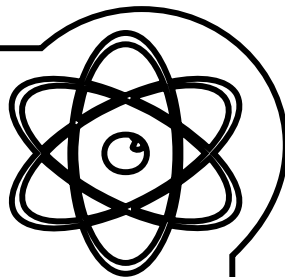


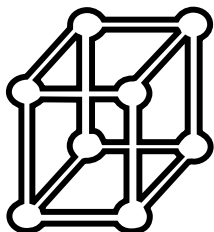
**EESTI FÜÜSIKA SELTS**



**EESTI  
FÜÜSIKA SELTSI  
AASTARAAMAT**

**2010**

**XXI  
aastakäik**



**TARTU 2011**

Toimetanud: Anna Aret, Helle Kaasik, Piret Kuusk

Kujundanud ja küljendanud: OÜ Intelligent Design / Atko Rimmel

Autoriõigus Eesti Füüsika Selts 2011

ISSN 1406-0574

## SAATEKS

2010. aastal oli Eesti valitsuse ja avalikkuse tähelepanu keskmes rahaküsimus: kas Eesti pääseb eurotsooni? Täpsemalt: 20.–22. juunini 1992 vahetati seni siin käibel olnud NSVL rublad Eesti kroonide vastu, mis jäid alates 23. juunist ainukeseks maksevahendiks Eestis. Kuid pärast Eesti astumist Euroopa Liitu 1. mail 2004 kerkis küsimus Eesti liitumisest eurotsooniga – Euroopa Liidu 16 riigiga, kus kasutusel ühisraha euro. Eurotsooni pääsemiseks olid aga riigi rahandusele kehtestatud teatud kriteeriumid, mida Eesti ei suutnud täita enne kui 2010. aastal. 13. juulil tuli lõplik otsus Eesti eurokõlblikkuse ja krooni vahetuskursi kohta (1 euro = 15,6466 kr) ja 31. detsembril lõppes aeg, mil Eesti kroon oli siin ainukeseks maksevahendiks. Pärast kahenädalast üleminekuaega 2011. aasta alguses on meie igapäevases rahakotis nüüd ainult eurod.

Eesti Füüsika Seltsi XXI aastaraamatu avab põhjalik artikkel massist elementaarosakeste füüsikas, autoriteks Ilmar Ots, Stefan Groote ja Rein Saar. Eesti XL füüsikapäevadel ja XXXII füüsikaõpetajate päevadel Tartus 22. ja 23. märtsil 2010 esinenutest on oma ettekande artikliks kirjutanud EFS aastapremia 2010 laureaat Toomas Rõõm (THz-spektrometria KBFI-s ja selle rakendused tahkisefüüsikas). Avaldame ka 22. ja 23. märtsil 2011 toimuvate Eesti XLI füüsikapäevade ja XXXIII füüsikaõpetajate päevade kava ning kaks ettekannet: ülevaate majandusfüüsika alastest töödest Eestis, autoriteks Robert Kitt, Els Heinsalu, Marco Patriarca ja Jaan Kalda, ning Stefan Groote ettepaneku tuletada universumi teke ja areng lähtudes kaootiliste stringide puhtalt matemaatilistest mudelist.

Aastaraamatu lõpetavad Eesti Füüsika Seltsi rubriik ning 2010. aasta füüsikakroonika.

Piret Kuusk,  
toimetaja

# SISUKORD

## **Ilmar Ots, Stefan Groote, Rein Saar**

Mass elementaariosakeste füüsikas ..... 6

## **XL EESTI FÜÜSIKAPÄEVAD JA XXXII FÜÜSIKAÕPETAJATE PÄEVAD**

Kava ..... 46

### **Toomas Rõõm**

THz-spektromeetria KBFI-s ja  
selle rakendused tahkisefüüsikas ..... 50

## **XLI EESTI FÜÜSIKAPÄEVAD JA XXXIII FÜÜSIKAÕPETAJATE PÄEVAD**

Kava ..... 68

### **Stefan Groote**

Universum katseklaasis  
ehk mida kaootilised stringid meile reedavad ..... 71

### **Marco Patriarca, Els Heinsalu, Robert Kitt, Jaan Kalda**

Majandusfüüsika Eestis ..... 81

### **Niina Voropajeva, Aleksei Šerman**

Poollõpmatu kahe- ja kolmedimensionaalse Heisenbergi anti-  
ferromagneetiku äärelähedane ja keskelasuv piirkond ..... 93

### **Jaak Jaaniste, Taavi Tuvikene**

Tartu Tähetorn: astronoomiat koolidele ..... 94

## **EESTI FÜÜSIKA SELTS 2010**

EFS aukirjad ja preemiad ..... 96

Eesti Füüsika Seltsi juhatuse 2010. aasta tegevusaruanne ..... 99

Aasta pilt 2010 ..... 101

Eesti Füüsika Seltsi teetähised 2010. aastal ..... 102

EFS laiendatud juhatuse 2010. aastal ..... 102

EFS uued liikmed ..... 103

Täppisteaduste suvekool 2010 ..... 104

Täppisteaduste sügiskool 2010 ..... 105

EFS füüsikaõpetajate suvekool 2010 ..... 106

## FÜÜSIKAKROONIKA 2010

Töökorraldus .....	108
Väitekirjade kaitsmine .....	110
Õppetöö .....	115
Teadusüritused Eestis .....	121
Teadustöö .....	125
Raamatud ja kogumikud .....	132
In memoriam .....	134
Füüsikahariduslik tegevus .....	142
SUMMARY .....	151
RAAMATUS KASUTATUD LÜHENDID .....	152

# MASS ELEMENTAAROSAKESTE FÜÜSIKAS

---

**ILMAR OTS, STEFAN GROOTE, REIN SAAR**

TÜ Füüsika Instituut

## 1. SISSEJUHATUS

Mass on füüsika üks põhilisemaid, samas aga ka keerulisemaid, mitmeid tõlgendamisvõimalusi pakkuvaid ja seetõttu segadusi tekitavaid mõisteid. Massi mõiste käsitlemine relatiivsusteoorias näitas, kui palju tekitasid Einsteini kuulsat valemit  $E = mc^2$  erinevad tõlgendused vaidlusi selle üle, kas keha mass sõltub keha kui terviku liikumisest või mitte [1]. Käesolevas kirjatöös käsitleme massi mõistet elementaarosakeste vaatevinklist. Selgub, et mikromaailm lisab massi mõistele uusi ja ootamatuid tahke, muutes massi rolli veelgi olulisemaks.

Nii ongi kujunenud elementaarosakeste teooria üheks paljusid probleeme lahendavaks võtmeküsimuseks kõige elementaarsematele osakestele massi tekkimine (tekitamine). On mitmeid sellesuunalisi teooriaid, kuid senini pole olnud võimalust neid katseliselt kontrollida. Aga lähitulevik peaks võimaldama eksperimenti, kui Euroopa elementaarosakeste uurimise keskuses CERN-is 2009. a käivitatud võimas Suur Hadronite Põrguti (*Large Hadron Collider, LHC*) teadusuuringute jaoks piisava võimsusega tööle hakkab.

Võttes eeskuju CERN-is töötava tuntud inglise füüsikateoreetiku John Ellise artiklist [2] võiks öelda, et massiprobleemid elementaarosakeste füüsikas nõuavad vastuseid küsimustele, mis on hämmastavalt sarnased kuulsale prantsuse maalikunstniku Paul Gauguin'i omadele inimkonna kohta. *D'où venons-nous? Que sommes-nous? Où allons-nous?* Kust me tuleme? Kes me oleme? Kuhu me läheme? Elementaarosakeste massidele kohandatuna kõlaksid küsimused nii: „Kust tuleb mass? Mis on mass? Mis saab massist (kui katse erinevate teooriate kohta mingit selgust toob)?“ Kuidas elementaarosakeste teooria nendele küsimustele vastab, sellest annamegi oma kirjatöös lühikese ülevaate.

## 2. MASSI OLULINE ROLL STANDARDMUDELIS

### 2.1. MASSIDEST SÕLTUVAD STANDARDMUDELI VABAD PARAMEETRID

Nagu paljud eelnevad mikromaailma teooriad pretendeerib ka praegune elementaarosakeste standardteooria ehk Standardmudel reaalsuse seletamisele väheste struktuurita osakeste ja nende vahel toimivate vastastikmõjude ehk jõudude kaudu.<sup>1</sup> Standardmudeli aluseks on kahele kahekümneenda sajandi suurteooriale – kvantmehaanikale ja erirelatiivsusteooriale toetuv kvantväljateooria. Standardmudeli loojate nimekiri on pikk. Ameerikased Sheldon Glashow, Steven Weinberg, David Gross, Frank Wilczek ja David Politzer, pakistanlane Abdus Salam ning hollandlased Gerard 't Hooft ja Martinus Veltman olid need teadlased, kes said oma „ehitusuurin-gute“ eest Nobeli preemia. Aga neile lisanduvad veel paljud.

Läinud sajandi seitsmekümnendate aastate esimesel poolel valminud Standardmudel osutus edukaks ja kaua vastupidavaks. Ta mitte ainult ei seletanud senist, vaid ennustas palju uut, mida hilisemad katsed on kinnitanud. Siiaamaani on Standardmudel olnud kooskõlas kõikide kiirendikatsetega. Ometi ei ole Standardmudel teooriana täiuslik, sest ei suuda vastata temast endast johtuvatele olulistele küsimustele. Standardmudel ei ole küllalt fundamentaalne, vaid poolempiiriline teooria. Ta sisaldab tervelt 18 „vaba“, teooriaga määramata parameetrit, mille väärtused võetakse katsest. Massiprobleemide tähtsust rõhutab siinkohal fakt, et koguni 13 katsest võetud parameetrit on seotud elementaarosakeste massidega.

### 2.2. ALUSOSAKESTE PERED STANDARDMUDELIS

Standardmudelis on nimetatud kõik seni teada olevad fundamentaal- ehk maakeeli öelduna alusosakesed. Need on osakesed, millele katse, mis praegu suudab eristada  $10^{-18}$ – $10^{-19}$ -meetriseid vahemaid, pole senini suutnud mõõtmeid leida. Katse „näeb“ neid mõõtmata – punkti- kujulistena. Alusosakesed jagunevad aine- ja väljaosakesteks. Aineosa- kesed on kõik fermionid – 1/2-spinniga osakesed. On kuus leptoniteks nimetatud osakest – elektron ( $e$ ) ja elektronneutriino ( $\nu_e$ ), müüon ( $\mu$ ) ja müüneutriino ( $\nu_\mu$ ) ning tauon ( $\tau$ ) ja tauneutriino ( $\nu_\tau$ ). Neile lisanduvad kuus kvarki – u-kvark ( $u$ ) ja d-kvark ( $d$ ), c-kvark ( $c$ ) ja s-kvark ( $s$ ) ning t-

1 Kasutame mugavuse ja vahelduse mõttes sõna „jõud“ vastastikmõju sünonüümina, seostamata seda jõu mõistega klassikalises füüsikas.

<b>Kvargid</b>	2–3 MeV <b>u</b> u-kvark	1.2–1.3 GeV <b>c</b> c-kvark	170–175 GeV <b>t</b> t-kvark	<b>Jõudude kandjad</b>	0 eV <b><math>\gamma</math></b> foton	
	4–5 MeV <b>d</b> d-kvark	80–120 MeV <b>s</b> s-kvark	4.1–4.8 GeV <b>b</b> b-kvark		0 eV <b>g</b> gluonid	
	<b>Leptonid</b>	< 2 eV <b><math>\nu_e</math></b> e-neutriino	< 0.19 MeV <b><math>\nu_\mu</math></b> $\mu$ -neutriino		< 18.2 MeV <b><math>\nu_\tau</math></b> $\tau$ -neutriino	91.188 GeV <b>Z</b> Z-boson
		0.511 MeV <b>e</b> elektron	105.66 MeV <b><math>\mu</math></b> müüon		1.777 GeV <b><math>\tau</math></b> taupon	80.399 GeV <b><math>W^\pm</math></b> W-bosonid
		<b>I</b>	<b>II</b>		<b>III</b>	
		<b>Alusfermionide pered</b>				

Joonis 1. Elementaarosakeste „loomaaed“.

kvark ( $t$ ) ja b-kvark ( $b$ ). Igale osakesele lisandub temale vastav antiosake – sama massi ja spinniga, kuid vastasmärgilise laenguga. Kui ükski osake ja tema antiosake pole identsed, lisandub seega veel 12 alusosakest.

Need tosin aineosakest jaotuvad kolme perekonda ehk lihtsalt perre (öeldakse ka põlvkonda), igas peres kaks leptonit ja kaks kvarki. Esimese peresse kuuluvad elektron, elektronneutriino ning u- ja d-kvark, teise peresse müüon, müüneutriino ning c- ja s-kvark, kolmanda pere liikmeteks on tauon, tauneutriino ning t- ja b-kvark. Teine ja kolmas pere oluksid vaid esimese pere kloonid, kui mitte erinevate perekondade vastavad (samas reas olevad) osakesed poleks erinevate massidega (vt



joonis 1). Teise pere vastavad osakesed on üksjagu raskemad esimese perekonna omadest ja kolmanda pere osakesed omakorda massiivsemad teise pere osakestest. Teisisõnu öelduna, võib 12 aineosakest jaggada nelja triaadi –  $(e, \mu, \tau)$ ,  $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ ,  $(u, c, t)$ ,  $(d, s, b)$ , igas triaadis sarnaste omadustega, kuid järjest suurenevate massidega osakesed.<sup>2</sup>

Sellise, erinevate massidega „kolmainsuse“ eksisteerimisele on küll teoreetilisi põhjendusi otsitud, kuid midagi kindlat pole leitud. Üsna tihti väidetakse ka, et katse on kooskõlas vaid kolme perega, välistades suurema arvu perede olemasolu. Kui kindlale alusele katsele viitajad toetuvad? Vaatame ühte neist. Väljaosakeste seas on väga massiivseid, neist raskeim on  $Z$ -boson. Oma üle 90 GeV-ise (gigaelektronvoldise) massiga võib ta laguneda suvaliseks aineosakese–antiaineosakese paariks, välja arvatud  $t$ -kvargi–antikvargi paariks, sest juba  $t$ -kvark üksinda on ligi kaks korda  $Z$ -bosonist massiivsem. Kõik need lubatud lagunemised on ka katseliselt kindlaks tehtud. Nüüd loodetakse katselisele kinnitusele, et neljanda pere olemasolul peaks  $Z$ -boson lagunema ka selle pere kergemate osakeste–antiosakeste paarideks. Aga see ei pruugi nii olla. Vaadates joonist 1 veendume, et massivahed teise ja kolmanda pere vahel on kaugelt suuremad kui esimese ja teise pere vahel. Ja võib täiesti juhtuda, et neljanda pere kergemad osakesed on massiivsemad kui kolmanda pere raskemad osakesed ja niivõrd massiivsed, et  $Z$ -bosonid ühekski selle pere osakese–antiosakese paariks laguneda ei saa. On veel teisi katsega seotud kolme peret toetavaid argumente, kuid nende lahkamine tuleks selle osa jaoks liiga pikk ja keeruline. Et aga nii teoreetilisi argumente kui ka seniseid katsetulemusi vaid kolme pere olemasolu kasuks eriti tõsiselt ei võeta, näitab jätkuvalt märgatav arv uurimusi võimalikust neljandast perest. Eksisteerigu kolm peret või enam, igal juhul on aine alusosakeste jagunemine peredeks nähtus, mis näitab, et elementaarosakeste füüsikas on midagi, milles väga suurt rolli mängivad alusosakeste massid.

### 2.3. VASTASTIKMÕJUDE KALIBRATSIOONITEOORIA JA ALUSOSAKESTE MASSID

Praeguste teadmiste järgi taanduvad kõikvõimalikud keerulised jõud maailmas neljale alusjõule, mis toimivad alusosakeste vahel – gravitat-

2 Neutriinode triaadis pole siiani veel lõplikku selgust, sest masside täpseid väärtusi siin ei teata.

sioonilisele, nõrgale, elektromagnetilisele ja tugevale jõule. Neist gravitatsioonilisel ja elektromagnetilisel jõul on suur, lõpmatuseni küündiv mõjuraadius, mistõttu nad meile ennast igapäevaselt tunda annavad. Tugeva ja nõrga jõu ulatus on väga väike, vastavalt  $10^{-15}$  ja  $10^{-17} - 10^{-18}$  meetrit, ja nende toimel mõjutavad üksteist vaid väga lähedal olevad mikroobjektid. Igapäevaelus me neid jõude otseselt ei tunneta. Sellistel väikestel kaugustel on tugev jõud ligi sada korda suurem kui elektromagnetjõud, viimane omakorda umbes tuhat korda tugevam nõrgast jõust. Gravitatsioonijõud mikroosakeste vahel on kõigest ülejäänuiest hoopiski tillem, isegi nõrgast jõust  $10^{32}$  korda väiksem. Seetõttu mikromaailma uuringutes sellega ei arvestata.

Standardmudelil tuletatakse kõik alusosakeste vahel toimivad jõud sümmeetriaprintsiibist. Et füüsikas on sümmeerial väga tähtis roll, on ammune tarkus. Üldteada on, et paljude füüsikaliste suuruste jäävus-eadused tulenevad sümmeetrianõuetest. Pöördimpulsi, impulsi ja energia jäävused tulenevad vastavalt invariantsusnõudest ruumi pöörrete suhtes, nihete suhtes ruumis ja ajanihete suhtes. Pöördimpulsi jäävuse tagab asjaolu, et meid ümbritsev ruum on ühesugune igas suunas, on isotroopne. Impulsi jäävuse tingib ruumi ühtlus ehk homogeensus. Ka seost energia jäävuse ja ajanihete vahel pole raske näidata. Kujutame ette, et raskusjõud ei ole invariantne ajanihete suhtes. Siis võiks ju olla nii, et see on hommikuti nõrgem ja õhtuti tugevam. Sel juhul aga poleks energia jääv: tõstes hommikul raskusi üles ja lastes õhtul, nüüd aga enam kaaluvaid raskusi alla kukkuda, toodaksime energiat.

Ülaltoodud teisendused on hästi arusaadavad, seotud ruumi ja ajaga, kus me elame. Kuid füüsikas kasutatakse ka abstraktseid, matemaatilisi ruume. Kui tavaruum on reaalne ja kolmemõõtmeline, siis matemaatilised ruumid võivad olla ka kompleksed ja mistahes mõõtmelised. Matemaatilisi ruume saab siduda osakeste laengutega ja siis nimetatakse neid laenguruumideks. Laengud on osakeste sisemised karakteristikud, mistõttu nende jäävust ei saa tuletada osakesi ümbritseva ruumi teisendustest. Piirdume siinkohal näitega ühe vastastikmõju laengu – elektrilaengu – ruumist. Massiivseid laetud aineosakesi kirjeldab bispiinorväli. Vaba välja kirjeldav Diraci võrrand on invariantne faasiteisenduse suhtes, mis kujutab endast pööret abstraktses ühemõõtmelises elektrilaengu ruumis ja on määratud pöördenurgaga. Osutub, et invariantsus selle faasiteisenduse suhtes viib elektrilaengu jäävusele.

