, Ivo 2009-2014, 136 250 eur.
- SF0690001s09 Põlevkivi töötlemise tahkete jäätmete keskkonnasõbraliku kasutamise strateegia
Kirso, Ujuve 2009-2014, 80 150 eur.
- SF0690021s09 Keemiline energiatehnoloogia
Lippmaa, Endel 2009-2014, 100 190 eur.
- SF0690030s09 Kõrgete energiatega ja teoreetiline füüsika
Raidal, Martti 2009-2014, 134 920 eur.
- SF0690029s09 Funktsionaalsete materjalide spektroskoopia
Rõõm, Toomas 2009-2014, 104 570 eur.

Tartu Observatoorium

- SF0060030s08 Evolutsiooni hilisfaasis tähtede ja nende ümbriste vaatluslik ja teoreetiline uurimine
Kipper, Tõnu 2008-2013, 280 520 eur.
- SF0060067s08 Tumeenergia, tumeaine ja struktuuri teke Universumis
Saar, Enn 2008-2013, 223 690 eur.
- SF0180009Bs11 Taimkatte kvantitatiivne kaugseire
Kuusk, Andres 2011-2016, 80 150 eur.

EESTI TEADUSFONDI 2011. AASTAL ALANUD UURIMISTOETUSI

Varasematel aastatel alanud ETF uurimistoetuste nimekirjad on eelmistes EFS aastaraamatutes. Teemad on liigitatud vastavalt ETISE klassifikatsioonile (www.etis.ee).

4. Loodusteadused ja tehnika

4.2 Maateadused

- Atmosfääriaerosooli nanomeeterdiapasooni osakeste tekkepuhangute statistiline uurimine, selleks vajaliku meetoodika ja aparatuuri täiustamine (Eduard Tamm, TÜ) ETF8779 2014

FÜÜSIKAKROONIKA

- Eesti rannikumere kõrgusraamistiku määramine veetaseme monitooringu ja laserskanneerimise andmetest (Harli Jürgenson, EMÜ) ETF8749 2013
- Fütoplanktoni spektraalsed erineeldumiskoeffitsiendid järvedes: algoritmid ja seos veealuse valgusväljaga (Birgot Paavel, TÜ Eesti Mereinstituut) ETF8654 2014
- Hilisjäaja keskonnatingimused viimase jäätumise kagusektoris: paleoökoloogiline uurimus (Siim Veski, TTÜ) ETF8552 2014
- Kaugeise signaali formeerumine optiliselt keerukates ranniku- ja sisevetes (Tiit Kutser, TÜ Eesti Mereinstituut) ETF8576 2014
- Keskonnatingimused ja keemiline murenemine globaalsete muutuste foonil Arhaikumi-Proterosoikumi-Faneroosikumi piiridel (Peeter Somelar, TÜ) ETF8744 2014
- Lained ohufaktorina Eesti rannavetes^{1,2} (Irina Didenkulova, TTÜ) ETF8870 2014
- Lainetuse tekitatud hoovused ja meretaseme tõus rannikumeres (Urmas Raudsepp, TTÜ) ETF8968 2014
- Maakoorettekkega magma evolutsiooni analoog- ja numbriline modelleerimine ja geokeemilised uuringud (Alvar Soesoo, TTÜ) ETF8963 2014
- Mandrijäätumise mõju Balti kilbi lõunanõlva põhjavee kujunemisele: vee isotoop-geokeemiliste trasserite, lahustunud tahkise ja gaaside ning põhjavee integreeritud modelleerimise kompleksuuring (Rein Vaikmäe, TTÜ) ETF8948 2014
- Muutused Telychi ja alam-Sheinwoodi konodondifaunas kui basseini arenguloo indikaatorid Baltikumi põhjaosas (Peep Männik, TTÜ) ETF8907 2014
- Ordoviitsiumi ja Devoni stratigraafia karbonaatse läbilõike magnetiliste omaduste alusel (Ulla Preeden, TÜ) ETF8701 2011
- Rannalähedase lainetuse ja rannasetete liikumise vaheliste seoste uurimine kruusa-veeristikurandlatel (Hannes Tõnisson, TLÜ) ETF8549 2014

4.3 Kosmoseuuringud ja astronoomia

- Täheassotsiatsioonide heledaimate tähtede muutlikkuse uuring (Laurits Leedjärv, TO) ETF8906 2014

4.8 Elektrotehnika ja elektroonika

- Intelligentne trafo - talitlusrežiimide analüüs (Indrek Roasto, TTÜ) ETF8687 2014
- Kvaasi-impedantsallikaga alalis- ja vahelduvpingemuundurid (Dmitri Vinnikov, TTÜ) ETF8538 2014
- Laia keelutsooniga materjalidel baseeruvad integreeritud Schotky ja heterosiirded: tehnoloogiad ja modelleerimine (Toomas Rang, TTÜ) ETF8592 2014
- Tuuleelektrijaamade agregeeritud mudelite analüüs ja arendamine³ (Ivo Palu, TTÜ) ETF8550 2012

4.10 Füüsika

- Aatomkontrollitud kaitsvad katted² (Väino Sammelselg, TÜ) ETF8666 2014
- Elektromehaaniliselt aktiivsete polümeersete komposiitmaterjalide füüsikalise mudeli arendamine⁴ (Alvo Aabloo, TÜ) ETF8553 2014
- Elektronergastuste teke, relaksatsioon ja interaktsioon keerulistes oksiidides (Vitali Nagimõ, TÜ) ETF8893 2014