Kõikidel ülaltoodud sümmeetriateisendustel, olgu tava- või matemaatilistes ruumides, mis viivad jäävusseadusteni, on üks üldine omadus: nad on globaalsed – ei sõltu tavaruumi koordinaatidest ega ajast. Teine võimalus on, et sümmeetriateisendused sõltuvad aegruumi koordinaatidest ehk, teisisõnu, on ruumi ja aja funktsioonid. Sel juhul võivad teisendusparameetrid (pöörded, nihked) olla igas aegruumi punktis erinevad. Need teisendused, mida nimetatakse lokaalseteks ehk kohalikeks, ei vii jäävusseadusteni. Kuid just invariantsusnõudest taoliste teisenduste suhtes tuletatakse alusjõudude matemaatilised kujud ja vastastikmõjude kandjad.

Standardmudelil nõutakse invariantsust lokaalsete faasiteisenduste suhtes. Kuidas see invariantsusnõue toimib? Osutub, et vabade väljade teooria ei ole invariantne lokaalsete faasiteisenduste suhtes: tuletisi sisaldavad väljavõrrandite liikmed, rakendudes teisendatud väljafunktsioonidele, genereerivad invariantsust rikkuvaid liikmeid. Invariantsuse saamiseks tuleb aineosakeste võrranditesse tuua väljaosakesi ehk kalibratsioonibosoneid kirjeldavad liikmed. Need spinniga 1 massita kalibratsioonibosonid (väljad) on määratud vaid teatud teisenduste, kalibratsiooniteisenduste täpsuseni. Kui kalibratsiooniväljade teisendused kompenseerivad faasisümmeetriat rikkuvad liikmed, muutub teooria invariantseks. Kuid see pole enam vaba teooria: selles on aineosakeste ja väljaosakeste vastastikmõju liikmed.

Tugeval jõul on kolm laengut, värvilaengut: punane, sinine ja roheline.<sup>3</sup> Teooria invariantsusnõue lokaalsete faasiteisenduste suhtes kolme värviga laenguruumis annab tugeva jõu matemaatilise kuju ja kaheksa gluoniks kutsutavat massita jõu kandjat. Võiks tunduda, et asendades värvilaengute ruumi nõrga laengu või elektrilaengu ruumiga, saaksime vastavalt nõrga ja elektromagnetjõu kuju ning jõudude vahendajad. See oleks nii, kui poleks elektrilaenguga nõrga jõu kandjaid. Kuid need on olemas ja kahe jõu vahel on mingi seos. Nii selgub, et kui nõrga jõu kuju leidmiseks lähtuda lokaalsetest pööretest vaid nõrga laengu ruumis, siis eesmärgini ei jõuta. Küll aga invariantsusnõue nii nõrga kui elektrilaenguga seotud teatud kombineeritud teisenduste suhtes viib soovitud tulemuseni: annab nii elektromagnetilise kui nõrga jõu kujud ja jõudude kandjad. Et elektromagnetilise ja nõrga jõu kujud saab tuletada

3 Värvinimed sellest, et punase, sinise ja roheline laengu kolmik koos olles neutraliseerivad üksteist, samuti kui punane, sinine ja roheline värv võrdsetes kogustes muutub värvituks (valgeks).

invariantsusnõudest ühe ja sama sisemise ruumi teisenduste suhtes, tähendab see nende jõudude teatud mõttes ühendamist ühtseks nn elektronõrgaks jõuks.

Paistab, nagu oleks tehtuga eesmärgini jõutud. Aga, aga! Kalibratsiooniteooria nõuab, et kõik, nii aineosakesed kui ka välja- ehk kalibratsiooniosakesed, oleksid massita. Kui heita pilk alusosakeste „loomaaeda“ (joonis 1) näeme, et kõik aineosakesed on massiivsed, igaüks oma massiga. Jõu kandjatest on küll foton ja gluuonid massita, seevastu nõrga jõu kandjad  $W^\pm$ - ja  $Z$ -bosonid on üsna massiivsed. Nii et osakeste reaalsed massid ei vasta kuidagi vastastikmõjude kalibratsiooniteooriale. Tõepoolest, kui vaid üksnes nõrga jõu kandjad oleksid massita, oleks nõrk jõud umbes sama tugev kui elektromagnetiline. Ja sel juhul oleks Päike nõrga jõu protsesside mõjul juba ammu ära põlenud. Elektroni massist sõltuvad aga aatomite suurused. Kui elektron oleks raskem, kui ta tegelikult on, oleksid aatomite raadiused ja ka kõigi tahkiste mõõtmed hoopis pisemad, kui nad praegu on. Aga teisalt, kui elektron oleks massita, poleks ei aatomeid, molekule ega tahkiseid – polekski elu.

Mida teha? Kirjutada võrranditesse massiliikmed lihtsalt juurde? Kuid sellega rikuksime sedasama sümmeetriat, mille nõudest vastastikmõjuga teooriad tuletati. Selgubki, et selliselt „käega“ sisestatud massidega teooriad ei tööta. Nende järgi arvutamine viib mõttetutele lõpmatute väärtustega mõõdetavatele suurustele, millest pole kuidagi võimalik lahti saada. Kuna, mõne erandiga, pole vastastikmõjudega võrrandeid võimalik täpselt lahendada, kasutatakse väljateooriates häiritusarvutust. Lõpmatusi genereerivad häiritusarvutuse kõrgemat järku liikmed ja ka head, töötavad teooriad sisaldavad lõpmatusi. Kuid viimastes on võimalik nende mõjust vabaneda suuruste ümbernormeerimisega (vt [3]). Töötavaid teooriaid kutsutakse renormeeritavateks ja nendes võib võrranditele leida kuitahes täpseid lahendeid ning neid katsetulemustega võrrelda. Ühe lausega öelduna on renormeerimine lõpmatute suuruste paigutamine katsest teooriasse toodud parameetritesse ja arusaam, et just lõpmatustega „koormatud“ parameetrite väärtused on need, mis on katsest leitud. Kui erinevat tüüpi lõpmatusi ei ole palju ja need korduvad kõigis kõrgemat järku häiritusarvutuse liikmetes, saab nad kõik niimoodi ära „peita“. Kui iga kõrgem häiritusarvutuse järk toob kaasa uut tüüpi lõpmatusi, siis selline protseduur ei ole enam võimalik ja teooria on renormeerimatu. Renormeerimatutes teooriates ei saa mõõdetavaid suurusi kuitahes täpselt arvutada, leida saab vaid häiri-

tusarvutuse esimestest liikmetest tulevaid väga ligikaudseid lahendeid. Nendel teooriatel pole ennustamisjõudu ja neid loetakse mittetäisväärtuslikeks. Millisel viisil probleem lahendada?

Kui heita pilk küllalt pikale ajaperioodile enne kalibratsiooniteooriat, näeme, et teooria jännijäämisel lisatakse sageli emakesele-loodusele midagi uut, seni tundmatut, mis siis teoriasse võetuna probleemi lahendab. Nii „kinkis“ Austria teoriafüüsik Wolfgang Pauli 1930. aastal tuuma  $\beta$ -lagunemise pideva spektri põhjendamiseks teooriale massita (või väga tillukese massiga) elektrilaenguta osakese, mida mõni aasta hiljem, pärast neutroni avastamist, kuulus Itaalia teooria- ja katsefüüsik ühes isikus Enrico Fermi neutroni järgi hellitavalt neutronikeseks, ehk itaaliapäraselt neutriinoks hakkas kutsuma. Pauli julge samm osutus õigeks. Teooria sai  $\beta$ -spektri kujule põhjenduse ja umbes veerand sajandit hiljem leiti katsetest, et looduses on tõesti Pauli osake, elektronneutriino.

Pauli neutriinoteooria loomise ajal tunti vaid kolme elementaarosakest – elektroni, footonit ja prootonit, mistõttu paljudele näis Pauli „neutriinoolomine“ pühaduse rüvetamisena. Hiljem, elementaarosakeste füüsika kui omaette teadusharu tekkimisega, muutusid teorianõuetest tulenevate uute osakeste ennustamised üsna tavalisteks. Nendest kõikidest siin juttu heietades kalduksime artikli põhi-teemast kõrvale. Mainiksime siin vaid ühte, eelpool peredega seotut: kombineeritud laengut-paarsust (CP) rikkuva teooria loomiseks pidid Jaapani teoreetikud Makoto Kobayashi ja Toshihida Maskawa 1973. aastal postuleerima kolmanda pere, millest tollal veel ühtegi osakest polnud avastatud.

Kalibratsiooniteooria loojad pidid samuti looduse seletamiseks teoriasse seni tundmatut lisama. Nad väitsid, et kõik alusosakesed olekski massita, kui poleks kogu ruumi täitvat eriliste omadustega välja, mida Šoti füüsiku auks Higgsi väljaks nimetatakse. Taolise välja ideel on palju ühist 19. sajandi teisel poolel valitsenud, kuid enne uue sajandi algust hüljatud ideega maailmaeetrist, milles pidid levima elektromagnetlained ja mõnede arvates toimima ka gravitatsioon. Kõik alusosakesed, peale Higgsi välja kvandi, Higgsi bosoni enda oleksid vaakumis liikudes massita. Kuna aga kogu ruum on täidetud Higgsi väljaga, nende jaoks vaakumit polegi ja vastastikmõjus selle väljaga tekitatakse alusosakestele massid. Higgsi välja eksisteerimise juhul lisandub neljale teadaolevale alusjõule veel viies – Higgsi jõud. Erinevalt ülejäänuid ei tekita see osakestele mingit jõudu, vaid annab neile vaid massid. Ja, nagu allpool

teada saame, väljaosakestele ühtviisi ja aineosakestele teistviisi.

Nii selgub, et mass ei ole pelgalt alusosakeste sisemine omadus, vaid tekib osakeste vastastikmõjust neid ümbritseva keskkonnaga, mida kut-  
sutakse Higgsi väljaks. Siiski jääb oluline roll masside tekitamises ka  
massita osakeste sisemiste karakteristikute mängida. Sest genereerita-  
vate masside suurus sõltub osakeste vastastikmõjude intensiivsusest  
Higgsi väljaga. Nii „vormivad“ massita t-kvark ja  $W^\pm$ - ning Z-boson Higg-  
si väljas endale suured massid. Samas saavad kõik leptonid ja ülejäänud  
kvargid erinevad, kuid oluliselt pisemad massid. Aga elektromagnet- ja  
tugeva jõu kandjad, vastavalt  $\gamma$ -kvant (footon) ja 8 gluuonit, ei vastastik-  
mõjustu Higgsi väljaga või on see vastastikmõju mõõtmatult väike. Need  
osakesed liiguvad Higgsi väljas nagu tühjas vaakumis ning jäävad massi-  
ta. Et oma missiooni täita, peab Higgsi väli erineva kalibratsioonivälja-  
dest (jõuväljadest), mis on vektorväljad. Vastastikmõju vektorväljadega  
sõltub spinnist. Kui Higgsi väli oleks sarnaselt jõuväljadega vektorväli,  
sõltuksid osakestele tekitatud massid neid tekitava välja suunast. Et see  
nii ei ole, peab Higgsi väli olema skalaarväli.

#### 2.4. SÜMMEETRIA ISERIKKUMINE

Kas nüüd sellise Higgsi välja hüpoteesiga on osakeste vastastikmõju ka-  
libratsiooniteooria raskused ületatud: alusosakesed saavad ilma kalib-  
ratsioonisümmeetriat rikkumata neile vajalikud massid ning teooria on  
renormeeritav? Senitoodu põhjal me sellele küsimusele vastata ei oska.

Kalibratsiooniteooria loomise ajaks oli selgeks saanud, et looduse  
sümmeetriad ei pruugi igas olukorras otseselt peegelduda. Või, teisi-  
ti öelduna, ei ole nähtavad, vaid peidetud. Sel juhul öeldakse, et süm-  
meetria on spontaanselt, iseeneslikult rikutud. Nimetame seda ka ise-  
rikkumiseks. Toome siinkohal võib-olla juba tüütuseni kasutatud, aga  
seevastu lihtsalt arusaadava näite – kuulikese langemise muhkpõhjaga  
pudelisse. Pilt on sümmeetriline pöörete suhtes ümber pudeli kesktel-  
je. Kui kuulike jääks pidama põhjakõrgendikul, sümmeetria säiliks. Aga  
see asend pole stabiilne. Kuulike langeb põhjanõkku ja jääb seal täies-  
ti juhuslikku kohta seisma. Sümmeetriat on iseeneslikult rikutud. Pä-  
ris kaotsi pole see siiski läinud: peidetud kujul ta säilib. Pöörete suhtes  
sümmeetrilise põhjanõo iga punkt on võrdsetl võimalik kuulikese asu-  
koht. Sümmeetria ilmutab end, kui katsed kuulikeseaga korratakse väga  
palju kordi.

Looduse sümmeetriad väljenduvad teorias võrrandite sümmeetriatena. Võrrandid võivad olla küll sümmeetrilised mõne teisenduse suhtes, kuid lahendid teatud tingimustes mitte. Nii võib sümmeetria kaduda vaakumlahendis, kui on toimunud sümmeetria iserikkumine. Vastupidise variandina pole teooria algusest peale sümmeetriiline, sest juba võrrandites see puudub. Siis öeldakse, et sümmeetriat rikutakse otseselt. Vastastikmõjude kalibratsiooniteooria võrranditesse mitte millestki sõltuvat massi lisades rikutaksegi otseselt kalibratsioonisümmeetriat. Saab näidata, et Higgsi välja teooriat võib arendada nii, et seda sümmeetriat rikutakse vaid iseeneslikult. Inspiratsiooni sümmeetria iserikkumisega Higgsi väljaga teooria arendamiseks saadi tahkisefüüsikast, eriti ülijuhtivusest, aga ka ferromagnetismist. Neid nähtusi tutvustades kasutame kahe aasta taguses Eesti Füüsika Seltsi aastaraamatus kirjapanud [4].

Elektrit juhivad keskkonnad, kus on palju suhteliselt vabu elektrone. Temperatuuri alanedes teatud kriitilise tasemeni võib keskkonna sümmeetria meile juba tuntud elektrilaengu ruumi pöörete suhtes muutuda ebastabiilseks, kust alates rikutakse sümmeetriat. Elektrivoolu tekitavad elektronid hakkavad vastastikmõjustudes foononitega moodustama nn Cooperi paare, mis statistiliselt käituvad bosonitena, nii et ühte kvantolekusse mahub kuitahes palju paare. Sel põhjusel on Cooperi paaride süsteemi energia väiksem kui üksikelektronide süsteemil. Põhiolekus Cooperi paaride liigutamiseks enam jõudu vaja ei lähe, on tekkinud ülijuhtivus. Teatavasti indutseerib elektrilaengute liikumine (vool) magnetvälja, mis püüab voolu ennast tekitavat välja „kustutada“. Cooperi paaride vool tekitab sedavõrd tugeva magnetvälja, et see tõrjub tekitava välja suuremast osast ülijuhtivast keskkonnast välja. See jääb veel ainult õhukesse pinnakihti. Kuna välise, tekitava välja mõjuraadius Cooperi paaride väljas on väike, peab jõu kandjatel (footonitel) olema efektiivne mass.

Ferromagneetikutes korreleeruvad naaberaatomite teatud elektronide spinnid. Et „spinniv“ elektron käitub väikese magnetina, on spinnide vahel vastastikmõju, mis püüab spinne paralleelseteks pöörata – siis on süsteemi vaba energia kõige väiksem. Spinn–spinn vastastikmõju matemaatiline kuju on invariantne ruumipöörete suhtes. Kõrgematel temperatuuridel (energiatel) ei pääse spinnide vaheline jõud soojusliikumise tõttu mõjule ja spinnide suunad on ühtlaselt jaotunud. Temperatuuri langedes hakkab spinnide vastastikmõju ilmnema, alates teatud temperatuurist prevaleerima ning kui süsteem jõuab madalaima energiaga

olekusse, on kõik spinnid reastunud ühes suunas, mis tekitab makroskoopilise magnetmomendi. Võimalikke madalaima energia olekuid on lõpmata palju, kõikvõimalike spinnide reastussuundadega. Ühe võimaliku suuna valikuga iserikutakse (peidetakse) esialgset sümmeetriat. Kõikvõimalikud põhiolekud võib saada sellest ühest pöõrete tulemusest. Sellised on väga lihtsustatud pildid ülijuhtivusest ja ferromagnetismist.

Toome välja tähtsamad momendid sümmeetria iserikkumisel tahkisefüüsikas:

- süsteemi põhiolek on kõõdunud – neid on palju;
- mingil parameetril (temperatuur või muu) on kriitiline väärtus, mille ületamisel sümmeetriline kuju muutub ebastabiilseks ja millest alates toimub sümmeetria rikkumine;
- sümmeetria iserikkumisel on põhioleku väli nullist erinev.

Ameerika Ühendriikides töötav Jaapani teadlane Yoichiro Nambu uuris mitu aastat sümmeetria iserikkumist tahkistes. Ta tuli järeldusele, et ka elementaarosakeste kvantteoorias tuleb vaakumolekut vaadata mitte kui välja puudumist, vaid kui madalaima energiaga põhiolekut. Sel juhul võivad teatud omadustega väljad sümmeetria iserikkumisel minna nullist erineva väärtusega vaakumolekusse ja taolises vaakumväljas liikudes võivad massita osakesed massiivseks saada. Hiljem löid Peter Higgs ja teised sel viisil massi tekitamiseks vajaliku matemaatika, milles massi tekitavat mehhanismi hakati kutsuma Higgsi mehhanismiks. Pikemalt tuleb sellest juttu allpool, enam matemaatilises osas.

Selle osa lõpuks jääb veel öelda, et 1971. aastal näitas noor Hollandi teadlane Gerard 't Hooft, sel ajal veel doktorant, oma kahe üldse kõige esimese tööga, et Higgsi mehhanismiga seotud massiga kalibratsiooniteooria on renormeeritav. Renormeeritavuse tõestamine ei olnud kerge. Higgsi välja sissetoomine teoriasse lisab senise teooria lõpmatuste reale Higgsi väljaga seotud lõpmatuste rea. Keerukat arvutiprogrammi kasutades õnnestus 't Hooftil näidata, et nende kahe rea kõik lõpmatustega liikmed summeeruvad nulliks.

## **2.5. MASS ILMA HIGGSITA**

Valdavalt arvatakse/loõdetakse, et Higgsi boson CERNi Suure Hadronite Põrguti (LHC) katsetes tõenäõliselt leitakse. Isekõsumus on, kas leitud Higgsi osake tuleneb Standardmõdeliga ennustatud mehhanismist või



mõnest väljapoole Standardmudelit jäävast mudelist või siis hoopis mõnest seni uurimata võimalusest.

Küll aga võib juhtuda, et LHC katsed Higgsi olemasolu ei kinnita. Osa spetsialiste, nagu John Ellis [2], ongi väga optimistlikke Higgsi bosoni avastamise ootajaid hoiatanud võimaliku pettumuse eest. Need hoiatajad ei ole pessimistid, vaid pigem realistid. Ka nemad ootavad Higgsi bosoni püüdmist, kuid samal ajal on valmis ka vastupidiseks tulemuseks, kuna senine asjade käik erilist põhjust optimismiks ei anna. Esialsed stsenaariumid väga kerge Higgsi bosoniga ei leidnud katselist kinnitust. Seepärast mindi ikka kõrgema ja kõrgema Higgsi massiskaala juurde. Aga ka kõrgematel energiatel pole edu olnud. Ei 2000. aasta detsembris LHC ehitamiseks oma tunneli loovutama pidanud, siis juba 209 GeV-se elektroni-positroni põrkeenergiaini jõudnud LEP (*Large Electron-Positron Collider*) ega ka enne LHC käikulaskmist võimsaim, praegugi 2 TeV-se (teraelektronvoldise) prootoni-antiprootoni põrkeenergiaga USA-s Fermilabis töötav Tevatron pole Higgsi bosonit „näinud“. Kuid viimastel aastatel „ravikuuri“ läbi teinud Tevatronil läheneb Higgsi bosoni tekitamise tõenäosus juba 1995. a samal pörgutil avastatud t-kvargi omale ja väga intensiivselt töötades on personal teinud kõik, et Higgsi bosoni püüdmise võidujooksus LHC kolleege ennetada.

LHC on seni vaid osalise võimsusega töötanud ja jätkab poole võimsusega tööd ka 2011. aastal. Disainitud parameetrite kontrollimise ja detektorite seadistamise kõrval on ka teadusinformatsiooni saadud. Vihjeid Higgsi bosonile aga pole. Kui LHC ka täisvõimsusega, 14 TeV-se põrkeenergiaga töötades Higgsi ei leia, peab teooriaga midagi viltu olema. Aga mis võiks viltu olla?

Et elektronõrga vastastikmõju kalibratsiooniteooria on katsega heas kooskõlas, on kahju teooriast tervikuna loobuda. Arvatakse, et teooria on kuni Higgsi välja sissetoomiseni õige. Invariantsusnõue lokaalsete faasiteisenduste suhtes matemaatilistes ruumides tekitab massita osakestega vastastikmõjuga teooria ja miski peab seda sümmeetriat iseneslikult rikkuma. Miski, mis pole Standardmudeli või sellega väga lähedane Higgsi väli. Higgsi välja kvantidel – Higgsi bosonitel – on spetsiifilised omadused. Need peavad olema laenguta ja spinnita (skalaarsed). Kui selliste omadustega Higgsi bosonit ei leita, võib Higgsi väli ja-gada kunagise maailmaetri saatust.

On palju teooriaid, mis seletavad elektronõrga sümmeetria rikku-mist teistmoodi, igaüks isemoodi oma eeliste ja probleemidega. Neist

tuntumad on Supersümmeetria ja Tehnovärvi teooria. Mõlemad toovad teoriasse hulgaliselt uusi osakesi. Supersümmeetrias on igal seni tuntud osakesel tema supersümmeetriline partner, mille spinn erineb tema omast  $1/2$  võrra, kuid ülejäänud parameetrid on samad. Et selliseid partnereid pole leitud, peavad neil olema väga suured massid – supersümmeetria on tugevasti rikutud. Aga meie loo seisukohalt on tähtis, et supersümmeetria ennustab mitmeid Higgsi asendavaid osakesi, sealhulgas ka laetuid. Tehnovärvi teooria ennustab muu hulgas lisaks kvarkidele uusi osakesi – tehnoquarke. Analoogselt kvarkidele ja antikvarkidele, mis kombineeruvad mesoniteks, kombineeruvad tehnoquark ja anti-tehnoquark tehnomesoniteks, millest üks võibki asendada Higgsi bosonit.

Aga Higgsi bosonit võib asendada veel miski, mis erineb senistes teooriates käsitletutest ja mille arendamisele ei ole seni küllaldast tähelepanu pööratud. Üht niisugust matemaatikast lähtuvat mudelit tutvustame meie loo lõpupeatüki.

### **3. LIITOSAKESTE MASSID ELEMENTAAROSAKESTE FÜÜSIKAS**

#### **3.1 LIITOSAKESE MASSI MOODUSTUMINE**

Liitosake on koostis- ehk struktuuri-osakeste seotud seisund. Kui jätta kõrvale seni veel hüpoteetilised eksootilised alusosakeste ühendused, siis liitosakesteks elementaarosakeste füüsikas on kvarkide seotud seisundid, mida hadroniteks kutsutakse. Enne kvargihüpoteesi ja kvarkide avastamist tuntud liitsüsteemid nagu molekulid, aatomid ja aatomituumad on struktuuriga osakeste seotud seisundid ehk teisisõnu, seotud seisundite seotud seisundid, mis on pigem molekulaar-, aatomi- või tuumafüüsika kui elementaarosakeste füüsika uurimisobjektideks. Kuna aga kvarkide seotud seisundid erinevad omadustelt suuresti struktuuriga osakeste seotud seisunditest, tuletame enne nendest rääkimist viimaste omadusi põgusalt meelde.

Koostisosakeste vahel valitsevate jõudude tõttu on liitosakese mass väiksem kui koostisosakeste masside summa vabas olekus mõõdetuna. Seda vahet kutsutakse massidefektiks või seoseenergiaks. Vaatame, kuidas seoseenergia tekib. Liikugu teineteisele vastu kaks vastasmärgi-

lise elektrilaenguga osakest. Kui osakesed on veel üksteisest kaugel, siis nende vahel olevad elektriväljad ei mõjuta teineteist. Osakeste lähenedes hakkavad nende väljad kattuma ja väljade koguenergia väheneb. Lõpuks jääb kahe laengu vahele vaid väike ala, kus väljad liituvad. Sobiva suhtelise liikumisenergiaga osakesed jäävad seotuks. Need liiguvad teineteise lähedal ja nende liitvälja energia on väiksem koostisosakeste väljade energiatega summast mõõdetuna vabas olekus.

Seotud osakeste lahkuviimiseks tuleb süsteemile väljastpoolt seoseenergia võrra energiat juurde anda. Tegelikult pole seoseenergia täpselt võrdne vabas olekus koostisosakeste väljade summa ja seotud oleku liitvälja energia vahega. Seotud osakestel on kineetiline energia ja selle võrra võib nende vabastamiseks vajalikku energiat vähendada. Samamoodi võib vaadata enam kui kahest koostisosakesest koosnevat liitosakest.

Pilt on samasugune ka gravitatsioonijõududega koos hoitavate taevakehade, samuti aatomite ja nende tuumadega. Erinevad on vaid seoseenergiatega suhtelised suurused. Päikesesüsteemi mass on umbes triljondiku võrra väiksem Päikese ja tema ümber tiirutavate planeetide ning teiste taevakehade masside summast. Vesiniku aatom kaalub umbes miljondiku vähem kui prooton ja elektron eraldi võetuna kokku. Prootonit ja neutronit tuumajõuga koos hoitav süsteem – deutron – on jämedalt võttes tuhandiku võrra kergem kui vabad prooton ja neutron kokku. Ülaltoodust järeldub, et liitosakese massiks liituvad seotud osakeste massid, nende kineetiline energia ja liitosakese sees oleva välja energia, kusjuures lõviosa neist kolmest massi allikast panustavad koostisosakeste massid.

Seevastu eriline ja tavatu on tugev ehk värvijõud, mis kvarke liitosakesetes kinni hoiab. Värvijõud väheneb värvilaengutega kvarkide lähenemisel üksteisele ja suureneb nende kaugenemisel. Selline kummaline jõud ei lase kvarke hadronitest välja. Vabade kvarkide masse ei saa mõõta, sest vabu kvarke ei olegi. Saab mõõta vaid hadronites olevate kvarkide masse.

Kuidas üldse saab näiteks prootoni sisemust kombata? Tuleb seda pommitada alusosakestega, millest sobivaim on kiirendiosake elektron, või põrgatada teise prootoniga või antiprootoniga. Viimast tehakse Ameerikas Tevatronil, prootoneid põrgatatakse CERN-i Suurel Hadronite Põrgutil. Kõrgetel energiatel ei põrku liitosakesed kui tervikud. Põrkuvad nende koostisosakesteks olevad alusosakesed. Nii põrkub ühe prootoni mingi kvark teise prootoni kvargi või gluoniga või põrkuvad ühe ja teise prootoni mingid gluonid omavahel. Suure energiaga elektron

ei pörku samuti prootonilt kui tervikult, vaid mõnelt tema kvargilt. Kui elektron on footoni kaudu elektromagnetilises vastastikmõjus kvargiga, muutub tema liikumissuund ja energia. Mõõtes neid muutusi, saab teavet selle kohta, milline on kvark, kui suur on kvargi mass. Just elektroni põrked prootonite ja neutronitega olid esimesed, millest kvarkide masse mõõdeti. Tuli välja, et kvarkide massid moodustavad ainult umbes 1% prootonite või neutronite massidest!

Kust siis tulevad põhipanused hadronite ja teiste (prootonite, neutronite) massidesse? Nagu struktuuriga osakeste seotud seisunditel, pole ka siin rohkem panustavaid allikaid kui koostisosakeste massid ning kineetilised energiad ja hadronite sees olevate väljade energiad. Ainult nüüd on erinevate allikate osakud teisiti jaotunud. Vaatame prootonit. Et prootonid on tuumast väiksemad (läbimõõdud vastavalt  $10^{-14}$  ja  $10^{-15}$  meetrit), peavad nende koostisosakestel – kvarkidel – Heisenbergi määramatuse seose järgi olema suuremad impulsid ja siis ka kineetilised energiad kui nukleonidel aatomi tuumas. Teisalt on värviväljad prootonis tugevad ja nende energiad suured. Värvivälja kvantideks on massita gluonid. Väljaenergia on gluonite energia. Kuid mitte ainult. Kvarke koos hoidvad virtuaalsed gluonid tekitavad omakorda virtuaalseid kvargi-antikvargi paare, peamiselt kergematest, u- ja d-kvarkidest ( $u\bar{u}$ ,  $d\bar{d}$ ). Kvargipaarides olevate kvarkide eristamiseks reaalsetest koostiskvarkidest nimetatakse viimaseid valentskvarkideks ja virtuaalseid kvarke merekvarkideks. Ka merekvarkide massid ja liikumisenergiad annavad panuse prootoni massi.

Prooton koosneks vaid kolmest valentskvargist (kahest u- ja ühest d-kvargist), kui kvargid oleksid vabad. Reaalsuses aga prevaleerivad prootonis kvarke kinni hoidvad gluonid. Et neid on palju ja nad panustavad prootoni massi kõige suurema osa, poleks vale ka väita, et prooton koosneb gluonitest. Prootoni struktuur ei ole püsiv. Gluonid tekivad ja kaovad. Nende ja nende tekitatud merekvarkide arv muutub pidevalt. Kuigi valentskvarkide arv jääb samaks, muudavad nad värvilaengutega gluoneid kiirates ja neelates pidevalt oma värvilaenguid, ehk nagu lühemalt öeldakse, värvi. Kuid on hadroneid, kus ka valentskvarkide arv muutub, tehes hadroni vahepeal koguni kvargituks. Selline on  $\rho^0$ -meson, mille valentskvarkideks on kerge kvark ja vastav antikvark. Need võivad omavahel annihileerudes tekitada värvilaenguteta virtuaalseid „gluonibukette“, jättes lühikeseks ajaks mesoni kvarkideta.

Nagu ülaltoodust näha, on alusosakeste seotud seisundid – hadronid

– kameeleonina värvi vahetavate tohutu kiirusega liikuvate kvarkide ja pidevalt oma arvukust muutvate gluonite ja merekvarkide kogumik. Seepärast on mõned popularisaatorid võrrelnud hadroneid tormiga veeklaasis. Ainult et selle „klaasi“ mõõtmed võrreldes veeklaasiga on tohutult väiksemad kui veeklaasi mõõtmed võrreldes ookeanidega, kus orkaanid laineid pillutavad.

### 3.2. TUGEVA JÕU MÕJURAADIUS JA KVARKVANGISTUS

Võlgname siinkohal ühele küsimusele enamselgitava vastuse kui eelpool antud. Kuni tugeva jõu kalibratsiooniteooria tekkeni valitses arusaam, et lühikese mõjuraadiusega jõudu kannavad vaid massiivsed vaheosakesed. Kuid tugeva jõu kalibratsiooniteooria – kvantkromodünaamika – tuleb toime massita vaheosakestega. Miks see nii on? Vastust tuleb otsida tugeva jõu eripärasusest. Vastastikmõjude seosekonstandid, mille põhiosaks on laengud, pole tegelikult konstandid, vaid sõltuvad energiast, ehk, mis on ekvivalentne, kaugusest, kust nad mõjuvad.

Elektrilaeng pidevalt kiirgab ja neelab virtuaalseid footoneid, mis vahepeal võivad omakorda muutuda virtuaalseteks elektroni–positroni paarideks, tekitades nendest laengu ümber „kasuka“. Sellest kasukast tõmbab laeng vastasmärgilisi laenguid enda poole ja tõukab samamärgilisi eemale ning tekib varjestus, mis vähendab laengu enda efektiivset suurust. Kui „liikuda“ laengule lähemale, jääb ikka enam ja enam varjestavast kasukast „selja taha“, ning laengu efektiivne väärtus suureneb. Selline on elektrilaengu „jooksusuund“.

Värvilaeng kiirgab ja neelab virtuaalseid gluoneid, mis võivad muutuda kvargi–antikvargi paarideks. Nende paaride mõju annab värvilaengule elektrilaenguga sama „jooksusuuna“. Kuid et gluon kannab ka värvilaenguid, on nende vahel omamõju, mistõttu gluon võib sarnaselt kvargipaaridele ka gluonipaare tekitada. Arvutused näitavad, et nende mõju on vastupidine kvargipaaride omale: nad vähendavad efektiivset värvilaengut lähenedes ja suurendavad kaugenedes. Kui kvarkide arv ei ole suurem kui kuusteist,<sup>4</sup> prevaleerib gluonipaaride mõju ja värvilaeng „jookseb“ teistpidi kui elektrilaeng. Sellise „jooksuga“ värvilaengute korral kasvab kvarkide vaheline jõud nende üksteisest kaugenemisel ja see hoiab kvargid vangidena hadronites. Nähtust

4 See on realistlik tingimus, sest praegu on kolmes peres kokku kuus kvarki.

nimetataksegi kvarkvangistuseks. Üksteise lähedal olles on kvarkide vahel mõjuva tugeva jõu seosekonstant palju väiksem kui 1, mis võimaldab selles piirkonnas rakendada ka tugeva jõu korral häiritusarvutust.

### 3.3. MASS KUI „SISEMINE“ ENERGIA

Nagu pöördimpulsile kui välimisele vaadeldavale vastab spinn kui „sisemine“ vaadeldav, saab ka massi vaadata kui „sisemist“ energiat. Illustreerimaks eelpool toodud, üks väike mõtteline eksperiment selle kohta, et osakese/süsteemi mass võib olla määratud dünaamikaga/vastastikmõjuga ja kinemaatikaga, on järgmine. Kahest võrdse energiaga  $E$  footonist koosneva süsteemi mass on null, kui footonite impulsid on samasuunalised, ja  $2E$ , kui footonite impulsid on vastassuunalised. Et aga footoni mass on null, siis süsteemi mass  $2E(\neq 0)$  ei moodustu komponentide massidest – süsteemis ei ole materiat/ainet, on energia. Seega klassikalisel mõistel „sisemine“ mass ei ole tähendust, nii nagu ka relativistlikul massil ei ole füüsikalist tähendust [1].

## 4. MASSI MATEMAATIKA

Niipalju siis sõnulseletatult massist elementaarosakeste füüsikas. Alljärgnevalt püüame sõnulseletamatut seletada matemaatika abil, kasutades põhiliselt Lagrange'i formalismi.

Lagranžiaanid (või Lagrange'i tihedused, Itaalia matemaatiku ja astronoomi Giuseppe Ludovico Lagrangia ehk Joseph Louis Lagrange'i (1736–1813) auks) määravad kogu teooria, seega ka kõik vaadeldavad suurused. Lagranžiaane eelistatakse peamiselt seetõttu, et need on Lorentzi skalaarid. Lagranžiaanide invariantus Lorentzi teisenduse suhtes tagab teooriaga ennustatu invariantuse. Lagranžiaanis esindavad aine alusosakesi Diraci bispiinorid, välja- ehk kalibratsiooniosakesi Lorentzi nelivektorid ja Higgsi välja reaalsed ja kompleksed Lorentzi skalaarid.

Nii on reaalse skalaarvälja  $\varphi$  lagranžiaan

$$L = \frac{\hbar^2}{2} (\partial_\mu \varphi)(\partial^\mu \varphi) - \frac{m^2 c^2}{2} \varphi^2, \quad (1)$$

kompleksse ja mitmekomponendilise skalaarvälja  $\varphi$  lagranžiaan aga

$$L = \hbar^2 (\partial_\mu \varphi)^\dagger (\partial^\mu \varphi) - m^2 c^2 \varphi^\dagger \varphi \quad (2)$$

$(A^\dagger = (A^*)^T$  on transponeeritud kaaskompleksmaatriks). Mõlemast tuleb Kleini–Gordoni võrrand

$$\hbar^2 \partial_\mu \partial^\mu \varphi + m^2 c^2 \varphi = 0. \quad (3)$$

Diraci spiinorvälja  $\psi$  lagranžiaan on

$$L = c \bar{\psi} (i \hbar \gamma^\mu \partial_\mu - mc) \psi, \quad (4)$$

millest tulevad Diraci võrrandid  $\psi$  ja  $\bar{\psi} = \psi^\dagger \gamma^0$  jaoks,

$$i \hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi - mc \psi = 0, \quad i \hbar \partial_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu + mc \bar{\psi} = 0. \quad (5)$$

Selle lühikese sissejuhatuse lõpuks rõhutame, et mõlema lagranžiaani teise, massiliikme ees on miinusmärk, mis järgnevas osutub väga oluliseks.