- Elektron-võnke vastastikmõjud spektraalse korrastamatusega molekulaarsetes nanoagregaatides ² (Arvi Freiberg, TÜ) ETF8674 2014
- Kompleksoksiididel põhinevate stsintillatsioonimaterjalide spektroskoopia (Svetlana Zazubovits, TÜ) ETF8678 2014
- Magnetiliste materjalide THz spektroskoopia allpool 1K (Toomas Rõõm, KBF1) ETF8703 2014
- Metall oksiidide temperatuuri ja valguskontrollitud defektsus ja rakendused gaaside optilises sensoorikas (Ilmo Sildos, TÜ) ETF8699 2013
- Metalliaurudeioon-indutseeritud nukleatsioon ^{4,5} (Madis Noppel, TÜ) ETF8806 2014
- Modifitseeritud gravitatsiooniteooriate teoreetiline struktuur ja vaatluslikud järeldused (Piret Kuusk, TÜ) ETF8837 2014
- Peente osakeste õhusaasteepisoodide kujunemine ning nende mõju elanikkonna tervisele suuremates Eesti linnades (Hans Orru, TÜ) ETF8523 2014
- Size-selective VUV and UV spectroscopy of small metal clusters (Ergo Nõmmiste, TÜ) ETF8737 2014
- Solitonilised struktuurid mitteintegreeruvates süsteemides ja diskreetne spektraalanalüüs (Andrus Salupere, TTÜ) ETF8658 2014
- Spinnpolarisatsiooni efektid top-kvargi protsessides ja uus füüsika (Stefan Groote, TÜ) ETF8769 2014
- Teemantilaadse süsiniku pindeomaduste hindamine ning optimeerimine (Vitali Podgurski, TTÜ) ETF8696 2013
- Tumeda aine ühendteooriate otsesed ja kaudsed testid (Kristjan Kannike, KBF1) ETF8943 2014
- Turbulentne termiline difusioon alumises troposfääris ² (Marko Kaasik, TÜ) ETF8795 2014

4.12 Protessitehnoloogia ja materjaliteadus

- Developing novel methods to enhance the reliability of WC-Co and TiC-NiMo cermets (Kristjan Juhani, TTÜ) ETF8817 2013
- Hüübriidsed aluskontaktid CdTe päikeseelementidele (Sergei Bereznev, TTÜ) ETF8714 2013
- Isesobituvad adaptiivsed tribomaterjalid mineraalide baasil (Maksim Antonov, TTÜ) ETF8850 2014
- Multimastaapne deformatsioonilainete analüüs mikrostruktuuriga materjalides (Arkadi Berezovski, TTÜ) ETF8702 2014
- Päikesepatarei Cu₂ZnSn(Se,S)₄-tüüpi absorbermaterjalide süntees, omaduste kujundamine ja p-n siirde formeerimine (Mare Altosaar, TTÜ) ETF8964 2014
- Tahkeoksiidsete elektrolüüserite ja kütuseelementide 3D struktuursete anoodide ja katoodide arendamine (Priit Möller, TÜ) ETF8860 2014
- Uudsed keraamilised prootonjuhtmembraanid tahkeoksiidsetele elektrolüüseritele (Gunnar Nurk, TÜ) ETF8865 2014

4.13 Mehhanotehnika, automaatika, tööstustehnoloogia

- Arvutialgebra meetodid juhtimissüsteemides (Maris Tõnso, TTÜ) ETF8787 2014
- Elastsete konstruktsioonide modelleerimine lainikutega purunemise korral ⁶ (Helle Hein, TÜ) ETF8830 2014

- | | | |
|--|---------|------|
| • Laeva karilesõidul tekkivate vigastuste modelleerimine arvmeetodite abil arvestades liikumisdünaamikat (Kristjan Tabri, TTÜ) | ETF8718 | 2014 |
| • Mudelitel baseeruv manussüsteemide projekteerimine ja autonoomne navigatsioon (Raivo Sell, TTÜ) | ETF8652 | 2014 |

4.17 Energeetikaalased uuringud

- | | | |
|--|---------|------|
| • Põlevkiviõli ja elektrienergia koostootmise mudelleerimine (Arvo Ots, TTÜ) | ETF8782 | 2014 |
| • Soojuselektrijaama vektoroptimeerimine arvestades info mittetäielikkust (Jelena Šuvalova, TTÜ) | ETF8760 | 2014 |
| • Soojusjõuseadmete metalli seisundi uuringud (Ivo Palu, TTÜ) | ETF8633 | 2014 |

¹ osaliselt erialal 4.10 Füüsika

² osaliselt valdkonnas 1. Bio- ja keskkonnateadused

³ osaliselt erialal 4.17 Energeetikaalased uuringud

⁴ osaliselt erialal 4.12 Protsessitehnoloogia ja materjaliteadus

⁵ osaliselt erialal 4.11 Keemia ja keemiatehnika

⁶ osaliselt erialal 4.4 Matemaatika

VI. RAAMATUD JA KOGUMIKUD

- A. Gavrilov. Pooljuhtmaterjalide elektriliste parameetrite mõõtmine. // Tallinn: TTÜ kirjastus, 2011.
- David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker. Füüsika põhikursus: õpik kõrgkoolile. 1. köide. // Tartu : Eesti Füüsika Selts, 2011.
- Jaan Janno, Jüri Engelbrecht. Microstructured materials: inverse problems. (Springer Monographs in Mathematics) // Berlin: Springer, 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-21584-1.
- Joel Kuusk. Measurement of Forest Reflectance. Top-of-canopy Spectral Reflectance of Forests for Developing Vegetation Radiative Transfer Models. // Saarbrücken, Germany: Lambert Academic Publishing, 2011.
- Arved Vain. Biomehaanika alused ja biomaterjalid. // Tartu: TTÜ Kirjastus, 2011.
- Uno Veismann, Kalju Eerme. Päikese ultraviolettkiirgus ja atmosfääri-
osoon. // Tartu: Ilmamaa, 2011.
- Henn Voolaid, Svetlana Ganina. Füüsika ülesannete kogumik. // Tar-
tu: Atlex, 2011.
- Tartu Tähetorn. Tartu Old Observatory. Koostaja Lea Leppik. // Tal-
linn: Aasta Raamat, 2011

VII. IN MEMORIAM

Ilmar Ots

27. november 1937 – 27. aprill 2011

Aastatepikkune raske haigus viis meie hulgast peaaegu pool sajandit Füüsika Instituudis töötanud väljapaistva teadlase Ilmar Otsa, kelle uurimused käsitasid meie Universumi alusosakeste teooriat. Ilmar läks läbi elu alati kindlameelselt ja ei andnud kunagi lihtsalt alla, ei teadusprobleemide ega ka mitte eluprobleemide ees seistes. Vaid mõni nädal enne oma jäädavat lahkumist käis ta koduinstituudis, et koos arutada, kuidas saaks viia ellu seni veel tegemata toimetusi ja talletada väärtuslikke mõtteid. Paraku nõudis haigus siiski lõivu ja sedakorda lõplikult.