#### 4.1. ELEKTRONÕRGA JÕU KALIBRATSIOONITEOORIA

Nagu eelpool öeldud, ei saa arendada eraldi, üksteisest sõltumatult, elektromagnetjõu ja nõrga jõu kalibratsiooniteooriaid. Elektromagnetjõu ja nõrga jõu kujud ja nende kandjad saab tuletada kombineeritud matemaatilisest ruumist, millest üks on kahedimensionaalne ja teine ühedimensionaalne. Esimest nimetatakse nõrgaks isotoopiliseks ruumiks ja teist nõrga hüperlaengu ruumiks. Isotoopilise ruumi mõiste tõi tugeva jõu teooriasse juba Saksa füüsik Werner Heisenberg. Üliväikest massierinevust arvestamata langevad kõik prootonit ja neutronit iseloomustavad suurused kokku, välja arvatud üks. Prootonil on elektrilaeng, neutronil mitte. Tugeva jõu sõltumatus elektrilaengust viis Heisenbergi mõttele, et prooton ja neutron on ühe osakese – nukleoni – kaks erinevat seisundit. Idee realiseerimiseks oli vaja defineerida sisemine ruum, (tugev) isoruum, kus nukleonil on kaks erinevat seisundit: suund „üles“ on prooton, suund „alla“ on neutron. Vahepealsetes olekutes ei ole nukleon ei prooton ega neutron, vaid nende kvantmehaaniline segu. Katsetes avaldub nukleon vaid enda omaseisundina – prootoni või neutronina. Kõik see on tuttav spinn-1/2 teoorias, kust ka nimi – isospinn. Protoni-neutroni isodubletti – nukleoni

$$N = \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix} \quad (6)$$

võib faasiteisendusega pöörata isotoopilises ruumis,

$$N \rightarrow N' = \begin{pmatrix} p' \\ n' \end{pmatrix} = e^{i\vec{\alpha} \cdot \vec{\sigma}/2} \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$\vec{\alpha} \cdot \vec{\sigma} = \alpha_1 \sigma_1 + \alpha_2 \sigma_2 + \alpha_3 \sigma_3$ , kus  $\alpha_i$  on pöörde parameetrid ja  $\sigma_i$  -d on Pauli maatriksid. Kõik pöörded isoruumis moodustavad rühma,  $SU(2)$ .

Tugev isospinn on ka praegu „kääbel“, kuid võib-olla on tähtsam, et sellest võeti malli nõrga isoruumi ja isospinni mõisteks. On ju ka Standardmudeli aineosakesed antud dublettidenä (vt joonis 1). Oletame, et eksisteerib nõrk isoruum

$$\psi = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \quad (8)$$

kus dublett  $(a, b)^T$  on üks võimalikest paaridest  $(\nu, e)^T, (u, d)^T, \dots$ . Nõuame, et teooria oleks invariantne lokaalse faasiteisenduse

$$\psi \rightarrow \psi' = e^{ig_2 \vec{\alpha}(x) \vec{\sigma}/2} \psi \quad (9)$$

suhtes, kus konstant  $g_2$  määrab jõu intensiivsuse ehk  $SU(2)$ -laengu. Vaba dubletti kirjeldav lagranžiaan pole selle teisenduse suhtes invariantne. Invariantust rikuvad kolm tuletisliiget – tuletised parameetritest  $\alpha_1(x)$ ,  $\alpha_2(x)$  ja  $\alpha_3(x)$ . Nende kõrvaldamiseks läheb vaja kolmekomponendilist kalibratsioonivälja  $\vec{W}_\mu$ , mis viiakse lagranžiaani nn pika tuletisega

$$D_\mu = \partial_\mu + \frac{ig_2}{2\hbar} \vec{\sigma} \cdot \vec{W}_\mu. \quad (10)$$

Kalibratsioonivälja  $\vec{W}_\mu$  peab teisenema nii, et lagranžiaan oleks invariantne: et pikk tuletis kommuteeruks lokaalse faasiteisendusega, nii nagu tuletis konstantse faasiteisendusega. Niisiis

$$D_\mu \psi' = e^{ig_2 \vec{\alpha}(x) \vec{\sigma}/2} D_\mu \psi. \quad (11)$$

Sellest võrrandist  $\vec{W}_\mu$  vajaliku teisenduseeskirja leidmine on lihtsam, kui  $\vec{\alpha}(x)$  asemel kasutada infinitesimaalset teisendusnurka  $\vec{\epsilon}(x)$ , sest pidevatel teisendustel summeerub koguteisendus infinitesimaalsetest. Arvutuskäiku esitamata kirjutame ainult lõpptulemuse:



$$\vec{W}_\mu \rightarrow \vec{W}'_\mu = \vec{W}_\mu - \partial_\mu \vec{\varepsilon}(x) - \mathbf{g}_2 \vec{\varepsilon}(x) \times \vec{W}_\mu. \quad (12)$$

Tuletisliige on siin tuttav footonvälja  $A_\mu$  kalibratsiooniteisendusest, teine liige aga tuntud vektorite teisenduseeskiri, näitamaks et  $\vec{W}_\mu$  on tõesti nõrga isospinni vektor. Et teooria oleks täielik, tuleb lagranžiaanile lisada ka vaba kalibratsioonivälja kineetilise energia liige. Abeli kalibratsioonis ehk kvantelektrodünaamikas on selleks liige  $-F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} / 4\mu_0$ , kus

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu. \quad (13)$$

Kas võtta selle eeskujul ka siin väljatugevustensoriks

$$\vec{W}_{\mu\nu} = \partial_\mu \vec{W}_\nu - \partial_\nu \vec{W}_\mu? \quad (14)$$

Kuigi  $\vec{W}_{\mu\nu}$  on Lorentzi tensor, ei ole see isoruumi vektor, kuna ei teisene nagu viimane liige valemis (12). Et  $\vec{W}_{\mu\nu}$  oleks isoruumi vektor, tuleb valemis (14) paremale poolele lisada täiendav, kalibratsiooniväljade omamõju liige:

$$\vec{W}_{\mu\nu} = \partial_\mu \vec{W}_\nu - \partial_\nu \vec{W}_\mu - \mathbf{g}_2 \vec{W}_\mu \times \vec{W}_\nu. \quad (15)$$

Nii tuleb invariantusnõudest lokaalsete pöörete suhtes isoruumis teooriasse kolm kalibratsioonivälja, vastavalt kolmele isoruumi komponendile väljad  $W_\mu^1$ ,  $W_\mu^2$  ja  $W_\mu^3$ . Neljas kalibratsiooniväli tuleb hüperlaengu ruumi pööretest. Nõrk hüperlaeng  $Y$  defineeritakse elektrilaengu ja isospinni kombinatsioonina

$$Y = 2(Q - I_3), \quad (16)$$

kus  $Q$  on elektrilaengu operaator ja  $I_3$  on isospinni kolmas komponent.

Invariantusnõudest lokaalsete faasiteisenduste  $e^{ig_1\beta(x)Y}$  suhtes hüperlaengu ruumis tuleb valemiga (10) antud pikka tuletist veelgi pikendada:

$$D_\mu = \partial_\mu + \frac{ig_2}{2\hbar} \vec{\sigma} \cdot \vec{W}_\mu + \frac{ig_1}{2\hbar} Y B_\mu, \quad (17)$$

kus  $g_1$  on  $U(1)$ -laeng. Hüperlaengu ruumi faasiteisendustega kaasneb  $B_\mu$  kalibratsiooniteisendus

$$B_\mu \rightarrow B'_\mu = B_\mu - \hat{\partial}_\mu \beta(x). \quad (18)$$

Et isoruum pole nõrga laengu ruum ja hüperlaengu ruum pole elektrilaengu ruum, ei ole kalibratsiooniväljad  $W_\mu^1$ ,  $W_\mu^2$  ja  $W_\mu^3$  nõrka jõudu

vahendavateks väljadeks, samuti ei ole  $B_\mu$  elektromagnetväli. Osutub, et õiged kalibratsiooniväljad on nende lineaarsed kombinatsioonid:

$$W_\mu^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}}(W_\mu^1 \mp iW_\mu^2), \quad Z^\mu = \frac{-g_1 B_\mu + g_2 W_\mu^3}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}}, \quad A_\mu = \frac{g_1 W_\mu^3 + g_2 B_\mu}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}}. \quad (19)$$

Lokaalne kalibratsiooniinvariantsus määrab lagranžiaanis vastastikmõju liikmed algselt vabade väljade  $\psi$  ja kalibratsiooniväljade  $\tilde{W}_\mu$  ja  $B_\mu$  vahel. Koos lisatud kalibratsiooniväljade kineetilise energia liikmetega saabki (vastastikmõjudega) kalibratsiooniinvariantse lagranžiaani. Kuid Standardmudelis elektronõrka jõudu kirjeldav lagranžiaan see veel ei ole. On palju lagranžiaane, kuid nende esitamine ja seletamine nõuaks liigselt leheruumi ja mõjaks tüütavalt. Seetõttu me kõiki neid ei vaatle. Küll aga seletame nende vajalikkust.

#### 4.2. VASAKU- JA PAREMAKÄELISUS JA MASSITUS

Nagu juba eespool mainitud, on kõikidel aineosakestel ühesuurused 1/2-spinnid. 1/2-spinnil on kaks võimalikku orienteerumissuunda, milleks relativistlikus füüsikas tuleb võtta osakese liikumissuund (impulsi suund) või vastassuund. Diraci teoorias võib  $\gamma_5$  maatriksit kasutades spiinorvälja  $\psi$  lahutada kaheks osaks,

$$\psi = \frac{1}{2}(1 - \gamma_5)\psi + \frac{1}{2}(1 + \gamma_5)\psi = \psi_L + \psi_R. \quad (20)$$

$\frac{1}{2}(1 - \gamma_5)$  on operaator, mis projekteerib  $\psi$ -st välja impulsile vastassuunalise spinni ja  $\frac{1}{2}(1 + \gamma_5)$  projekteerib välja impulsisuunalise spinni. Selliste spinni suundadega osakesi nimetatakse vastavalt vasakukäelisteks (ingl. *left-handed*) ja paremakäelisteks (*right-handed*) osakesteks. Siit ka inglise keelest tulenevad indeksid  $L$  ja  $R$ . Elektromagnetilise ja tugeva jõu protsessides käituvad erikäelised osakesed ühte viisi. Kuid nõrk jõud eelistab vasakukäelisi osakesi. Nõrga jõu protsessides käituvad vasaku- ja paremakäelised osakesed – nii leptonid kui kvargid – erinevalt, tekitades asümmeetria.

Enamus inimesi on paremakäelised. Osakestest eelistab loodus aga vasakukäelisi. Nii nagu paremakäeliste ja vasakukäeliste inimeste tööriistad on erinevad, on osakestefüüsika „tööriist“ – matemaatika – erinev vasakukäelistele ja paremakäelistele osakestele. Vasakukäelised osakesed on nõrga isospinni  $SU(2)$  dubletid, paremakäelised – singletid

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} v_e \\ e \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} v_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} v_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L, Y = -1, & \quad e_R, \mu_R, \tau_R, \quad Y = -2, \\
\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L, Y = +1/3, & \quad u_R, c_R, t_R, \quad Y = +4/3, \\
& \quad d'_R, s'_R, b'_R, \quad Y = -2/3,
\end{aligned} \tag{21}$$

seejuures igal isoruumil on oma hüperlaeng.<sup>5</sup> Sellest tulenevalt on iga viie erineva isoruumi lagranžiaanis pikk tuletis erinev. Nüüd veel üks vajalik selgitus. Väitsime, et kalibratsiooniteooria nõuab massita alusosakesi. Tegelikult saaks arendada ka massiivsete aineosakestega kalibratsiooniteooriat, kui vaid poleks käelisuse asümmeetriat. Kui lahutame Diraci lagranžiaanis

$$L = c\bar{\psi}(i\hbar\gamma^\mu D_\mu - mc)\psi \tag{22}$$

spiinorid vasaku- ja paremakäelisteks, saame

$$L = i\hbar c\bar{\psi}_L\gamma^\mu D_\mu\psi_L + i\hbar c\bar{\psi}_R\gamma^\mu D_\mu\psi_R - mc^2\bar{\psi}_L\psi_R - mc^2\bar{\psi}_R\psi_L. \tag{23}$$

Et massiliikmes teiseneb  $\psi_L$  kui nõrga isospinni dublett,  $\psi_R$  aga kui singlett, siis ei ole massi liige lokaalsete faasiteisenduste suhtes invariantne ja mass tuleb paratamatult nulliks võtta.

Massiliikme mitteinvariantsust võib ka veidi teisest vaatenurgast lähedes põhjendada. Valem (23) näitab, et massiliikmes toimuvad üleminekud vasaku- ja paremakäeliste seisundite vahel ilma mingit osakest vahetamata. See pole füüsikaliselt võimalik.

Siin tuleb Higgsi väli mängu. Vaja läheb vaheseisundit, mis oleks vasakukäeline dublett, kuid ilma spinnita. Siis saaks siduda vasaku- ja paremakäelised seisundid selle seisundiga ja lagranžiaanile massipanuse na liita, lootes, et niisugune panus annab fermionidele vajalikku massi. Nn Yukawa-panused nagu

$$L_{\text{Yu}} = -g_{\text{Yu}}(\bar{\psi}_L\varphi\psi_R + \bar{\psi}_R\varphi^\dagger\psi_L) \tag{24}$$

täidavad seda otstarvet, kui  $\varphi$  on skalaarne kompleksne dublett,

5 Indeks prim tähendab, et kvargid on tegelikult segunenud.  $d$ ,  $s$  ja  $b$  on massiolekud,  $d'$ ,  $s'$  ja  $b'$  on nõrga vastastikmõju olekud (s.o nõrgas vastastikmõjus osalevad olekud). Kui ignoreerida segunemist kolmanda pere kvargiga ( $b$ -kvargiga), mis on väike, võib kirjutada  $b' = b$ ,  $d' = d \cos \theta_c + s \sin \theta_c$ ,  $s' = s \cos \theta_c - d \sin \theta_c$ , kus  $\theta_c$  on Cabibbo nurk. Kuigi Cabibbo nurk on väike, mistõttu esimeses peres „istub“ peamiselt  $d$ -kvark ja teises  $s$ -kvark, võib vahel harva esimese pere liikmeks olla  $d$ -kvargi asemel  $s$ -kvark ja teises  $s$ -kvargi asemel  $d$ -kvark.

$$\varphi = \begin{pmatrix} \varphi^+ \\ \varphi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \varphi_1 + i\varphi_2 \\ \varphi_3 + i\varphi_4 \end{pmatrix} \quad (25)$$

Niisugune väli ongi Higgsi väli.

### 4.3. GLOBAALSE FAASISÜMMEETRIA ISERIKKUMINE

Higgsi välja lagranžiaan on Kleini–Gordoni lagranžiaan (valem (2)),

$$L = \hbar^2 (\partial_\mu \varphi)^\dagger (\partial^\mu \varphi) - V(\varphi), \quad (26)$$

kus esimene liige on kineetilise energia liige ja teine, potentsiaalse energia osa on

$$V(\varphi) = \kappa \varphi^\dagger \varphi + \lambda (\varphi^\dagger \varphi)^2. \quad (27)$$

Potentsiaalse energia avaldise teine liige kirjeldab välja omainteraktsiooni (omamõju) intensiivsusega  $\lambda$ . Potentsiaali altpoolt piiramiseks peab  $\lambda > 0$  olema. Välja aste avaldises ei tohi olla neljast suurem, sest vastasel juhul need liikmed genereerivad vaadeldavates suurustes lõpmatusi. Potentsiaali esimeses liikmes võib parameeter  $\kappa$  olla kas positiivne või negatiivne. Esimesel juhul on ta massiparameeter  $\kappa = m^2 c^2$ , teisel mitte. Elementaarosakeste väljateoorias on süsteemi põhiolekuku vaakum ja selle ergastused on osakesed. Süsteemi energia on minimaalne, kui kineetiline ja potentsiaalne energia on eraldi minimaalsed. Kineetiline energia on minimaalne (null), kui väli  $\varphi$  on konstantne. Lagranžiaani vaakumoleku määramiseks tuleb leida potentsiaalse energia miinimum või miinimumid.

Kui kirjutame potentsiaali (27) lahti, siis

$$V(\varphi) = \kappa |\varphi|^2 + \lambda |\varphi|^4 = \frac{\kappa}{2} (\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2 + \varphi_4^2) + \frac{\lambda}{4} (\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2 + \varphi_4^2)^2. \quad (28)$$

Näeme, et kui  $\kappa > 0$ , annab võrrand välja potentsiaalse energia miinimumiks null ja miinimumis väli puudub ( $\varphi = 0$ ), ning  $\varphi$  on tavaline skalaarne väli (vt pidevat kõverat joonisel 2). Kui  $\kappa < 0$ , on potentsiaal antud joonisel 2 toodud katkendliku kõveraga: punktis  $\varphi = 0$  on lokaalne ebastabiilne maksimum. Energia on minimaalne välja mooduli  $|\varphi| = (\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2 + \varphi_4^2)^{1/2}$  väärtusel

$$v = \sqrt{-\frac{\kappa}{\lambda}} > 0. \quad (29)$$

See tähendab, et kõik punktid  $\varphi_0$ , mis on nullpunktist kaugusel  $v$ , on miinimumid sama väärtusega

$$V(\varphi_0) = -\frac{\lambda v^4}{4}. \quad (30)$$

Selguski, et kui  $\kappa < 0$ , siis väli vaakumis ei ole null, vaid on kindlate nullist erinevate väärtustega. Vaakum on kõdunud ja kõik energia miinimumid on raadiusega  $v$  neljamõõtmelise hüperkuuli pinnal võrdsed. Summat kõikidest miinimumidest nimetatakse vaakumi keskväertuseks, mis on null. Nüüd aga tuleb valida miinimumidest üks, ütleme, et  $\varphi_{30} = v$  ja  $\varphi_{10} = \varphi_{20} = \varphi_{40} = 0$ , ja uurida olukorda potentsiaali  $V(\varphi)$  ümbruses. Selleks kasutame uusi skalaarvälju  $h_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) nii, et<sup>6</sup>

$$\varphi_3 = v + h_3, \quad \varphi_i = h_i \quad (i = 1, 2, 4) \quad (31)$$

ja  $h_i$  vaakumväärtused  $\langle 0 | h_i | 0 \rangle = 0$ . Asendades lagranžiaan  $\varphi_i$ -d valemist (31) ja  $\kappa = -\lambda v^2$  valemist (29), tekitame globaalse faasisümmeetria iserikkumise:

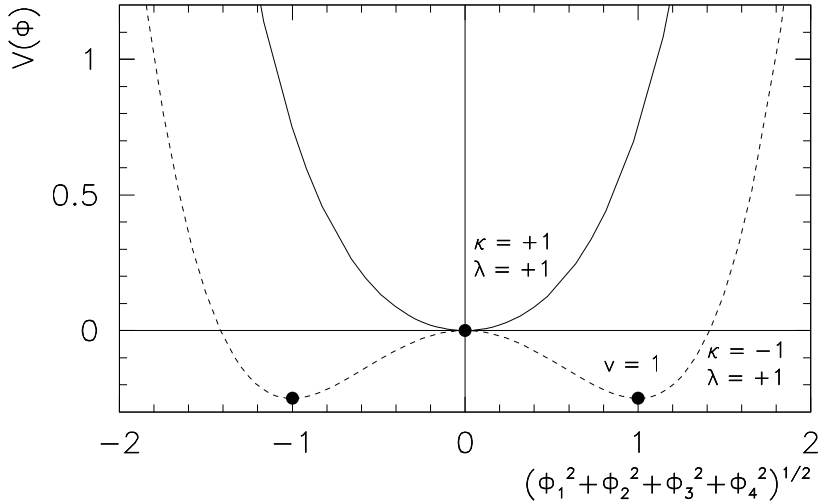
$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 (\partial_\mu h_i)(\partial^\mu h_i) - \lambda v^2 h_3^2 - \lambda v h_3 \sum_{i=1}^4 h_i^2 - \frac{\lambda}{4} \left( \sum_{i=1}^4 h_i^2 \right)^2 + \frac{\lambda v^4}{4}. \quad (32)$$

Näeme, et  $h_3^2$ -liige avaldises on õige märgiga, ja seega lagranžiaan kirjeldab reaalselt skalaarvälja  $h_3$  positiivse massi ruuduga

$$m_H^2 = 2\lambda v^2 = -2\kappa. \quad (33)$$

$m_H$  on Higgsi bosoni mass. Konstantse panuse  $\lambda v^4 / 4$  võib lagranžiaanist ära jätta. Teised skalaarväljad  $h_i$  ( $i = 1, 2, 4$ ) jäävad massita, sest nende jaoks massiliige (võrdeline  $h_i^2$ ) puudub. Peale Higgsi bosoni on teoriasse tulnud veel kolm massita skalaarset bosonit, mida Goldstone'i bosoniteks kutsutakse. Liikmed  $h_3 h_i^2$  ja  $h_i^2 h_j^2$  on oma- ja vastastikmõju liikmed, mis kaovad, kui  $h_i$  väljade väärtused on väikesed.

6 Sellest punktist alates valime mugavuse pärast nn loomulikud ühikud  $c = \hbar = \mu_0 = 1$ , mis lihtsustavad avaldisi, samastades tavalisi ühikuid.



Joonis 2. Potentsiaali  $V(\varphi)$  sõltuvus absoluutväärtusest  $|\varphi|$ . Juhul  $\kappa > 0, \lambda > 0$  on ainult üks miinimum nullpunktis, juhul  $\kappa < 0, \lambda > 0$  on neid kaks.

Goldstone'i bosonite teket ei ole raske seletada. Potentsiaal ei muutu hüperpinna puutuja suunas, mistõttu puutujasuunaline häiritus ei leia mingit vastupanu ja jääb massita. Seevastu radiaalhäirituse  $h_3$  suunas potentsiaalne energia muutub ning eksisteerib tasakaaluasendis tagasi tõmbav jõud. Siit ka  $h_3$ -le mass. Selle punkti kokkuvõttena võib öelda, et globaalse faasisümmeetria iserikkumisel tekib reaalse, positiivse massiga Higgsi boson, kuid sellega kaasneb kolm massita osakest – Goldstone'i bosonit.

Veel üks oluline märkus, mida vaid vähesed õpperaamatud (näiteks [6,7]) ära toovad. Kuna (31) tüüpi teisendused ei saa muuta füüsikat, peavad  $\kappa < 0$  korral lagranžiaanid (26) ja (32) olema identsed. Kui oleks võimalik leida mõlema täpsed lahendid, oleksidki need ka identsed. Kahjuks on elementaarosakeste füüsika väljateoorias täpsete lahendite leidmine haruldane ja tuleb kasutada häiritusarvutust. See on võimalik vaid lagranžiaani (32) korral ja see viib ka õige tulemuseni – reaalse positiivse massini. Et aga lagranžiaanid on identsed, peaks õige mass ( $m_H$ ) olema ka teises lagranžiaanis, mida pole aga võimalik seal identifitseerida.

#### 4.4. LOKAALSE FAASISÜMMEETRIA ISERIKKUMINE

Näitame siin, et lokaalse faasisümmeetria iserikkumisel Goldstone'i bosonit ei teki. Selle asemel omandab massita kalibratsiooniväli massi. Pärast sümmeetria rikkumist lagranžiaani pandavas  $\varphi$  avaldises  $v$  ja nelja uue skalaarvälja kaudu saab kolmele Goldstone'i bosonile vastavad väljad viia unitaarsesse faasimaatriksisse,

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} h_1 + ih_2 \\ v + h_3 + ih_4 \end{pmatrix} = U(x) \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + h_3 \end{pmatrix}. \quad (34)$$

Kuna teooria on invariantne lokaalsete faasiteisenduste suhtes, võib nüüd kasutada faasimaatriksit  $U(x)$  kaotavat faasiteisendust. Sobivaks faasiteisenduseks Goldstone'i bosonitest vabanemiseks on loomulikult pöördmaatriks  $U(x)^{-1}$ . Faasiteisenduse valik on seotud kalibratsiooni valimisega, mis sel puhul on unitaarne kalibratsioon. Unitaarses kalibratsioonis on

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + h_3 \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Goldstone'i bosonid siiski tühja ei kadunud: valitud unitaarset kalibratsiooni kasutades moodustavad nad nüüd kalibratsioonibosonite spinni nullkomponendid. Piltlikult öelduna neelavad massita kalibratsiooniväljad Goldstone'i bosonid ja muutuvad massiivseteks väljadeks. Tõestuseks lähtume jälle komplekssest skalaarväljast. Nõutava invariantisusega lagranžiaan on

$$L_\varphi = (D_\mu \varphi)^\dagger (D^\mu \varphi) - \kappa (\varphi^\dagger \varphi) - \lambda (\varphi^\dagger \varphi)^2, \quad (36)$$

kus pikk tuletis on valemist (17). Higgsi dubleti jaoks hüperlaengut  $Y = 1$  valides saame

$$L_\varphi = \frac{1}{2} \left( (\partial_\mu h_3)(\partial^\mu h_3) - m_H^2 h_3^2 \right) + \frac{\lambda v^4}{4} + \frac{1}{8} (v + h_3)^2 \left( g_2^2 (W_\mu^+ W^{-\mu} + W_\mu^- W^{+\mu}) + (g_1^2 + g_2^2) Z_\mu Z^\mu \right). \quad (37)$$

Valemi esimene rida on (vaatamata normeerimisele) juba tuttav. Huvitav on teine rida. Kui võrdleme vektorbosonite väljatugevuse panusega

$$\begin{aligned}
 L_{WW} &= -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} - \frac{1}{4}\vec{W}_{\mu\nu}\vec{W}^{\mu\nu} = \\
 &= -\frac{1}{2}\left((\partial_\nu B^\mu)(\partial^\nu B_\mu) + (\partial_\nu \vec{W}^\mu)(\partial^\nu \vec{W}_\mu) + \dots\right) = \\
 &= -\frac{1}{2}\left((\partial_\nu W^{\pm\mu})(\partial^\nu W_\mu^\mp) + (\partial_\nu Z^\mu)(\partial^\nu Z_\mu) + (\partial_\nu A^\mu)(\partial^\nu A_\mu) + \dots\right),
 \end{aligned} \tag{38}$$

kus  $G_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu$  on  $U(1)$ -kalibratsioonivälja tugevuse tensor, siis selgub, et teine rida panuses (37) annab massid kõikidele vektorbosonitele, välja arvatud fotonile. Massid on

$$m_W = \frac{v}{2}g_2, \quad m_Z = \frac{v}{2}\sqrt{g_1^2 + g_2^2}, \quad m_A = 0. \tag{39}$$

Suurust  $v$  saab määrata, sest kehtib seos

$$\frac{1}{2v^2} = \frac{g_2^2}{8m_W^2} = \frac{G_F}{\sqrt{2}}, \tag{40}$$

kus  $G_F = 1,16637 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$  on tuntud Fermi konstant. Valemi (40) vasaku- ja paremapoolset liiget võrrutades saame  $v = 246 \text{ GeV}$ . Valemitest (39) saame  $W$ -bosoni massiks  $m_W = 77,5 \text{ GeV}$  ja samuti  $Z$ -bosoni massiks  $m_Z = 88,4 \text{ GeV}$ , mis on ligikaudu nende katseväärtused. Higgsi bosoni massi  $m_H = \sqrt{2v^2\lambda}$  arvuline väärtus jääb siiski määramata, sest  $\lambda$  väärtust ei teata.

Lõpuks annab Higgsi väli ka aineosakestele massi. Sisestades Higgsi välja (35) Yukawa-panusesse (24) on viimane näiteks vasakukäelise neutriino-elektroni dubleti  $\psi_L = (v_{eL}, e_L)^T$  ja paremakäelise elektroni singleti  $\psi_R = e_R$  (ning Yukawa seose  $g_{Y_u} = g_e$ ) puhul

$$L_{\text{Yukawa}} = -\frac{g_e}{\sqrt{2}}(v + h_3)(\bar{e}_L e_R + \bar{e}_R e_L), \tag{41}$$

kust  $v$ -ga võrdeline osa annab elektroni massi  $m_e = g_e v / \sqrt{2}$ . Kui suur see mass on, ei saa Higgsi mehhanism ikkagi ennustada, sest Yukawa seos  $g_e$  on tundmata. Üldiselt on Yukawa seos  $g_{Y_u}$  iga Standardmudeli aineosakeste dubleti jaoks erinev ja annab neile kõigile erinevad, kuid tundmatud massid.

#### 4.5. MASS TUGEVA JÕU TEOORIAS

Nagu näidatud, viib kalibratsiooniteooria esialgu massita vahebosonitele. Kuna tugeva jõu kandjad, gluonid, ongi massita, jäävad siin massi



genereerimise probleemid ära. Kuna tugev jõud ei erista ka vasaku- ja paremakäelisust, siis on kvarkide jagamine vasaku- ja paremakäelisteks tugevas vastastikmõjus lihtsalt formaalsus.

Tugeva jõu kuju ja jõu kandjad tuletatakse invariantsusenõudest  $SU_c(3)$  rühma lokaalsete teisenduste suhtes.<sup>7</sup> See on unitaarsete ühik-determinandiga maatriksite rühm, millel on kaheksa generaatorit, mis genereerivad pööordeid kolmemõõtmelises värvilaengute ruumis. Matemaatika keeles nõutakse invariantsust teisenduse

$$q \rightarrow q' = \exp(ig_3\lambda_j\beta_j(x)/2)q, \quad q = \begin{pmatrix} q_p \\ q_r \\ q_s \end{pmatrix} \quad (42)$$

suhtes.  $q$  tähistab siin värviruumi olekvektorit. Kahest üle  $j$ -indeksi summeeritud suurus tähistab  $\lambda_j$  kaheksat rühma generaatorit ( $3 \times 3$  maatriksit) ja  $\beta_j$  neile vastavaid pöördnurki.  $g_3$  on tugeva jõu laeng. Vastastikmõjudeta lagranžiaan

$$L = \bar{q}(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)q \quad (43)$$

ei ole invariantne selle teisenduse suhtes. Tagamaks invariantsust tuleb lagranžiaani tuua kaheksa kalibratsioonivälja, ja vastav pikk tuletis on kujul

$$D_\mu = \partial_\mu + \frac{ig_3}{2}(\lambda_1g_{1\mu} + \dots + \lambda_8g_{8\mu}). \quad (44)$$

Väljad  $g_i$  pole üheselt määratud ja nendega võib teha kalibratsiooniteisendusi. Kui valida viimased nii, et nende tekitatud tuletisliikmed kompenseerivad vaba lagranžiaani invariantsust rikkuvad tuletisliikmed, saadakse invariantne kvargi- ja gluuoniväljade vastastikmõju liikmetega lagranžiaan. Täieliku lagranžiaani saamiseks tuleb lisada veel vaba gluuonivälja osa  $-\frac{1}{4}G_{i\mu\nu}G_i^{\mu\nu}$ , kus

$$G_i^{\mu\nu} = \partial^\mu g_i^\nu - \partial^\nu g_i^\mu - g_3 f_{ijk} g_j^\mu g_k^\nu \quad (45)$$

Siin on  $f_{ijk}$  täielikult antisümmeetrilised struktuurikonstandid. Näeme, et värvilaengutega gluuonite tõttu pole vaba gluuonivälja osa sugugi vaba, vaid sisaldab gluuonite kolmanda ja neljanda astmega omamõju liikmeid. Nendest tulebki kvarkide vangistus, nagu juba eespool kirjeldatud.

<sup>7</sup> Indeks „c“ tuleb ingl. sõnast *color* ehk värv.

## 5. DIFUUSNE EHK HAJUMASS

### 5.1 DIFUSIOON KUI STOHHASTILINE PROTSESS

Ülaltoodud Higgi mehanism on massi tekitamise kvantväljateoreetilise pilt, mille loomisel võeti eeskujuks tahkisetooria ülijuhi ja ferromagnetikute mudelid. On mõistlik vaadata veel teisigi massi tekitamise efekte. Tahkisetoorias leidub mitmeid nähtusi, millele massi tekitamine võiks toetuda, näiteks kristalli läbiv elektronide voog. Siin pikeneb elektronide teekond mikroskoopiliste hajumiste (difusiooni) tõttu ja need liiguvad kristallis aeglasemalt kui otse liikudes. Elektron oleks nagu omandanud efektiivselt endisest suurema massi.

Difusiooni saab stohhastikas modelleerida. Tüüpiline mudel on nn suvaline teekond (ingl. *random walk*), mille ühemõõtmelises variandis oletatakse, et pärast umbes keskmise vaba teekonna pikkuse  $\ell_0$  läbimist muutub liikumissuund. Seda mudelit aluseks võttes näitas Vladimir Karmanov [8], et massita osakest suvalisel teekonnal saab kirjeldada massiga osakesena, kus osakese mass on võrdeline keskmise vaba teekonna  $\ell_0$  pöördväärtusega. On näidatud, et see põhimõte kehtib mitte ainult skalaarsete osakeste puhul, vaid ka (spinniga 1/2) fermionide puhul, nagu on kõik aineosakesed elementaarosakeste füüsikas.

Sama stohhastilist protsessi saab impulsiruumis jälle kirjeldada häiritusreana, kus vaba liikumine, mida skalaarse osakese jaoks kirjeldab vaba propagaator

$$\frac{i}{p^2} = \frac{i}{E^2 - \vec{p}^2}, \quad (46)$$

on üks, kaks, kolm, ... korda katkestatud. Niisugune rida on tuntud Dysoni reana, ja seda saab summeerida, viies katkestuspanuse  $1/\ell_0^2 \sim m^2$  nimetajasse,

$$\frac{i}{p^2} + \frac{i}{p^2}(-im^2)\frac{i}{p^2} + \frac{i}{p^2}(-im^2)\frac{i}{p^2}(-im^2)\frac{i}{p^2} + \dots = \frac{i}{p^2 - m^2}. \quad (47)$$

Selline on massiga  $m$  osakese propagaator, sest propagaatori nimetaja nullväärtus määrab osakese kinemaatika. Kui enne oli  $E = |\vec{p}|$  massita osakese energia, siis nüüd on energia  $E = \sqrt{\vec{p}^2 + m^2}$  massiga osakese oma. Niisugust massi, mis tuleb propagaatori nimetajasse, nimetatakse pooluse massiks.

Kui vaadata stohhastilist protsessi mitte klassikalise, vaid kvantteooria raames, ei ole oluline osakese stohhastiline liikumine hajumisprotsesside mõjul, vaid ainult iga hajumisega kaasnev faasinihe  $\pi/2$  ( $i = e^{i\pi/2}$ ). Hajumassi minimaalne kvantmehaaniline mudel oleks niisugune, kus osakese kvantmehaaniline teekond tekitab juhuslikke faasinihkeid. Ei ole oluline, et osake muudaks suunda tavaruumis. Nihked võivad tulla ka osakeste „hüppamisest“ stohhastilisesse lisadimensiooni ja sealt tagasi. Toodud idee näib olevat liialt filosoofiline, aga võib juhtuda, et just filosoofia põhjendab seda, mida Higgsi mudel ei suuda.

## 5.2. STOHHASTILINE KVANTISEERIMINE

Higgsi välja kvantiseerimiseks saab kasutada stohhastilist kvantiseerimist Langevini võrrandi kujul, mida rakendasid Itaalia füüsik Giorgio Parisi ja tema Hiina kolleeg Yong Shi Wu 1981. aastal [9]. Liikumisvõrrandile (näiteks Kleini–Gordoni võrrandile Higgsi bosoni puhul) lisatakse mürapanus  $\mathcal{L}(x, t)$ , mis sõltub neljamõtmelise aegruumi koordinaatidest  $x$  ja lisadimensioonist  $t$ . Viimane on arenguaeg, mis ei ole aegruumi koordinaadi nullkomponent. Ühemõtmelisel juhul esialgsele liikumisvõrrandile mürapanuse liitmisel saab Langevini võrrandi

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi(x, t) = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \kappa \right) \varphi(x, t) - \lambda \varphi^3(x, t) + \mathcal{L}(x, t) \quad (48)$$

kaudu skalaarse Higgsi välja stohhastilise arengu. Müra tekitatakse suvalise teekonna tuletise kaudu. Esitades võrrandi diskreetsete ruumivahe-  
mike  $l$  ja ajavahe-  
mike  $\tau$  kaudu, säilitame pidevuse piirjuhule  $l \rightarrow 0$ ,  $\tau \rightarrow 0$  minnes suhte  $a = 2\tau / l^2$  konstantsena. Kui sel juhul on ka  $\kappa$  ja  $\lambda$  lõplikud, annavad nad koos müraga igale ajavahe-  
mikule infinitesimaalse panuse, nii et diskreetne süsteem on integreeruv ja stohhastiline kvantiseerimine teostatav.

Nagu enne mainitud, on  $\kappa$  ja  $\lambda$  parameetrid, mis ei ole Higgsi välja otsesed füüsikalised suurused. Kui renormeeritud  $\kappa$  ja  $\lambda$ , vastavalt  $\kappa_{\text{ren}} = \kappa \tau$  ja  $\lambda_{\text{ren}} = \lambda \tau$  jääksid lõplikuks, tekib piirjuht, mida nimetatakse antiintegreeritavaks piirjuhuk. Piirjuhtudel kaob mürapanus, aga diskreetsena võetud väli on iseenesega mitte triviaalselt, vaid difuusselt seotud,

$$\Phi_i^{n+1} = (1-a)T(\Phi_i^n) + \frac{a}{2}(\Phi_{i+1}^n + \Phi_{i-1}^n), \quad (49)$$

kus  $i$  ja  $n$  on diskreetsed ruumi- ja ajasammud ja

$$T(\Phi) = \left( 1 - \frac{\kappa_{\text{ren}}}{1-a} \right) - \frac{\lambda_{\text{ren}}}{1-a} \Phi^3. \quad (50)$$

Eriti huvipakkuvad on juhud  $\kappa = -2(1-a)$  ja  $\lambda = 4(1-a)$  või  $\kappa = 4(1-a)$  ja  $\lambda = -4(1-a)$ , sest siis on kas  $T(\Phi) = -T_3(\Phi)$  või  $T(\Phi) = T_3(\Phi)$  ehk kas negatiivne või positiivne kolmandat järku Tšebõševi polünoom  $T_3(\Phi) = 4\Phi^3 - 3\Phi$ . Võrreldes eelnevaga on huvitav see, et ka antiintegreeritaval piirjuhul on miinimumi koht  $\nu$  lõplik, vastavalt  $\nu = 1/\sqrt{2}$  või  $\nu = 1$ .