Pärast õpingute lõpetamist TRÜ teoreetilise füüsika erialal 1962. a asus Ilmar tööle ENSV TA Füüsika ja Astronoomia Instituudis. Kandidaativäitekirja „Lihtsate mitterelativistlike Feynmani diagrammide mõningad polarisatsiooniomadused“ kaitses ta 1972. a, juhendajaks dr Iossif S. Shapiro Moskva Teoreetilise ja Eksperimentaalse Füüsika Instituudist. Kvantväljade polarisatsiooninähtused jäid edaspidigi tema teadustöö meelisteemaks. Ta avaldas artikleid rahvusvaheliselt tuntud ajakirjades, kuid kirjutas neid ka ilusas emakeeles Eesti teadushuvilistele „Horisondi“ ja Eesti Füüsika Seltsi aastaraamatute tarbeks. Viimasel aastakümnel püüdis ta leida vihjeid nn uuele füüsikale, mis laiendaks alusosakeste hästikontrollitud standardteooriat.

Ettevõtliku ja vastutustundliku teadlasena jõudis Ilmar lisaks teadusuuringutele juhatada teoreetilise füüsika laborit Füüsika Instituudis aastail 1988–2002 ning aidata korraldada FI teaduselu teadusnõukogu aseesimehena. Rahvusvahelisele teadusüldsusele on tuntud kaks neutriinofüüsika sümposiumi Tallinnas 1993 ja 1995. Vaatamata mitte just kõige lihtsamatele oludele õnnestusid konverentsid suurepäraselt tänu Ilmari innustavale tööle orgkomitee juhina. Ta oli Põhjamaade teoreetilise alusfüüsika teadusorganisatsiooni NORDITA Põhjamaade ja Baltimaade komitee liige 1995–1998.

Inimesena oli Ilmar alati soe ja tähelepanelik. Tema lauluoskus ja huumorimeel kaunistasid sagedasti instituudipere ühiseid ettevõtmisi. Ilmar Otsast jääb meile mälestus kui alati optimistlikust, sõbraliku loomuga, suure südamega inimesest, kellel jagus oskust talle omasel huumoorikal viisil nõu ja jõuga olla toeks neile, kes seda kõige enam vajasid.

Andres Haav

(29. oktoober 1954 – 11. november 2011)

Andres Haav sündis 29. oktoobril 1954. aastal Tartus. Isa, Aksel Haav töötas pikka aega Tartu Ülikooli eksperimentaalfüüsika kateedris dotsendina, ema Aino Haav Vanemuise teatri ooperikooris kooriaristina. Pärast Tartu 1. Keskkooli füüsika-matemaatika eriklassi lõpetamist 1973. aastal asus Andres õppima Tartu Riikliku Ülikooli füüsikaosakonnas, mille lõpetas teoreetilise füüsika erialal 1978. Ei ole just tavaline, et õpingute ajal tuleb kuulata koos kaastudengitega ka oma isa loenguid ja lahendada tahvli ees isa antud optika harjutusülesandeid. Oma sõbralikkuse, heatahtliku iseloomu ja väga heade füüsika-alaste teadmistega pälvis Andres kursusekaaslaste sügava lugupidamise. Ülikooliajast kuni surmani oli Andres Haav ka Tartu Ülikooli kammerkoori liige.



Pärast ülikooli lõpetamist suunati Andres Haav tööle Füüsika Instituudi kristallide spektroskoopia sektorisse vanemlaborandiks ja peatselt sai inseneriks (neil aegadel üsna traditsioonilised ametikohad värskest ülikooli lõpetanule). 1980. aasta lõpus asus ta õppima statsionaarsesse aspirantuuri Füüsika Instituudis optika erialal. Tema juhendajaks oli dr Ljubov Rebane. Aspirantuuri lõppedes 1983. aastal jätkas Andres töötamist laserspektroskoopia sektoris nooremteadurina. Läbiviidud eksperimentaalsete uuringute tulemusena kaitses ta 17. detsembril 1987. aastal Füüsika Instituudi nõukogus füüsika-matemaatikakandidaadi kraadi. Väitekirja teemaks oli “Lisandimolekulide S_2 ja MnO_4 resonantne sekundaarne kiirgus ionkristallides”.

1989. aasta kevadel sai Andres Haavast TÜ eksperimentaalfüüsika kateedri vanemteadur ja järgmisel aastal Eesti Füüsika Seltsi liige.

Ent kuna ta huvid liikusid meditsiinifüüsika suunas, siis peatselt asuski ta tööle TÜ kliinikumini, kus uus ja tehnoloogiliselt keeruline aparaat vajab füüsikute kompetentsi. Töö kliinikumis oli Andrese jaoks ühelt poolt põnev uute teadmiste ja oskuste omandamise aeg ning teiselt poolt nägi ta oma töö tulemuste kiiret ja vahetut rakendamist tipptehnoloogilist meditsiinilist abi vajavate inimeste huvides. TÜ kliinikumis töötas ta kuni elu lõpuni. Andrese seos TÜ füüsikaosakonnaga aga jäi püsima, ta oli hinnatud meditsiinifüüsika-alaste magistratööde retsensent.

VIII. FÜÜSIKAHARIDUSLIK TEGEVUS

- Mais avati teaduskeskuse AHHAAs uus maja Tartu kesklinnas Sadama tn 1 – suur interaktiivne teadusnäitus ligi 500 eksponaadiga ja sfääriline planetaarium, teadusteatri etendused ja töötoad. Tartu Lõunakeskuses jätkas töötamist AHHAAs 4D elamuskinno. Näitusi korraldati ka AHHAAs keskuse Tallinna filiaalis (Vabaduse väljak 9). Vt www.ahhaa.ee.
- 11. nov Tallinnas Salme kultuurikeskuses toimunud neljandal teadusmeediakonverentsil „Mida?“ jagas SA Archimedes 2011. aasta Eesti teaduse populariseerimise auhinnad (vt www.archimedes.ee/teadpop). Auhindade hulgas oli ka füüsikaga seotuid.
 - Elutööpreemia pikaajalise süstemaatilise teaduse ja tehnoloogia populariseerimise eest (6500 eurot) sai keemiainsener ja Tartu AHHAAs teaduskeskuse juht Tiiu Sild.
 - Peapreemia kategoorias „Teaduse ja tehnoloogia populariseerimine trükisõna abil“ (2500 eurot) sai ajakiri Tarkade Klubi ja selle peatoimetaja Arko Olesk.
 - Ergutuspreemia kategoorias „Teaduse ja tehnoloogia populariseerimine trükisõna abil“ (500 eurot) sai raamat „Tartu Tähetorn“, mille koostajaks oli TÜ ajaloo muuseumi teadusdirektor Lea Leppik.
 - Peapreemia kategoorias „Teaduse ja tehnoloogia populariseerimise audio-visuaalse ja elektroonilise meedia abil“ sai projekti „Audiovisuaalne materjal: 100+ katsed keemias“ juht Jaak Arold.
 - Peapreemia kategoorias „Parim teadust ja tehnoloogiat populariseeriv teadlane, ajakirjanik, õpetaja“ (2500 eurot) sai Tarmo Soomere merefüüsika aktuaalsete probleemide selgitamise eest populaarteaduslikes artiklites ja avalikes esinemistes.