Et Tšebõševi polünoomil on kaootilised omadused, siis kujutis  $\Phi^{n+1} = T^3(\Phi^n)$  algväärtuse pisikesel nihkumisel läheb pärast mitmekordset iteratsiooni täiesti teise suunda. Niisugust kujutist nimetatakse kaootiliseks, täpsemalt ergoodseks. On näidatud, et kaootiline, ergoodne kujutis tekitab Gaussi valge müra, millest koosnes ka mürapanus  $\mathcal{L}(x, t)$ , nii et selle mürapanuse ärakadumisega tekitab väli  $\Phi$  ise enda müra. Aga sellest ei piisa. Kui iteratsioonis (49) on  $a \neq 0$ , siis on seotud ka naaberpunktid. Sellega jõuame iseorganiseeruvale süsteemile, mida nimetatakse kaootiliseks stringiks ja millest lähemalt järgmises peatükis. Nimi tuleneb sellest, et ühemõõtmeline objekt on niimoodi kokku keeratud, et tal ei ole algust ega lõppu ehk ääretingimused on tsüklilised. Kaootilised stringid ei ole algusest peale seotud tavastringi teoreetiliste mudelitega. Kaootiliste stringide teooria võib saada üheks võimalikuks tulevikuteooriaks, mis seletab masside päritolu, ja seda võib-olla isegi Steven Hawkingi poolt mainitud M-teooria raames (vt [10]). Üks autorite hulgast, selle valdkonna teadlane S.G., teeb Tartu Ülikoolis sihtfinantseerimise projekti nr SF0180056s09 raames uurimusi koostöös Londoni Queen Mary Ülikooli teadlastega ja esineb ettekandega XLI füüsikapäeval. Vastavasisuline artikkel ilmub ka käesolevas aastaraamatus.

## 6. KAOOTILISED STRINGID

Kuigi tuletasime stohhastilisel kvantiseerimisel kaootilise stringi kui iseorganiseeruva süsteemi, saab valemiga (49) antud iteratsiooni üldiselt vaadata matemaatilise ühemõõtmelise objektina, millest alles füüsika tuleneb. Filosoofid ja süsteemiteoreetikud räägivad väljakasvamisest, esilekerkimisest või ilmunisest (ingl. *emergence*) siis, kui ühe valdkonna vastastikmõjude rohkusest tekib kompleksne süsteem, mis kuulub hoo-

pis teise valdkonda. Nii kasvab füüsikast keemia, keemiast bioloogia ja bioloogiast „elu“. Miks mitte kasvatada füüsika välja matemaatikast või informatsioonist? Mõned filosoofid just eelistavad niisugust teed (vt nt Peter Eisenhardti raamatut [11]), seletades mitmeid arusaamatusi universumi tekkimise raames. On hämmastav, kuivõrd hästi sobivad kaootilised stringid sellesse skeemi, põhjendades masside tekkimist ja ennustades universumi võimalikku arengut. Mõlemaid aspekte seletame järgnevates lõikudes, jättes detailsema analüüsi raamatusse [12] ja sama-teemalise ettekande artiklisse selles aastaraamatus.

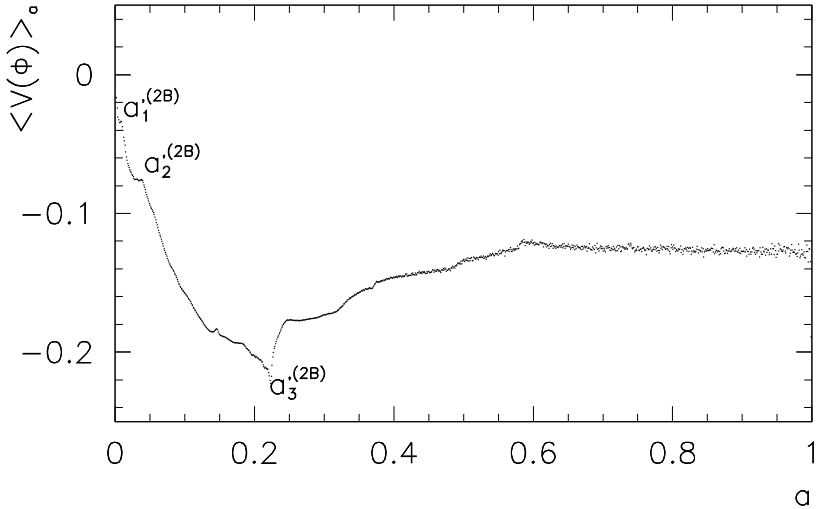
### 6.1. STRINGI OMADUSED JA MASSIVÄÄRTUSED

Kaootilistel stringidel kui matemaatilistel objektidel säilitame mõned füüsikalised omadused. Need on stringi omaenergia ja vastastikmõju energia, kusjuures pool omaenergia ekstreemumitest (miinimumid) ja pool vastastikmõju energia nullidest on stabiilsed, teised (nagu maksimumid) aga ebastabiilsed. Selle vajaliku pärandiga füüsikast piirdume ja jätkame matemaatikas. Kaootilisi stringe on mitmeid ja nende omadused sõltuvad Tšebõševi polünoomi valikust ja sellest, kuidas kaasame järgnevaid naabreid. Täpselt on neid kuus, mida nimetatakse valitud Tšebõševi polünoomi järgu ja teiste omaduste järgi  $2A$ ,  $2B$ ,  $2A^-$ ,  $2B^-$ ,  $3A$ ,  $3B$ .

Selgub, et kõikidel kaootilistel stringidel on omaenergia miinimume ja õiges suunas läbitud vastastikmõju nulle küllaltki palju. Näiteks toome joonisel 3  $2B$ -stringi omaenergia sõltuvuse seoseparameetrist  $a$ . Märgistatud miinimumid on ainult väike osa sellest, mida annab detailne analüüs. Nii selgub, et väikese seoseparameetri  $a$  puhul kordub miinimumide muster vahemikkudes, mis vähenevad neli korda seoseparameetri  $a$  lähenemisel oma piirväärtusele  $a = 0$ . Sellise skaalerimisomaduse põhjus on toodud artiklites [13,14]. Kui vaatame joonisel 4 niisugust skaalerimisvahemikku, näeme seal umbes tosinat miinimumi, mille väärtusi saab detailse analüüsiga enam-vähem täpselt määrata.

Aga nüüd läheb asi põnevaks. Kui samastame seoseparameetri  $a$  gravitatsioonijõu seosekonstandiga

$$\alpha_G(m_f) = \frac{Gm_f^2}{2\hbar c} = \frac{1}{2} \left( \frac{m_f}{m_{\text{Pl}}} \right)^2, \quad (51)$$



Joonis 3. 2B-stringi omaenergia sõltuvus seoseparameetrist  $a$ . Märgistatud on mõned esimeste miinimumide hulgast ( $a_1^{(2B)} = 0,00755$ ,  $a_2^{(2B)} = 0,03440$ ,  $a_3^{(2B)} = 0,2235$ ).

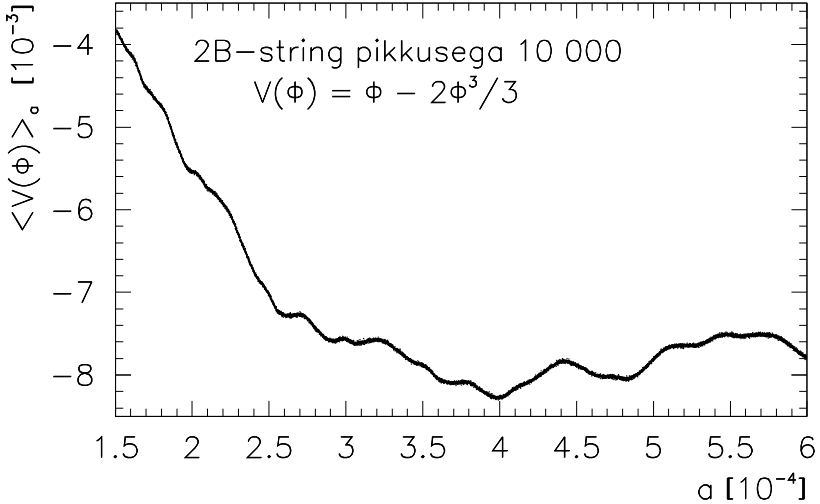
kus  $G = 6,67428 \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$  on Newtoni gravitatsioonikonstant ja  $m_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c/G} = 2,17644 \times 10^{-8} \text{ kg}$  ( $= 1,2209 \times 10^{19} \text{ GeV}$ ) on Plancki mass, selgub, et osa miinimumidest  $b_i$  on seotud kergete aineosakeste (fermionide) massidega,

$$b_i = \alpha_G (m_i)^4. \quad (52)$$

See tähendab, et aineosakese massi väärtusele vastab 2A-stringi (kõrgemat järku) skaleerimisvahemiku omaenergia miinimum. Nii saab ennustada vastavate miinimumide ja (tundmatu) järgu  $n$  abil ( $n=61$  kuni  $n=69$ ) massid

$$\begin{aligned} m_e &= 0,5117 \pm 0,0008 \text{ MeV}, \\ m_\mu &= 105,6 \pm 0,3 \text{ MeV}, \\ m_u &= 5,07 \pm 0,01 \text{ MeV}, \\ m_d &= 9,35 \pm 0,01 \text{ MeV}, \\ m_s &= 164,4 \pm 0,2 \text{ MeV}. \end{aligned} \quad (53)$$

Kvarkide massid ei pruugi kokku langeda joonisel 1 toodud väärtustega, sest nende masside tuletamine Standardmudelis sõltub renormeerimis-



Joonis 4. 2B-stringi omaenergia sõltuvus seoseparameetrist  $a$  skaleerimispiirkonnas.

skeemist, kuna kvargid pole vabad. Üllatav on aga leptonite (st elektroni ja müüoni) masside kooskõla katsega.

Edasi läheb veidi keerulisemaks. Seoseparameetrit  $a$  saab samastada mitte ainult gravitatsioonikonstandiga, vaid ka Standardmudeli seosekonstantidega. Nii saab teiste miinimumide abil Yukawa seost kasutu- sele võttes ennustada raskemate aineosakeste masse:

$$\begin{aligned}
 m_\tau &= 1,782 \pm 0,007 \text{ GeV}, \\
 m_c &= 1,259 \pm 0,004 \text{ GeV}, \\
 m_b &= 4,22 \pm 0,02 \text{ GeV}, \\
 m_t &= 164,5 \pm 0,2 \text{ GeV}.
 \end{aligned}
 \tag{54}$$

Viimasena toodud t-kvargi mass langeb veidi skeemist välja, sest miinimum ei asu enam skaleerimispiirkonnas. Miinimum on tegelikult enne mainitud miinimumi  $a_2^{(2B)} = 0,03440$ . Kui teisendame kvargi „vaba massi“ pooluse massiks, saame  $174,4 \pm 0,3$  GeV, mis on kooskõlas praeguse katseväärtusega. Ja niimoodi edasi. Kaotiliste stringide oma- ja vastastikmõju kaudu saab leida kõikide olemasolevate alusosakeste massid (ja teised määramatud parameetrid Standardmudelis) kas miinimumi või nullina. Aga veelgi rohkem: kaotilised stringid lubavad ennustada ka nende

alusosakeste masse, mille väärtusi seni pole leitud. Analooajäreldusi kasutades saab ennustada neutriinode jaoks kolm massiomaväärtust

$$\begin{aligned} m_{\nu_1} &= (1,452 \pm 0,003) \times 10^{-5} \text{ eV}, \\ m_{\nu_2} &= (2,574 \pm 0,003) \times 10^{-3} \text{ eV}, \\ m_{\nu_3} &= (4,92 \pm 0,01) \times 10^{-2} \text{ eV}. \end{aligned} \quad (55)$$

Ja veelgi tähtsam: Higgsi bosoni massi ennustatud väärtuseks on

$$m_H = 154,4 \pm 0,5 \text{ GeV}. \quad (56)$$

Lisaks alusosakeste massidele võimaldavad kaootilised stringid ennustada ka liitosakeste masse. Tuleb välja, et omaenergiast  $V(a)$  ja vastastikmõju energias  $W(a)$  koosneva vaakumi täisenergiate  $H_{\pm}(a) = V(a) \pm aW(a)$  miinumume saab samastada hadronite massidega ( $H_{-}(a)$  puhul mesonid,  $H_{+}(a)$  puhul barüonid).

Vaatamata sellele, et kaootilised stringid ennustavad kõikide olemasolevate (alus)osakeste massid, on vastav teooria veel arendamata. Nii näiteks pole üldsegi selge, miks b-kvark eelistab just skaleerimisvahemikku järguga  $n=2$ , kus tal on mass  $m_b = 4,22 \text{ GeV}$ , kuid mitte vahemikku järguga  $n=1$ , kus tal oleks neljandik sellest massist. Ei ole selge, miks kvargid asuvad just nendel seoseparameetri miinumumidel ega kusagil mujal. Kaootilised stringid on rohkem nagu katseklaasid, kus saab (oletaades seose olemasolu) katsetada, millised massiseisundid realiseeruvad – teadmata, miks nad just leitud kohas asuvad. Huvitav aga on, et selles katseklaasis pole energia piiratud nagu põrgutite katsetes. Sellepärast saab aimu, mis võib juhtuda suuritel energiatel. Jääb palju ruumi nn tumeaine olemasoluks. Samas ei toeta kaootilised stringid minimaalse supersümmeetria alusosakeste olemasolu. Selles piirkonnas, kus neid osakesi võiks leida miinumumi või nullina, neid pole. Kaootiliste stringide katseklaasile toetuva universumi pildi „joonistame“ järgnevas. Teooria seisukohast aga ootab uurijat suur väljakutse seda kõike seletada ja põhjendada. Tartu–Londoni koostööga on see väljakutse vastu võetud.

## 6.2. UNIVERSUMI ARENEMISE PILT

Kaootiliste stringide vaatenurgast tekib universum Bernoulli informatsiooni  $N$  sümbolite nihkest, mis on semikonjugeeritud Tšebõševi ku-



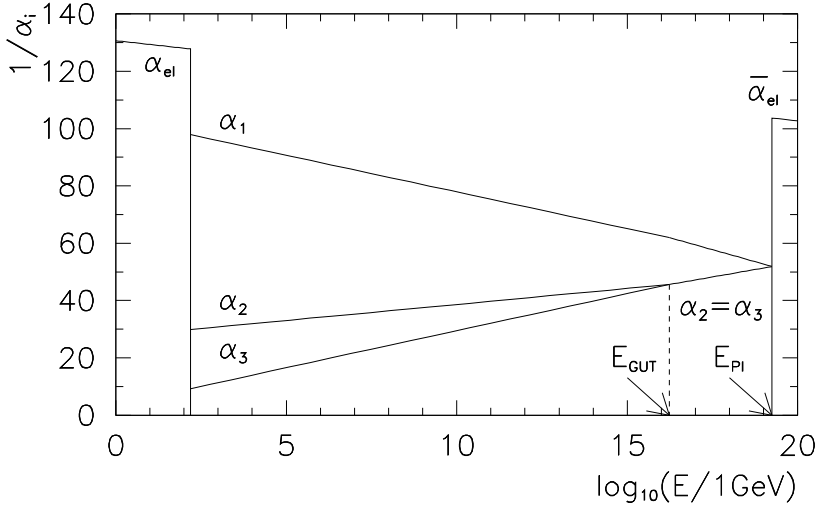
jutisega  $\Phi^{n+1} = T(\Phi^n)$ . Juhuslikul kombel ei seondu stringi punkt ainult iseendaga, vaid ka naabritega. Esialgne seos naabritega on päris väike ( $2(m_{p1}/M_U)^2 \sim 8 \times 10^{-122}$ , kus  $M_U$  on universumi mass). Makroskoopiliselt saab süsteemi kirjeldada temperatuuri  $T$  ja Hawkingi temperatuuriga  $T_H$ , kus  $E = kT \sim 10^{79}$  GeV ja  $\tilde{E} = kT_H \sim 10^{-42}$  GeV. Vastavalt energiale  $E = kT$  on universum alguses ainult üks ülliraske must auk, mis kiirgab madala energiaga  $\tilde{E} = kT_H$  osakesi Hawkingi kiirgusena. Kuna ülliraske must auk laguneb väiksemateks mustadeks aukudeks ning universumi temperatuur langeb ja Hawkingi temperatuur tõuseb, tekib umbkaudu  $2^{201} \sim 3 \times 10^{60}$  osakeste massiseisundit.

Kui  $E = \tilde{E} = E_{pl}$ , lõpeb mustade aukude olemasolu. Seoseparameeter on jõudnud väärtusele  $a = 1$ , ja just sellel tingimusel annavad  $N = 2$  ja  $N = 3$  stringid oma ergastuse üle (mitteergoodsetele)  $N = 1$  stringidele algväärtusteks. Neid on neli, ja lihtne analoogijäreldus näitab, et nad on võimelised moodustama aegruumi koordinaate. Lihtsamalt öeldes: sel „hetkel“, kui universum jõuab Plancki energiani, tekivad aeg ja ruum, st mõõdetav universum ise. Massiseisundid „voolavad“ aegruumi ja ilmuvad seal osakestena. Osakeste teke põhjustab ühise seoseparameetri  $a$  jagunemise kaheks: üheks edaspidi gravitatsiooniliseks, mis suures osas kirjeldab tumeainet, ja üheks pseudoelektromagnetiliseks, kalibratsiooniseosega  $\bar{\alpha}_{el} = 0,00965 \pm 0,00001$ . Viimasest numbrist järeldub hele- ja tumeaine suhe,  $m_{hele} / m_{tume} = \sqrt{\bar{\alpha}_{el} / \alpha_G} / 2 = 0,049$ .

Kust teame seda pseudoelektromagnetilist kalibratsiooniseose väärtust  $\bar{\alpha}_{el}$  nii täpselt?  $3A$ -stringi omaenergias leidub miinimum  $a_4^{(3A)} = 0,00965 \pm 0,00001$ , mis pole seotud tuntud osakestega ja mida saab samastada mingi uue osakese massiga  $m_L = \sqrt{2}m_{p1}$ . Sellel osakesel on gravitatsiooniline seos  $\alpha_G(m_L) = 1$ , millele vastab null  $2B^-$ -stringi vastastikmõju energias. Kuna energia  $E$  vähenemine on vastupidine jõudude ühinemisele, mil tekib suurema energiaga osake, siis siin kaob osake massiga  $m_L$ . See osake on neljanda pere ülliraske lepton  $L$ , mis omakorda tekitab uusi erinevaid jõude. Seosekonstantide muutumise täpsel analüüsimisel (vt joonist 5) selgub, et Plancki energia juures on  $2 / \alpha_1 = 1 / \bar{\alpha}_{el}$ , mida saab kirjutada ka viisil

$$\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{\bar{\alpha}_{el}}, \quad (57)$$

kus Plancki energial  $U(1)$ -seos  $\alpha_1$  on võrdne  $SU(2)$ -seosega  $\alpha_2$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,01929 \pm 0,00001$ .  $SU(2)$ -seose tagajärjeks (jahtuvas) universumis on



Joonis 5. Jooksvate seosekonstantide pöördväärtused Suurte Ühenduste teoorias

vasaku- ja paremakäelised fermionid. Järgmine oluline peatus energia vähenemisel on  $m_Q = (1,73 \pm 0,02) \times 10^{16}$  GeV. Sellel energial on  $\alpha_2(m_Q) = \alpha_3(m_Q) = 0,02192 \pm 0,00001$  ja  $\alpha_1(m_Q) = 0,01616 \pm 0,00001$ . Energiale  $m_Q$ , kus  $SU(2)$  ja  $SU(3)$  jõud hargnevad, vastab 3A-stringi omaenergia miinimum  $a_5^{(3A)} = 0,02145 \pm 0,00003$ . Ühinemisosakene on neljanda pere üliraske kvark Q. Sellest energiast allpool on nüüd kolm jõudu, mis jõuavad praeguste põrgutite energiateni. Veel allpool praeguse universumi energias ühinevad (nüüd erinevad)  $U(1)$ - ja  $SU(2)$ -jõud elektronõrga skaala  $m_H = (154,4 \pm 0,5)$  GeV juures elektromagnetiliseks jõuks

$$\frac{1}{\alpha_{el}} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (58)$$

Kosmilise taustkiirguse energia  $E = kT_0 = 2,35 \times 10^{-4}$  eV iseloomustab praegust universumi energiat, kus kaootilise stringi vastav seoseparameetri väärtus on jälle päris väike,  $a = (E / m_{pl})^2 / 2 = 1,85 \times 10^{-64}$ . Kuigi nõrgenevad, on kaootilised stringid siiski tunnetatavad. Kaootilise stringi ergastus  $\varphi_{\max}$  stohhastilisel kvantiseerimisel kasutatud reskaleerimises  $\varphi = \varphi_{\max} \Phi$  viib omaenergia väärtusele  $\langle V(\varphi) \rangle = \frac{3}{8} p_{\max}^2 m_{pl}^2 = (3,19 \pm 0,05) \times 10^{-47}$  GeV<sup>4</sup>, mis on samas suurusjärgus tumeenergia tiheduse hinnanguga,  $(2,9 \pm 0,3) \times 10^{-47}$  GeV<sup>4</sup>. Selgemalt: kaootilised stringid määravad tumeenergia.

Mis siis lõpuks massidest saab? Nagu siin näidatud, tekivad massi-

seisundid kaootiliste stringide oma- ja vastastikmõju seisunditena „kaugelt“ enne, kui aegruum ise tekib. Kuus kaootilist stringi ja neli tekkinud aegruumi dimensiooni moodustavad kümennemõõtmelise ruumi, millele lisandub veel stringi arenguaja dimensioon. Nii on tulevane kaootilise stringi teooria hea näide ennustatud 11-mõõtmelisest M-teooriast, mille raames leiavad alusosakeste massid sobiva seletuse.

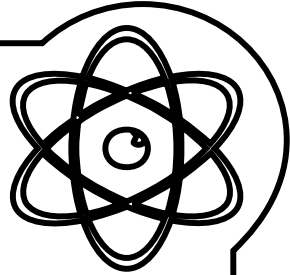
### **Tänuavaldus:**

Täname Andi Hektorit huvitava idee eest seoses hajumassiga, mida esitasime 5. peatükis.

## **VIITED**

- [1] I. Ots, „Relatiivne ja invariantne mass relatiivsusteoorias“, Eesti Füüsika Seltsi aastaraamat 2007, Tartu, 2008
- [2] J. R. Ellis, “Gauguin’s questions in particle physics: Where are we coming from? What are we? Where are we going?,” J. Phys. Conf. Ser. 110 (2008) 012001, [arXiv:0710.5590 [hep-ph]]
- [3] I. Ots, „Kolmas Nobeli preemia elektronõrga vastastikmõju uurijatele“, Eesti Füüsika Seltsi aastaraamat 2000, Tartu, 2001
- [4] I. Ots, H. Liivat, „Elementaarosakeste Standardmudeli ehitajad“, Eesti Füüsika Seltsi aastaraamat 2008, Tartu, 2009
- [5] Don Lincoln, “Understanding the Universe from Quarks in the Cosmos”, World Scientific, Singapore, 2004
- [6] F. Halzen and A.D. Martin, “Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics”, John Wiley and Sons Ltd., New York, 1984
- [7] G.L. Kane, “Modern Elementary Particle Physics: The Fundamental Particles and Forces?”, Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, 1993
- [8] V.A. Karmanov, “On the derivation of the electron propagator from a random walk” Phys. Lett. A174 (1993) 371;  
J.J. Dugne, V.A. Karmanov, “Spin zero particle propagator from a random walk in 3-D space” Phys. Lett. A310 (2003) 131
- [9] G. Parisi, Y.S. Wu, Sci. Sin. 24 (1981) 483
- [10] C. Beck, Physica D171 (2002) 72
- [11] P. Eisenhardt, „Der Webstuhl der Zeit – Warum es die Welt gibt“, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek, 2006

- [12] C. Beck, "Spatio-Temporal Chaos and Vacuum Fluctuations of Quantized Fields", in *Advanced Series in Nonlinear Dynamics*, Vol. 21, World Scientific, Singapore, 2002
- [13] S. Groote and C. Beck, Phys. Rev. E74 (2006) 046216
- [14] S. Groote and C. Beck, Dyn. Syst. 22 (2007) 219



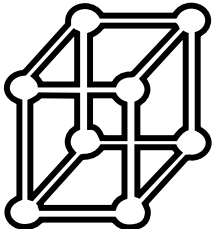
**XL  
EESTI  
FÜÜSIKAPÄEVAD**

**JA**

**XXXII  
FÜÜSIKAÕPETAJATE PÄEVAD**

**22. JA 23. MÄRTS 2010**

**TARTUS**



**22.–23. MÄRTS 2010. A**  
**TARTU ÜLIKOOLI FÜÜSIKAHOONE**  
**TÄHE 4, TARTU**

**ESMASPÄEV, 22. MÄRTS**

1. SESSIOON

Avasõnad .....	10.30
EFS preemiate kätteandmine, laureaadi ettekanne	
<b>Toomas Rõõm</b> (KBFI)	
THz-spektromeetria KBFI-s ja selle rakendused tahkisefüüsikas ...	10.45
<b>Erik Randla, Aigar Vaigu</b> (TÜ)	
2009. a Nobeli füüsikapreemia .....	11.45
StendiettekanDED, lõunapaus .....	12.30

2. SESSIOON

<b>Aleksander Rebane</b> (MSU/KBFI)	
Kahefotonne spektroskoopia kui uudne meetod ainesesise elektrivälja mõõtmiseks .....	13.15
<b>Laur Järv</b> <sup>1</sup> , <b>Piret Kuusk</b> <sup>1</sup> , <b>Margus Saal</b> <sup>2</sup> ( <sup>1</sup> TÜ FI, <sup>2</sup> Tartu Observatoorium)	
Tumeenergia ja selle alternatiivid .....	13.50
<i>Kohvipaus</i> .....	14.20

3. SESSIOON – ARUTELUD

<b>Ülle Kikas</b> (HTM)	
Põhikooli ja gümnaasiumi uute õppekavade valmimine ministeeriumist vaadates .....	14.35
Paneeldiskussioon	
Sõna said: <b>Ergo Nõmmiste</b> (TÜ FI), <b>Ilmar Kink</b> (NanoTAK), <b>Raivo Stern</b> (KBFI), <b>Peeter Saari</b> (TÜ FI), <b>Anu Reinart</b> (TO), <b>Kaido Reivelt</b> (EFS).	
Diskussiooni modereeris Andi Hektor. ....	14.50
<i>Kohvipaus</i>	

Eesti Füüsika Seltsi üldkogu .....	16.15
Eesti Füüsika Seltsi seltsiõhtu Tähe 4 kohvikus .....	18.00

**TEISIPÄEV, 23. MÄRTS**

## TEADUSSESSIOON

<b>Daniel Kropman<sup>1</sup>, Tõnu Laas<sup>2</sup>, Uno Abru<sup>3</sup>, Tiit Kärner<sup>4</sup>, Ivo Heinmaa<sup>5</sup>, Charalambos Londos<sup>6</sup></b> ( <sup>1</sup> TTÜ, <sup>2</sup> TLÜ, <sup>3</sup> Tondi Elektroonika, <sup>4</sup> TÜ, <sup>5</sup> KBFI, <sup>6</sup> Ateena Ülikool, Kreeka)	
Point defects generation kinetic in the Si-SiO <sub>2</sub> system and its interaction with impurities .....	10.30
<b>Mart Noorma</b> (TÜ) ja EstCube-1 meeskond	
Purjetamine päikesetuules .....	10.55
<b>Matti Selg</b> (TÜ FI)	
Mitteadiabaatilise probleemi vesiniku molekuli näitel .....	11.15

## ÕPETAJATE SESSIOON

Avasõnad .....	9.00
<b>Kalev Tarkpea</b> (TÜ)	
Uus füüsika gümnaasiumi õppekava .....	9.10
<b>Enn Pärtel</b> (TÜ FI)	
Seitsmenda klassi loodusõpetus uues õppekavas: ainekava, lõiming, konstruktiivne sidusus, õppekomplekt .....	9.50
<b>Marko Reedik</b> (Eksamikeskus)	
Füüsika põhikooli lõpu- ja riigieksamist: analüüs 2008/2009 õppeaastal .....	10.20
<b>Kaido Reivelt, Eero Uustalu</b> (EFS)	
EFS koolidele suunatud projektid 2010–2011 .....	11.00
Füüsikaõpetajate osakonna üldkogu, arutelu, 2010. a plaanid .....	11.15
<i>Kohvipaus</i> .....	11.45

## ÜHISSESSIOON

<b>Peeter Piksarv<sup>1</sup>, Heli Valtna-Lukner<sup>1</sup>, Madis Lõhmus<sup>1</sup>, Peeter Saari<sup>1</sup>, Pamela Bowlan<sup>2</sup>, Rick Trebino<sup>2</sup></b> ( <sup>1</sup> TÜ FI, <sup>2</sup> Georgia Institute of Technology, USA)	
Ülilühikeste valgusimpulsside difraktsioon – tuttav probleem uues kuues .....	12.00

**Peeter Saari** (TÜ FI)

Ühest elementaarsest probleemist elektromagnetismis, mis terve sajandi õiget vastust oodanud ..... 12.15

**Raivo Stern** (KBFI)

Frustrereeritud magnetid ja magnetilised monopolid ..... 12.40

**Henn Käämbre** (TÜ FI)

Pool sajandit lasereid ..... 13.15

StendiettekanDED, lõunapaus ..... 13.45

FÜÜSIKAHARIDUSE SESSIOON:  
E-ÕPE VS KLASSIKALINE ÜLIKOOLO

**Triin Marandi** (TÜ e-Õppe Arenduskeskus)

Küsitlus TÜ õppejõudude ja üliõpilaste seas videoloengute loomise, kasutamise ja eelistuste kohta: tulemused ..... 14.45

**Ly Sõõrd** (TÜ Teaduskool)

Füüsika õpetamisest – realselt ja virtuaalselt ..... 15.00

**Kaido Reivelt, Toomas Plank** (TÜ FI)

Füüsika (e-)õpe Tartu Ülikoolis – kuidas edasi? Ettekanne ja arutelu 15.15

Lõppsõna

STENDISESSIOON

**V. Babin<sup>1</sup>, V. Gorbenko<sup>2</sup>, A. Krasnikov<sup>1</sup>, A. Makhov<sup>1</sup>, M. Nikl<sup>3</sup>, S. Zazubovich<sup>1</sup>, Yu. Zorenko<sup>2</sup>** (<sup>1</sup> TÜ FI, <sup>2</sup> Ivan Franko nim Lvovi Rahvuslik Ülikool, Ukraina, <sup>3</sup> Tšehhi TA Füüsika Instituut)

Spectroscopy of Bi<sup>3+</sup>-doped Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> and Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> single crystalline films

**A. Jantsikene, R. Koch** (TÜ FI)

Radooni määramine ruumides aktiivsöe meetodil

**M. Juurma<sup>1,2</sup>, P. Jaanson<sup>2,3</sup>, R. Vendt<sup>1,2</sup>, V. Vabson<sup>1,2</sup>, T. Kübarsepp<sup>1</sup>, M. Noorma<sup>2</sup>** (<sup>1</sup> AS Metroser, <sup>2</sup> TÜ LOTE, <sup>3</sup> Aalto Ülikool)

Katsesüsteem termokaamerate omaduste hindamiseks

**J. Kozlova<sup>1,2</sup>, H. Alles<sup>1</sup>, J. Aarik<sup>1</sup>, A. Niilisk<sup>1</sup>, V. Sammelselg<sup>1,2</sup>** (<sup>1</sup> TÜ FI, <sup>2</sup> TÜ KI)

Microscopy studies of HfO<sub>2</sub> on graphene

**A. Niilisk<sup>1</sup>, H. Alles<sup>1</sup>, J. Aarik<sup>1</sup>, A. Aidla<sup>1</sup>, M. Pärs<sup>1</sup>, M. Rähn<sup>1</sup>, J. Kozlova<sup>1,2</sup>, V. Sammelselg<sup>1,2</sup>** (<sup>1</sup> TÜ FI, <sup>2</sup> TÜ füüsikalise keemia instituut)

Biaxial strain caused by atomic layer deposition of HfO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> thin films on graphene



**R. Rammula<sup>1</sup>, J. Aarik<sup>1</sup>, H. Mändar<sup>1</sup>, V. Sammelseg<sup>1,2</sup>**

(<sup>1</sup> TÜ FI, <sup>2</sup> TÜ füüsikalise keemia instituut)

Texture and morphology of HfO<sub>2</sub> films prepared by ALD on Si and SiO<sub>2</sub> substrates

**M. Rähn, M. Pärs, V. Palm, V. Hižnjakov (TÜ FI)**

Valguse levik ja kvantnähtused sub-lambda keskkondades

**A. Tamm<sup>1</sup>, K. Kukli<sup>1,2</sup>, M. Kemell<sup>2</sup>, M. Heikkilä<sup>2</sup>, J. Niinistö<sup>2</sup>, T. Sajavaara<sup>3</sup>,  
M. Ritala<sup>2</sup>, M. Leskelä<sup>2</sup>** (<sup>1</sup> TÜ FI, <sup>2</sup> Helsingi Ülikool, <sup>3</sup> Jyväskylä Ülikool)

Atomic layer deposition and characterization of rare-earth doped or laminated high-k thin films

**V. Vabson<sup>1</sup>, T. Kübarsepp<sup>1</sup>, R. Vendt<sup>1</sup>, M. Noorma<sup>2</sup>** (<sup>1</sup> AS Metrosert, <sup>2</sup> TÜ)

Convective effects of a large capacity automatic mass comparator

# THZ-SPEKTROMEETRIA KBFI-S JA SELLE RAKENDUSED TAHKISEFÜÜSIKAS\*

---

**TOOMAS RÕÕM**

Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut

## KOKKUVÕTE

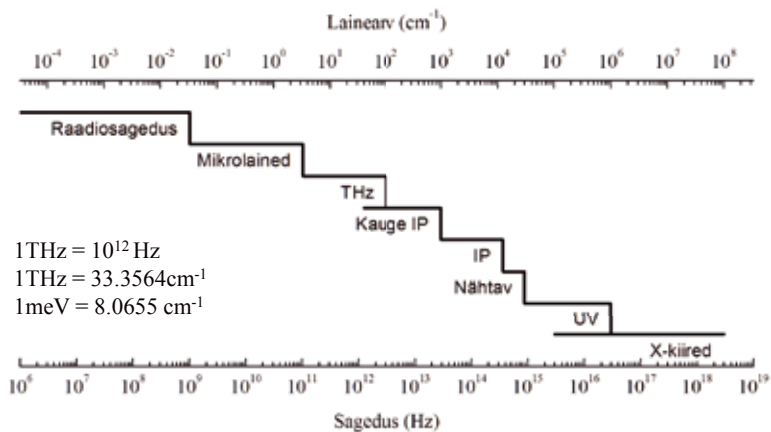
Terahertsspektromeetria kasutab THz-sageduspiirkonna valgust ainete omaduste uurimiseks. Sellise valguse lainepikkus on „käega katsutav“, ulatudes 3 millimeetrini sageduspiirkonna alumises otsas. See on küll valgus, mida me silmaga ei näe, aga moodustab osa samast elektromagnetkiirgusest, mille ühes spektriosas on nähtav valgus. Elektromagnetkiirguses on omavahel läbi põimunud ajas muutuv elektri- ja magnetväli. THz-spektroskoopia on eriline, sest selles sageduspiirkonnas leidub nii kiirgusega resonantsis olevaid laenguid, mida liigutab kiirguse elektriväli, kui ka magnetmomente, mida liigutab kiirguse magnetväli. Magnetmomentide resonantsagedust saab muuta magnetväljaga. Näiteks on elektroni spinni resonantsagedus 1 THz, kui magnetväli on 33 T. Eesmärgiks on anda ülevaade KBFI THz-spektromeetriaaparatuurist ning sellest, millist teavet THz-spektromeetria tahkiste ehituse kohta annab.

## 1. THZ-KIIRGUSE SPEKTER JA APARATUUR

THz-piirkond elektromagnetlainete spektris katab umbkaudu ala 100 GHz kuni 3 THz, joonis 1. Lähenedes madalamatelt sagedustelt, mikrolaine spektromeetria poole pealt, nimetati THz-spektromeetria varasemalt sub-mm spektromeetriaks (*sub-millimeter spectrometry*) ja tulles optika poole pealt väga kaugel infrapuna spektromeetriaks (*very far infrared spectrometry*). THz-piirkonna eripäraks on see, et nii alumistel kui kõrgematel sagedustel on olemas hea spektromeetiline riistvara, kuid lai-

---

\* Eesti Füüsika Seltsi aastapreemia 2010 laureaadi ettekanne.

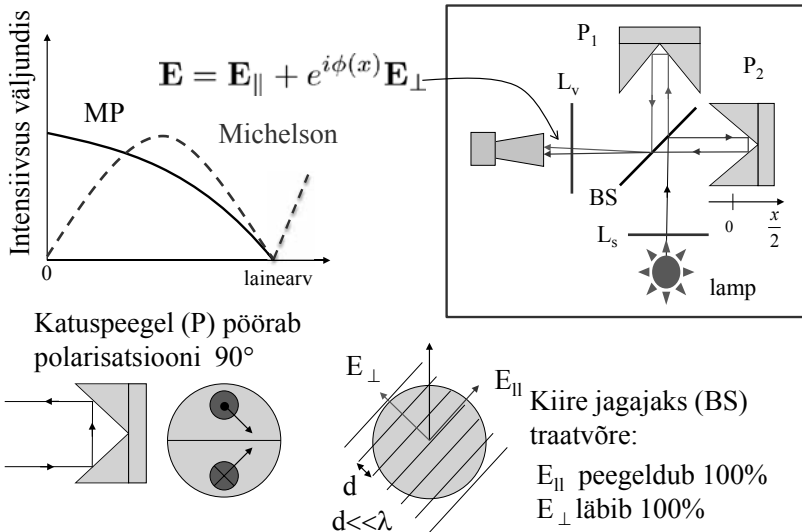


Joonis 1. Elektromagnetlainete spekter. Spektri jaotamine eri osadeks on tinglik. Kõige täpsemini on määratletud spektri nähtav osa, mis mahtudes ühe suurusjärgu sisse on ka kõige kitsam ala. Optikas, alates ultravioletti (UV) alumisest otsast üle infrapunase (IP) kuni mikrolainete ülemise otsani, kasutatakse elektromagnetkiirguse „sageduse“ ühikuna lainearvu. Lainearv näitab lainete arvu ühes sentimeetris, lainearv =  $(\lambda[\text{cm}])^{-1}$ .

datuna THz-piirkonda on mõlemal omad puudused ja tekib nii öelda THz-pilu (*THz gap*).