- Õpilaste teadustööde riiklikul konkursi gümnaasiumiastme I preemiad (1100 eurot) said:
 - Michael Florea (Tallinna Reaalkool) töö „GST-GFP liitvalgu ekspressiooni sõltuvus IPTG kontsentratsioonist *Escherichia coli*’s“ eest; lisaks SA Archimedes eripremia – osalemine noorte teadusmessil Intel ISEF 2011 Los Angeles, California, USA;
 - Kees Vanamölder (Tallinna Reaalkool) töö „Rööbassöidukite dünaamika võrdlus erinevate rööpmelaiustega rööbasteedel“ eest; lisaks võimalus osaleda Euroopa Liidu noorte teadlaste konkursil 2011. a septembris Helsingis ning SA Archimedes eripremia – osalemine noorte teadusmessil Intel ISEF 2012 Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- Valmistutakse 43. rahvusvahelise füüsikaolümpiaadi IPhO 2012 korraldamiseks Tallinnas. Akadeemilise korralduskomitee juhid on Jaak Kikas (TÜ) ja Jaan Kalda (TTÜ).
- 24.–26. jaanuarini toimus Tartus Dorpati konverentsikeskuses Sihtasutuse Archimedes ja Haridus- ja Teadusministeeriumi korraldatud rahvusvaheline konverents „Kas õpetamine on kunst või teadus?“ (ingliseelse pealkirjaga „University teaching as a scholarship“), mille eesmärk oli kujundada õppejõudude valmisolekut oma õpetamiskursusi arendada ja uurida. Osalesid 366 osavõtjat, sh TÜ füüsikaõppejõud Henn Voolaid, Mart Noorma, Ly Sõõrd, Taavi Vaikjärv jt.
- 22. märtsil toimus Tartu Kivilinna Gümnaasiumis õpilaste robotikavõistluse RoboMiku üle-eestiline finaalvõistlus. Finaalvõistluse ülesandeks oli ehitada ja programmeerida robot, mis suudaks 3-korraliselisest mängumajast päästa mängukaru. Võistlust korraldasid MTÜ Robotika, Tallinna Reaalkool, Tartu Kivilinna Gümnaasium ning Pärnu Ühisgümnaasium, üritust toetasid Euroopa Sotsiaalfond ja Tiigrihüppe Sihtasutus. Vt www.robomiku.ee.
- 22.–24. märtsini toimus teaduslaager „Astronoomiakool Tartu tähetornis“, mille peamiseks sihtgrupiks olid gümnaasiumiõpilased, samuti aga nooremate kursuste üliõpilased ja põhikooli õpilased alates 14. eluaastast.
- Märtsis ja aprillis näitas ETV2 BBC sarja „Seven Wonders of the Solar System“, mida kommenteerisid TO teadurid.
- 9. ja 10. aprillil toimus Tartu Ülikoolis Eesti koolinoorte 58. füüsikaolümpiaadi lõppvoor. Olümpiaadile olid kutsutud 112 parimat 8.–12. klasside õpilast piirkonnavoorede tulemuste alusel. Füüsikaolümpiaadi lõppvooru žürii otsus:

- I Autasustada 1. järgu diplomiga
 - * Gümnaasiumi arvestuses: Ants Remm (12. kl, Hugo Treffneri Gümni), Siim Liiser (12. kl, Tallinna Reaalkool), Jaan Toots (10. kl, Tallinna Reaalkool).
 - * Põhikooli arvestuses: Kristjan Kongas (7. kl, Vanalinna Hariduskollegium).
- II Autasustada 2. järgu diplomiga
 - * Gümnaasiumi arvestuses: Tanel Kiis (11. kl, C. R. Jakobsoni nim Gümni), Deiwin Sarjas (11. kl, Nõo Reaalgümni), Andres Jaanson (12. kl, Pärnu Koidula Gümni), Eero Vaher (12. kl, Pärnu Koidula Gümni), Kristian Kuppert (12. kl, Vanalinna Hariduskollegium), Erik Tamre (11. kl, Tallinna Reaalkool), Janno Jõulu (12. kl, Tallinna Reaalkool).
 - * Põhikooli arvestuses: Uku-Kaspar Uustalu (9. kl, Tallinna Reaalkool), Ernest Gallagher (8. kl, Tartu Erakool), Tambet Kaal (9. kl, Tallinna Reaalkool), Timothy Tamm (9. kl, Gustav Adolfi Gümni), Oliver-Matis Lill (9. kl, Tallinna Reaalkool), Joonas Kalda (8. kl, Tallinna Reaalkool).
- III Autasustada 3. järgu diplomiga
 - * Gümnaasiumi arvestuses: Lauri Kongas (11. kl, Vanalinna Hariduskollegium), Kaur Aare Saar (10. kl, Tallinna Inglise Kolledž), Madis Ollikainen (12. kl, Gustav Adolfi Gümni), Sander Siim (12. kl, Vanalinna Hariduskollegium), Aleksandra Jartseva (10. kl, Tallinna Tõnismäe Reaalkool), Sandra Schumann (10. kl, Tallinna Reaalkool).
 - * Põhikooli arvestuses: Tiit Hendrik Piibelegt (8. kl, Gustav Adolfi Gümni), Karl Erik Lillo (9. kl, Tallinna Reaalkool), Mikk-Markus Imala (9. kl, Tallinna Reaalkool), Juhan Raedov (9. kl, Pärnu Koidula Gümni), Raid Vellerind (9. kl, Tallinna Reaalkool), Janeli Õun (9. kl, Miina Härma Gümni), Maria Krajuškina (9. kl, Tallinna Inglise Kolledž), Robin Reino (9. kl, Tallinna Reaalkool).
- IV Autasustada järguta diplomiga
 - * Gümnaasiumi arvestuses: Alexander Raldugin (12. kl, Tallinna Tõnismäe Reaalkool), Tõnis Laasfeld (10. kl, Gustav Adolfi Gümni), Kert Pütsepp (12. kl, Tallinna Reaalkool), Sergei Malõšev (11. kl, Narva Pähklime Gümni), Helen Liis (12. kl, Tallinna Reaalkool), Janno Veeorg (10. kl, Tallinna Reaalkool), Taivo Pungas (11. kl, Tallinna Reaalkool), Andres Erbsen (10. kl,

- Tallinna Reaalkool), Eva-Lotta Käsper (11. kl, Hugo Treffneri Gümni), Kristina Levina (12. kl, Tallinna Tõnismäe Reaalkool), Sergei Jakovlev (11. kl, Tartu Vene Lütseum), Kristjan Eimre (12. kl, Hugo Treffneri Gümni), Henri Rästas (11. kl, Tallinna Reaalkool), Jaagup Repän (11. kl, Hugo Treffneri Gümni).
- * Põhikooli arvestuses: Henri Tamm (9. kl, Tallinna Reaalkool), Maret Laheveer (9. kl, Rakvere Gümni), Ervin Oro (8. kl, Paide Gümni), Pille-Riin Paavo (8. kl, Tallinna Reaalkool), Magnus Kaldjärv (8. kl, Saaremaa Ühisgümni), Laura Rähni (8. kl, Tartu Veeriku Kool), Taavet Kalda (6. kl, Gustav Adolfi Gümni), Kaarel Kree (9. kl, Lähte Ühisgümni), Lauri Rauk (9. kl, Otepää Gümni), Martin Talvik (9. kl, Lasnamäe Üldgümni), Raul Rinken (8. kl, Tartu Kivilinna Gümni).
 - V Eriauhinnad toetajatelt:
 - * TÜ Füüsika Instituudi eriauhind – Ants Remm (12. kl, Hugo Treffneri Gümni);
 - * Eesti Füüsika Seltsi eriauhind – Jaan Toots (10. kl, Tallinna Reaalkool);
 - * Kirjastuse Avita stipendium – Siim Liiser (12. kl, Tallinna Reaalkool), Jaan Toots (10. kl, Tallinna Reaalkool), Kristjan Kongas (7. kl, Vanalinna Hariduskollegium).
 - * Swedbank-i stipendium „Benoit Mandelbrot'i jälgedes“ – Tanel Kiis (11. kl, C. R. Jakobsoni nim Gümni), Deiwin Sarjas (11. kl, Nõo Realgümni), Andres Jaanson (12. kl, Pärnu Koidula Gümni), Erik Tamre (11. kl, Tallinna Reaalkool), Uku-Kaspar Uustalu (9. kl, Tallinna Reaalkool), Ernest Gallagher (8. kl, Tartu Erakool), Tambet Kaal (9. kl, Tallinna Reaalkool), Timothy Tamm (9. kl, Gustav Adolfi Gümni), Oliver-Matis Lill (9. kl, Tallinna Reaalkool), Joonas Kalda (8. kl, Tallinna Reaalkool).
 - * MTÜ Loodusajakiri eriauhind – Aleksandra Jartseva (10. kl, Tallinna Tõnismäe Reaalkool), Janeli Õun (9. kl, Miina Härma Gümni).
 - * Ajakirja Tarkade Klubi eriauhind – Kristjan Kongas (7. kl, Vanalinna Hariduskollegium).
 - VI Žürii avaldab tänu õpetajatele õpilaste hea ettevalmistamise eest.
 - VII Vastavalt olümpiaadi statuudile arvata Eesti võistkonna liikmeks rahvusvahelisel füüsikaolümpiaadil
 - * Ants Remm (12. kl, Hugo Treffneri Gümni).

- VIII Nimetada rahvusvahelise füüsikaolümpiaadi Eesti võistkonna kandidaatideks Siim Liiser (12. kl, Tallinna Reaalkool), Andres Jaanson (12. kl, Pärnu Koidula Gümni), Eero Vaher (12. kl, Pärnu Koidula Gümni), Kristian Kuppert (12. kl, Vanalinna Hariduskolleegeium), Janno Jõulu (12. kl, Tallinna Reaalkool), Madis Ollikainen (12. kl, Gustav Adolfi Gümni), Sander Siim (12. kl, Vanalinna Hariduskolleegeium), Alexander Raldugin (12. kl, Tallinna Tõnismäe Reaalkool), Kert Pütsepp (12. kl, Tallinna Reaalkool), Tanel Kiis (11. kl, C. R. Jakobsoni nim Gümni), Deiwin Sarjas (11. kl, Nõo Reaalgümni), Erik Tamre (11. kl, Tallinna Reaalkool), Lauri Kongas (11. kl, Vanalinna Hariduskolleegeium), Sergei Jakovlev (11. kl, Tartu Vene Lütseum), Jaan Toots (10. kl, Tallinna Reaalkool), Kaur Aare Saar (10. kl, Tallinna Inglise Kolledž), Aleksandra Jartseva (10. kl, Tallinna Tõnismäe Reaalkool), Sandra Schumann (10. kl, Tallinna Reaalkool), Tõnis Laasfeld (10. kl, Gustav Adolfi Gümni) Janno Veeorg (10. kl, Tallinna Reaalkool), Andres Erbsen (10. kl, Tallinna Reaalkool).

Jaak Kikas, füüsikaolümpiaadi žürii esimees
Tartus, 10. aprillil 2011. a.

- 10. apr toimus TÜ Teaduskoolis VII astronoomia lahtine võistlus, millest võttis osa 23 õpilast. Nooremas rühmas sai I koha Oliver Nisumaa (Tallinna Reaalkool), II koha Hanna Britt Soots (Tallinna Reaalkool) ja III koha Karl Erik Kalmus (Miina Härma Gümni). Vanemas rühmas sai I koha Jaan Toots (Tallinna Reaalkool), II koha Erik Tamre (Tallinna Reaalkool) ja III koha Kaur Aare Saar (Tallinna Inglise Kolledž).
- 12. apr korraldas Tallinna Reaalkool traditsioonilise ülekoolilise teaduspäeva, mille eesmärgiks on populariseerida teadust, anda ülevaade Eesti saavutustest ja arengust, tutvustada erinevate riikide ülikooli viistlaste kogemuste põhjal.
- 11.-16. apr toimus Pardubices (Tšehhi Vabariik) Euroopa Liidu loodusteaduste olümpiaad (EUSO) kuni 16 aastatele õpilastele. Kokku osalesid kahekümne Euroopa Liidu liikmesriigi võistkonnad, igast riigist kaks kolmeliikmelist võistkonda. Eesti võistkonnad osalesid seitsmendat korda. Tegemist on võistkondliku võistlusega, mis hõlmab eksperimente bioloogia, keemia ja füüsika valdkonnast. Võidu sai Ungari esimene võistkond. Vaid kolm punkti madalama tulemusega oli Eesti esimene võistkond teisel kohal ning nemad said ka kuldmedalid. Võist-

konda kuulusid Jaan Toots ja Taivo Pungas Tallinna Reaalkoolist ning Kaur Aare Saar Tallinna Inglise Kolledžist. Ka teine Eesti võistkond, kuhu kuulusid Sandra Schumann ja Uku-Kaspar Uustalu Tallinna Reaalkoolist ning Mette Purde Tallinna Prantsuse Lütseumist, esines hästi, saades üldarvestuses 9. koha ning hõbemedalid. Eesti võistkonnaga olid mentoritena kaasas Marit Puusepp, Siiri Velling, Jaanus Uibu ja Karin Hellat. Eesti õpilaste osalemist rahvusvahelistel olümpiaadidel toetab Haridus- ja Teadusministeerium, teoreetiline ja praktiline ettevalmistus toimub Tartu Ülikooli õppejõudude ja teadurite juhendamisel.

- 15.–16. apr toimus Pärnu Hansagümnaasiumis Õpilaste Teadusliku Ühingu 7. aastakonverents, mis tutvustas parimaid õpilaste kirjutatud uurimistöid. Konverents algas õpilaste teadustööde riikliku konkursi parimate autasustamisega. Konverentsile olid kutsutud kõik 2011. aasta õpilaste teadustööde riiklikul konkursil osalenud noored ja nende juhendajad, teadustööde konkursil osalenud õpilased tutvustasid oma uurimistöid.
- 21. apr toimus TÜ füüsikahoones (Tähe 4) akadeemiline füüsikaolümpiaad 2011. Lahendati teoreetilist laadi ülesandeid ülikooli üldfüüsika programmi teemadel, osales 8 võistlejat. Parimad lahendused esitasid võistelnud Stanislav Zavjalov (eriarvestus, Oxfordi Ülikool, 47 punkti 90-st võimalikust), Taavi Pungas (eriarvestus, Cambridge'i Ülikool, 43 p) ja Mihkel Heidelberg (43 p). Rahalised auhinnad said Mihkel Heidelberg, Siim Ainsaar, Andreas Valdmann, Ott Rebane ja Roland Matt.
- 26.–28. apr toimus Tallinnas 9. Eesti–Soome maavõistlus füüsikas. Esikoha võitis Ants Remm, saades selle võistluse läbi aegade kõrgeima punktisumma, temast vaid 1,25 punkti kaugusele jäi Jaan Toots (2. koht, I järgu diplom); neile järgnes viis Soome esindajat.
- Mais toimus Tallinna Reaalkoolis OHHOO-päev, kus algklasside õpilased esitlesid oma leiutisi ja katseid. Parimaid leiutisi autasustati viimasel koolipäeval.
- 9. mail rääkis Mart Noorma (TÜ) TÜ ajaloo muuseumis teemal „Kosmoseriik Eesti: milline on meie panus inimkonna ees seisvate suurte väljakutsete lahendamisel?“ Üritus toimus sarjas „Teeõhtud teadlastega“.
- 12.–15. maini toimus Türi Kevadfestival „Tähistaevas“ – loodusteemalise muusikafestivali tähelepanu oli seekord suunatud tähistaevale ja universumile. Lisaks kontsertidele toimusid astronoomialoeng ja vaatlusõhtu ning Türi Kultuurimajas avati astronoomiateemaline fotonäitus.

- 13. juunil toimus füüsika riigieksam. Põhieksamist võttis osa 670 eksaminandi. Eksamitööde keskmiseks tulemuseks kujunes 63,7 hindepalli ning 68 eksamitööd said üle 90 punkti 100st.
- 27.–29. juunini toimus Tallinnas KBFIs ja TTÜs füüsikaõpetajate suvekool 2011 „Füüsikaalased teadusuuringud Eestis“. Toimus 11 ettekannet, tutvuti õpperuumide ja laboratooriumidega.
- 10.–18. juulini toimus Bangkokis (Tai) 42. rahvusvaheline füüsikaolümpiaad. Eesti meeskonda kuulusid Ants Remm (Hugo Treffneri Gümni, 12. klass), Andres Jaanson (Pärnu Koidula Gümni, 12. klass), Madis Ollikainen (Gustav Adolfi Gümni, 12. klass), Kristian Kuppert (Vanalinna Hariduskollegium, 12. klass), Jaan Toots (Tallinna Reaalkool, 10. klass). Eesti sai ühe kuldmedali (Ants Remm); ühe hõbemedali (Jaan Toots) ja 3 pronksmedalit (Andres Jaanson, Madis Ollikainen, Kristian Kuppert). Eesti võistkonna juhendajad olid Jaan Kalda (TTÜ Kübi) ja Jaak Kikas (TÜ).
- 11.–24. juulini toimus Kloogarannal TÜ ja EFS korraldusel 5.–9. klasside õpilastele kahevahetuseline teaduslaager. Kavas olid töötoad füüsika, bioloogia, materjaliteaduse, keemia ja raketiteaduse aladelt. Laagri vanem oli Kaido Reivelt, laagri korraldamist toetas Euroopa Sotsiaalfond.
- 8.–11. aug organiseeris EFS GLOBE suvelaagri Jõulumäel, milles osales 150 õpetajat ja õpilast.
- 10.–14. aug toimus Jõgevamaal Pala koolis Eesti astronoomiahuviliste XVI kokkutulek, mille juhtteemadeks olid Kuu ja eksoplaneedid. Tähetorni Kalendris 2012 saab lugeda pikemat lugu kokkutulekust, mille kirjutas üks organisaatoritest Taavi Tuvikene. Vt ka www.astronoomia.ee/kokkutulekud/pala-2011/.
- 27. aug avati Võrumaal Rõuge vallas Sänna külas piduliku kontserdiga Sänna Taevarada. Avasõnad ütlesid Ene Ergma, Võrumaa maavanem ning Rõuge vallavanem. Sänna Taevarada on matkarada, kuhu on paigutatud Päikesesüsteemi mudel mõõtkavas 1:1 miljard (1 mm = 1000 km või 1 m = 1 milj. km). Päike ja neli esimest planeeti paiknevad mõisa vahetus läheduses, järgmised planeedid asuvad Pärlijõe orus Sänna ja Hurda külade vahel. Vt www.facebook.com/pages/Sänna-Taevarada/199285060105683
- 18.–25. sept toimus Tartus teadusfestival. 23. sept korraldas Teaduskeskus AHHAH koos Eesti Teaduste Akadeemia ja Eesti Rahvusringhäälinguga järjekordse Teadlaste Öö (vt www.ahhaa.ee/TeadlasteOo2011).

Tegemist oli üleeuroopalise projekti *Researchers' Night 2011* alamprojektiga, mida rahastas Euroopa Komisjon. Teadusfestivali ja Teadlaste Öö tegevusi toetatakse teaduse populariseerimise alameetmest TEE-ME. Teaduskeskuses AHHA toimusid näitused ja töötoad, Tallinnas ja Tartus tegutsesid teadustelgid, Tartus keskuse juures õues toimus planeedimäng. Tartu Tähetornis toimusid satelliitide meisterdamise töötuba lastele, täheteaduse teemaline filmiprogramm, teleskoobi tutvustus ja vaatlusõhtu. Henn Voolaid esines monumentaalfüüsika loenguga teemal: „Kas sada tuhat on vähe või palju?“ 100 tuhande tartlase monumendi juures. Toimusid ekskursioonid TÜ Füüsika Instituuti ja KBFI teaduslaboritesse. Tallinnas Energia avastuskeskuses tutvustas Aare Baumer uut teadusteatri „Avasta loodusnähtused!“

- 23. sept õhtul toimunud Teadlaste Ööl löi kaasa ka Tallinna Reaalkool: koolimajas olid avatud töötoad, kus õpetajad koos õpilastega juhendasid külalisi katsete tegemisel. Koolimaja ümbruses oli võimalus teha astronoomilisi vaatlusi (planeedid, Kuu, tähtkujud). Avatud oli algklasside OHHOO-päeva leiutiste ja katsete tuba, tehti füüsika ja keemia katseid, programmeeriti roboteid ning uuriti õpetaja Mart Kuurme juhendamisel tähistäevast. Selle õhtu jooksul külastas üritust mitusada inimest, sh lapsevanemad.
- 22.-30. sept toimus Almatõs (Kasahstan) XV rahvusvaheline astronoomiaolümpiaad, millest võttis osa 5-liikmeline Eesti võistkond, juhendajad Jaak Jaaniste ja Tõnis Eenmäe. Oliver Nisumaa (Tallinna Reaalkool) võitis nooremas rühmas pronksmedali.
- 23.-24. septembrini toimus Paide Gümnaasiumis GLOBE õpilaskonverents.
- 7. ja 21. okt ning 4. nov toimusid Sänna kultuurimõisas astronoomilised loengud ja avalikud vaatlusõhtud. Vt www.astronoomia.ee/sildid/sanna.
- 26.-27. nov toimus Tallinna Tehnikaülikooli Spordihoones rahvusvaheline robotikavõistlus Robotex 2011. Robotite võistlused jalgpallis võitis IT Kolledži võistkond „Madistajad“ robotiga Madistaja, joonejärgimises oli parim Läti võistkond „Robotics & Electronics club of RTU“ robotiga Silent. Vt www.robotex.ee.
- 9. dets toimus Sänna Kultuurimõisa kirjanduskubi esimene kohtumine, mille lähtepunktiks oli Jaan Kaplinski populaarteaduslik teos „Teispool sinist taevast“. Taevastel radadel juhatasid huvilisi kirjanik ja hobi-astronoom Jaan Kaplinski ning astronoom Jaan Pelt. Avati

astronoomiliste fotode näitus, millega oli võimalik tutvuda 2012. a jaanuari lõpuni.

- TÜ Ajaloo Muuseum ning Teaduskeskus AHHA korraldasid novembris huviõhtute sarja „Teadlasega planetaariumis“.
- ETV edastas noorte täppisteaduste huviliste telemängu Rakett 69 esimese hooaja. See on teadusvõistlussaade, kus 12 andekat noort võistlevad täppis- ja loodusteaduslike teadusülesannete lahendamises 10 000 euro suuruse stipendiumi nimel. Saade valmis TeaMe programmi raames Euroopa Sotsiaalfondi toel ja jätkab tegevust 2012. aastal järgmise hooajaga.
- Novembris näitas ETV2 BBC sarja „Wonders of the Universe“, mida kommenteerisid TO teadurid.
- Novembris ja detsembris viis TÜ Ajaloo Muuseumi Tähetorn koostöös Teaduskeskusega AHHA läbi planetaristide koolituse. Planetarist on inimene, kes töötab planetaariumidega ehk seadmetega, mis on mõeldud kunstliku tähistaeva tekitamiseks. Koolitus koosnes kolmest õppenädalavahetusest ja õppekäigust Peterburi planetaariumisse.
- Detsembris ilmusid Tähetorni Kalender 2012 (88. aastakäik) ja Tähistäeva Kalender 2012.
- 28. dets 2011 – 3. jaan 2012 viidi Lombokis, Indoneesias läbi maailma füüsikaolümpiaadi (WoPhO – World Physics Olympiad) finaalvõistlus, kus osales 109 õpilast 15 riigist. Tartu Ülikooli füüsikatudeng Ants Remm (juhendaja Jaan Kalda, TTÜ KüBI) sai üldjärjestuses ülikõrge 2. koha ning pälvis sellega kuldmedali. Maailma füüsikaolümpiaad on terve aasta kestav kolmest etapist koosnev võistlus, kus osalejateks on füüsikast süvitsi huvituvad õpilased, kes soovivad end proovile panna füüsikaprobleemide lahendamisel, täiendada oma teadmisi ja oskusi läbi õppimise ning uurimise ja sotsiaalse suhtluse.
- TTÜ korraldas ekskursioone Tallinna Tähetornis koolilastele, organisatsioonidele ja huvilistele, läbiviijaks oli Mario Mars. TTÜ tegi koostööd Tallinna üldhariduskoolidega füüsika õpetamise vallas.
- Füüsikateaduse populariseerimine TLÜs:
 - Teadlaste ööl Viimsi Gümnaasiumis astronoomiavaatluse ja meedialabori läbiviimine;
 - Tallinna Reaalkooli õpilastele laboritööde korraldamine Tallinna Ülikooli füüsikalaborites.
- Eesti Astronoomia Selts ja AS Fotoluks korraldasid fotokonkursi „Kuu lähivaates ja maastikul“, kuhu laekus 164 tööd, neist 115 maastikufoto

ja 49 lähivaate kategoorias. Võitjaid autasustati Eesti astronoomia-huviliste XVI kokkutulekul. Nimetatud fotodest moodustati näitus, mida eksponeeriti:

- Tartu Ülikooli ajaloo muuseumi valge saal, Tartu: 25.08.–11.09.2011;
- Cafe Frens, Pühavaimu 15, Pärnu: 03.10.–30.11.2011.
- Tartu Tähetornis korraldati regulaarselt (va suvekuudel) avalikke vaatlusõhtuid, vt www.astronoomia.ee/sildid/vaatlusõhtud.
- Iga kuu esimesel, kolmandal ja viiendal teisipäeval toimusid Tartu Tähetornis laiale loodushuviliste ringile mõeldud astronoomialoengud. Tartu Tähetorni restaureerimise ajal toimusid loengud Tartu Ülikooli ajaloo muuseumi konverentsisaalis. Tähetorni astronoomialoenguid toetas Euroopa Sotsiaalfond.
- Astronoomia populariseerimise alal tegutses aktiivselt portaal www.astronoomia.ee, mille raames jätkas ilmumist ka traditsiooniline veebiajakiri „Vaatileja“.
- Seoses Tartu Observatooriumi peahoone kapitaalse renoveerimisega võeti ekskursioone vastu vaid juuni lõpuni, selle ajani külastas observatooriumi 99 gruppi 2500 huvilisega.
- Tartu huvikoolis HuvITERA tegutses kosmoseklubi „Estronauudid“, mille sihtrühmaks on lapsed esimesest kuuenda klassini. Klubi tegevust juhendab Eesti Tudengisatelliidi meeskond, kaasa aitavad Eesti Astronoomia Selts ning TÜ kosmose- ja militaar tehnoloogiate töörühm.
- Tartu Observatooriumi teadurid viisid läbi astronoomia kursuse Nõo Reaalgümnaasiumis.
- Energia avastuskeskuses Tallinnas toimusid interaktiivsed näitused ja teadusteatri etendused. 2011. aastal külastas Energia avastuskeskuse näitusi ja programme kokku 30647 inimest. Vt energiakeskus.ee.

Kroonika koostasid Helle Kaasik (TÜ FI), Anna Aret (TO) ja Piret Kuusk (TÜ FI). Andmeid andsid Maarja Grossberg (TTÜ), Tõnu Laas (TLÜ), Kersti Roosimäe (TÜ õppeosakond) ja Henn Voolaid (TÜ koolifüüsika keskus). Kroonikat täiendasid Urmas Hõrrak (TÜ), Ilmar Kink (TÜ), Mati Kutser (TTÜ KüBI), Mart Kuurme (Tallinna Reaalkool), Heli Lukner (TÜ), Ants Lõhmus (TÜ), Rünno Lõhmus (TÜ), Koit Muring (TÜ), Joosep Pata (TÜ), Piia Post (TÜ), Peeter Tenjes (TÜ), Madis Reemann (HTG), Jaana Roht (Tallinna Reaalkool) ja Arved Vain (TÜ). Andmed ETF uurimistoe-

tuste kohta pärinevad ETISest (www.etis.ee). Andmed sihtfinantseeritavate teadusteemade kohta pärinevad ETISest ja Haridusministeeriumi koduleheküljelt www.hm.ee. Kasutatud on ka veebilehti www.ahhaa.ee, www.akadeemia.ee, www.archimedes.ee, www.astronoomia.ee, energiakeskus.ee, www.fuusika.ee, www.robotex.ee, www.ttkool.ut.ee, www.ut.ee jt.

SUMMARY

In 2011 two legal reforms were initiated in Estonia: a reform of the higher education which essentially changes the financing scheme of universities, and a reform of science management which replaces two existing institutions Estonian Research Council and Estonian Science Foundation with a new institution – Estonian Science Agency. The University of Tartu initiated its own reform of governance: from 2012 the highest decision-making body of the university is University Council which consists of 5 members of the university and 6 members who are not employees of the university. The university's academic decision-making body is senate which is composed of the Rector as its chair and up to 21 members who are elected by the members of the university and of whom at least 1/5 must be students.

Fortunately, physics students were rather successful in completing their studies: altogether 12 PhD dissertations were defended in the Institute of Physics, University of Tartu, 9 in front of the physics council and 3 in front of the council of materials science.

The XXII Annual of the Estonian Physical Society (EFS) begins with a review of the International Physics Olympiads (IPhO) by Jaak Kikas and Jaan Kalda, taking into account that the IPhO 2012 will be held in Estonia.

In the second part of the Annual 8 popular abstracts are published describing recent results of investigations of Estonian physicists.

The third part of the Annual contains the programme of the 41st Estonian Days of Physics (Tartu, March 22–23, 2011) and three reports: the report of the laureate of the EFS Annual Prize 2011 Dr. Ivo Heinmaa on investigations of solids using high-precision nuclear magnetic resonance at low temperatures; the report of Vladimir Hizhnyakov and Imbi Tehver on spectroscopy of drops of quantum liquids of He-3 and He-4; the report of Karl Kruusamäe about artificial muscles and the report of Indrek Jõgi and Matti Laan about plasma, catalysts and environmental pollution.

In the fourth part of the Annual, the programme of the 42th Estonian Days of Physics, to be held on 23rd and 24th of March 2012, is published together with abstracts of reports.

Official documents of the Society are presented in the Estonian Physical Society's section. The EFS Annual Prize and the Medal of the

Society 2011 were given to Dr. Ivo Heinmaa from the National Institute of Chemical and Biological Physics. The Honorary Citation winners were Jaak Jaaniste and Oskar Noorkõiv for advancing popular astronomy in Estonia. The Society section includes also the Annual Report for the year 2011 and the lists of Board members and new members of the Society. At the end of the section, the programmes of the Summer and Autumn Schools of Exact Sciences, of the Summer Workshop and of the I and II Seminar of Physics Teachers for the year 2011 can be found.

The last section of the Annual contains the physics chronicle of 2011.