Mikrolainetehnikas kasutatakse monokromaatseid piiratud ulatuses häälestatava sagedusega kiirgusallikad. Kiirgust suunatakse lainejuhtidega ning tundlikkuse tõstmiseks on uuritav aine resonatoris. Seevastu traditsioonilises optilises spektromeetrias, kui jätta kõrvale laserid ja kiudoptika, on kiirgusallikateks laia kiirgusspektriga lambid ning kiirgust suunatakse peeglite ja läätsedega. Elemendid THz-kiirguse suunamiseks on segu mikrolainetehnika ja optika komponentidest – metallist torud, peeglid ja läätsed (räni või suure tihedusega polüetüleen). Praktikas on metallitorud tavaliselt oluliselt suurema läbimõõduga kui THz-kiirguse lainepikkus ning ei tööta seetõttu nagu mikrolainetehnikas kasutatavad lainejuhid. Lisaks on lainejuht kitsa sageduskarakteristikaga ning ei sobi kasutamiseks laias sagedusvahemikus. Kiirguse polariseerimiseks kasutatakse traadist võresid või dielektrilisele alusele fotolitograafiaga tehtud metalltriipusid.

Kiirgusallikatena on THz-piirkonnas kasutusel pooljuhtseadmed koos sageduse korrutamiseiga [1], gürotron, tagasilaine lamp (*Backward Wave*



Joonis 2. Martini ja Pupletti spektromeetris interfereeruvad kaks valguskimpu,  $E_{\parallel}$  ja  $E_{\perp}$ . Pärast lampi on lineaarne polarisaator  $L_s$ , mille võre on  $45^{\circ}$  nurga all polariseeriva kiirejagaja võre suhtes. Polariseeriv kiirejagaja on ühele polarisatsioonile metalne peegel ja sellega ristiolevale polarisatsioonile läbipaistev. Katuspeeglid pööravad polarisatsiooni pärast peegeldust  $90^{\circ}$ . Martini ja Pupletti interferomeetri eeliseks võrreldes Michelsoni interferomeetriga on parem efektiivsus madalatel sagedustel, mis tuleneb erinevast kiire jagajast - polariseeriv *versus* dielektriline kile.

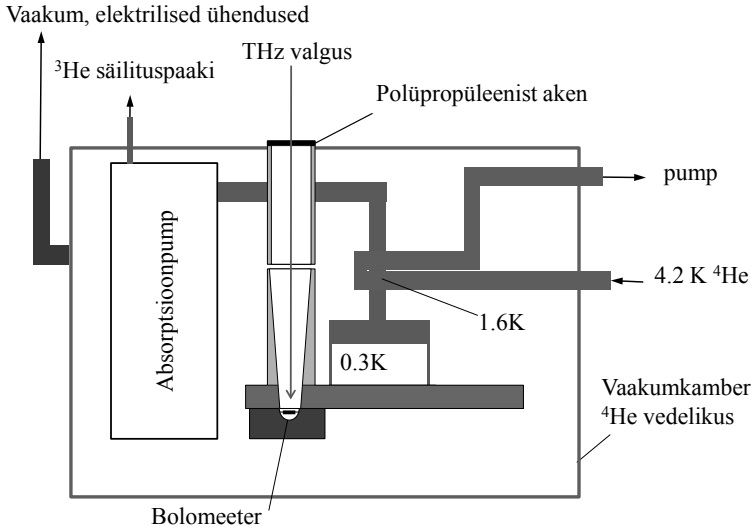
*Oscillator*), gaaslaserid (FIR-laser), kvant-kaskaadlaser, vaba elektroni laser (*Free Electron Laser*), sünkrotron, pideva toimega laserite fotosegustamine [2] ja ühe tsükli allikad [3] (sub-pikosekundilise valgusimpulsi muundamine laiaribaliseks THz-pulsiks). Ühe tsükli allikal põhinevaid spektromeetreid tuntakse ka aeg-ala THz-spektromeetritena (*time-domain THz spectrometer*). Laia THz-kiirgusspektriga on sünkrotron ning tinglikult võib selleks pidada ka aeg-ala THz-kiirgust. Laias sagedusvahemikus on häälestatavad FEL ja laserite fotosegustamisel saadav kiirgus.

## 2. SPEKTROMEETER TESLAFIR<sup>2</sup>

Meie eesmärgiks oli ehitada laia THz-sagedusvahemiku spektromeeter, millega saab mõõta THz-kiirguse neeldumist ja peegeldumist aines tu-

gevates magnetväljades. Ülijuhtmagnetite maksimaalne väljatugevus ulatub kuni 20 T, millele vastav elektroni spinni magnetresonantssagedus on umbes  $20 \text{ cm}^{-1}$ , seega THz-piirkonnas. Üheks tingimuseks oli, et mõõtmisteks saab valida suvalise magnetväljatugevuse nulli ja maksimaalse vahel. Muudetava väljatugevusega ülijuhtmagnetis on eksperimentaatori käsutuses 50 mm läbimõõduga 50 cm pikkune õõnsus, mis on temperatuuril allpool 4 K. Lisaks ümbritseb magnetit krüostaat, läbi mille kesta tuleb kiirgus suunata magneti sees olevale uuritavale objektile ning sealt uuesti kokku koguda ja detektorile suunata. Praktikast on võimalik kasutada läätsesid ja peegleid, kui solenoidil on horisontaalne ava (magnetväli ava sümmeetriatelje suunas) või see koosneb kahest poolest, nn piluga solenoid. Piluga magneti maksimaalne väljatugevus küünib umbes 10 T ja horisontaalse avaga solenoidi krüostaat on keeruline ja kallis. Tavaliselt ongi piluga solenoid horisontaalse avaga, sest see võimaldab teha mõõtmisi Faraday (valgus levib magnetvälja suunas) ja Voigti (valgus levib risti magnetväljaga) konfiguratsioonis. Seega on vertikaalse avaga solenoidil tugevam väli ja krüostaadi konstruktsioon lihtsam. Vertikaalse avaga solenoid sai valitud ka sel põhjusel, et see oli KBFI-s olemas 1987. aastal valminud Oxford Instrumentsi lahustumiskrüostaadis.

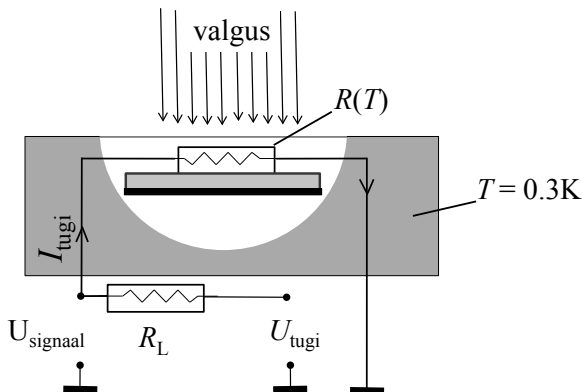
Sünkrotroni või FEL kasutamine laiaribalise kiirgusallikana on mõeldav ainult nendes laboratooriumides, mis asuvad kiirgusallika kõrval. Sünkrotronikiirgust kasutatakse THz-piirkonnas näiteks Lawrence Berkeley Rahvuslikus Laboratooriumis ja Brookhaveni Rahvuslikus Laboratooriumis ning THz-piirkonna FEL on ehitamisel Nijmegeni Kõrgete Magnetväljade Laboratooriumi kõrvale. Valik laia sagedusvahemiku saamiseks oleks ka pideva toimega laserite fotosegustamine ja ühe tsükli allikad, aga neil on puudused. Esiteks, nende ühildamine katseseadmega, kus uuritav aine on ülijuhtiva solenoidi sees, on äärmiselt keerukas, sest nõuab kiudoptikat ning selle ühildamist optiliste muunduritega madalatel temperatuuridel. Teiseks, parem signaal-müra suhe kui kombinatsiooniga Hg lambist, interferomeetrist ja bolomeetrist ei ole garanteeritud. Kuigi on näidatud, et aeg-ala THz-spektromeetrial on eelised interferomeetrilise mõõtmismeetodi ees [4], ei ole meie teada see tehnika leidnud kasutust tahkiste uurimisel tugevas magnetväljas. Aeg-ala THz uuringud on piirdunud madalate magnetväljadega, näiteks Kida jt [5]. Meie valisime kiirgusallikaks Hg lambi, mille kiirgusspekter THz-piirkonnas on kuumade elavhõbedaurude ja lambi kvartsesta musta keha kiirgus [6].



Joonis 3. Bolomeetrite kambri skeem. Bolomeetrite kamber on vedelas heeliumis asuv roostevabast metallist vaakumkamber. Gaasiline  $^3\text{He}$  vabaneb absorptsioonpumbast (sõeabsorber), kui see soojendada temperatuurile 60 K, ja kondenseerub roostevaba toru seinale, kust vedelik tilgub  $^3\text{He}$  poti põhjale. Kondenseerimiseks vajalik  $T = 1,6\text{ K}$  saadakse vedela  $^4\text{He}$  pumpamisega läbi kapillaari, mille teises otsas  $^4\text{He}$  vedelik paisub gaasiks ja jahutub 1,6 K peale. Kui kogu  $^3\text{He}$  gaas on veeldunud  $^3\text{He}$  potti, jahutatakse absorptsioonpump temperatuurile 4,2 K, mille juures hakkab aktiivsüsi  $^3\text{He}$  gaasi enda pinnale absorbeerima ja madaldab vedelikuga tasakaalus oleva gaasi rõhku.  $^3\text{He}$  vedelik potis jahtub aeglaselt 1,6 K pealt 0,3 K peale.  $^3\text{He}$  kestab temperatuuril 0,3 K umbes 14 tundi. Ümberkondenseerimisele ja töötemperatuuri saavutamiseks kulub 2 tundi.

Interferomeetri eelises võrreldes disperseeriva spektromeetriga on toodud ära Harriesi poolt [7,8]. Lühidalt on need esiteks, Fellgetti multipleksi eelis: interferomeetris langevad kõik spektraalelemendid detektorile samal ajal, aga disperseerivas riistas mõõdetakse iga spektraalelementi eraldi ajalisel järjekorras. Teiseks, Jacquinet' läbilaskevõime eelis: disperseerivas riistas piirab energiahulka pilu laius, aga interferomeetris pilu ei ole. Ülevaate infrapuna Fourier' spektromeetriast ja seal kasutatavast riistvarast, sealhulgas spektromeetritest, kiirusallikatest ja detektoritest, võib leida Griffithsi ja de Hasethi raamatust [8].

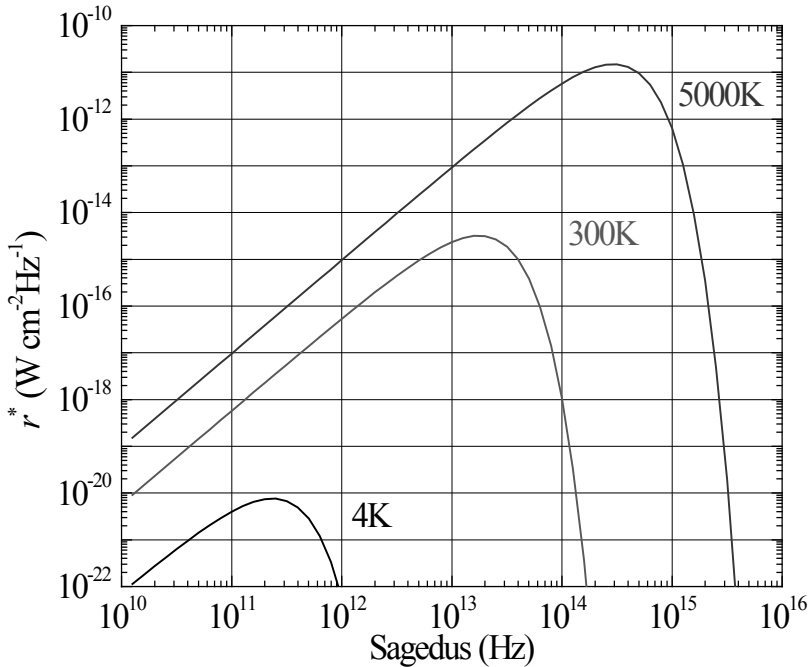
Machi ja Zehnderi interferomeetriga, mis on leidnud laialdast kasutust THz-sagedustel [9], mõõdetakse valguse amplituudi ja faasi kasutades monokromaatseid häälestatava sagedusega kiirusallikaid, näiteks



Joonis 4. Bolomeetrite bloki skeem. Bolomeetrik on dopeeritud paari  $\text{mm}^3$  ruumalaga rärist risttahukas, mis on kleebitud 5 mm läbimõõduga ja 0,5 mm paksuse safiirketta peale. Suurem osa valgusest neeldub peegeldusvastase kattega safiirkettas, mille tulemusena ketas ja Si soojenevad. Ketas ja Si ripuvad bolomeetrite bloki (vask) küljes kahe kuldtraadiga poolsfäärilises õõnsuses. Kuldtraadid on Si ja safiiri jahutamiseks ja Si-st mõõtevoolu  $I_{\text{tugi}}$  läbijuhtimiseks. Vasest bloki küljes on koormustakisti,  $R_L = 40 \text{ M}\Omega$ . TeslaFIR<sup>2</sup> bolomeetri tundlikkus temperatuuril 0,3 K on  $S = 4 \times 10^7 \text{ V/W}$  ja Johnsoni müra  $\sqrt{4k_B(R_L \parallel R(T))T} = 22 \text{ nV Hz}^{-0.5}$ , kui võtta bolomeetri takistuseks  $R(T) = 100 \text{ M}\Omega$ , ja ülemine lõikesagedus 40 Hz; tugipinge  $U_{\text{tugi}} = 0,6 \text{ V}$ . Seade on valmistatud Infrared Laboratories [12].

BWO. THz-piirkonna katmiseks on vaja umbes kümme BWO-d. Machi ja Zehnderi spektromeeter tuleb sidustada magnetiga peeglite või lätsetedega ning nõuab horisontaalse auguga magnetit ja akendega krüostaati ning ei sobi seetõttu tööks tugevate magnetväljadega. Ülejäänud interferomeetritest, Michelsoni, Martini ja Pupletti [10] ja lamellvõrega [11] (*lamellar grating*) interferomeeter, valisime Martini ja Pupletti interferomeetri, joonis 2.

Kõige tundlikum THz-kiirguse detektor on termiline detektor ehk bolomeeter, mis mõõdab neeldunud THz-kiirgusest põhjustatud temperatuuri kasvu [13]. Bolomeetri tundlikkus kasvab tema töötemperatuuri alandamisel. Niinimetatud <sup>3</sup>He bolomeeter, mille töötemperatuur on 0,3 K, võeti esimest korda kasutusele kaugel infrapuna spektromeetrias Drew' ja Sieversi poolt [15] ning on leidnud hiljem kasutust ka astronoomilistes mõõtmistes. Vaata ka näiteks Euroopa Kosmoseagentuuri missiooni Planck detektoreid kosmilise reliktkiirguse anisotroopia mõõtmiseks [14]. Spektromeetri TeslaFIR<sup>2</sup> bolomeetrite jahutusambrit ja tööpõhimõtet on kirjeldatud joonisel 3. THz-piirkonnas on kõrge tund-



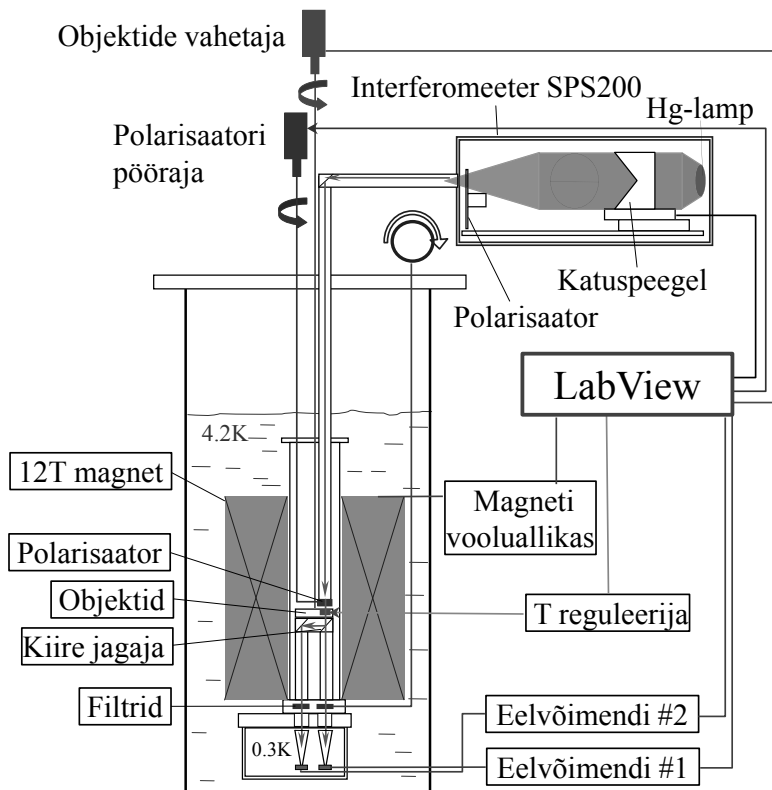
Joonis 5. Musta keha kiirgusvõimsus temperatuuril  $T$  ühe ruutmeetri suuruselt ühikulisel ruuminurka sagedusvahemikus  $\nu, \nu + d\nu$  ( $d\nu = 1$  Hz) on  $r = 2h\nu^3 [\exp(h\nu / k_b T) - 1] / c^2$ .  $h$  on Plancki konstant,  $k_b$  on Boltzmanni konstant ja  $c$  on valguse kiirus, kõik SI ühikutes.  $r^* = 2\pi 10^{-4} r$  on ühelt  $\text{cm}^2$  ruuminurka  $2\pi$  kiiratud võimsus vahemikus 1 Hz. Spektri maksimumist madalamatel sagedustel on  $r \sim T$  ja väheneb nagu  $r \sim \nu^2$ .

likkusega bolomeeter vajalik, isegi kui kiirgusallikaks on mitme tuhande kraadise temperatuuriga must keha, vaata joonis 5.

Musta keha kiirgusmaksimum temperatuuril 4 K on allpool 1 THz, joonis 5. Seega soojuslik koormus bolomeetri peal on TeslaFIR<sup>2</sup>-is väike, sest nii bolomeetrite kambri ümbrus kui ka bolomeetri ees olevad filtrid on temperatuuril 4 K. Bolomeetrite kambri asetamisel uuritava objektiga samasse krüostaati ei ole vaja kasutada toatemperatuuriseid aknaid, mis koormaksid bolomeetrit termiliselt.

Objektide ja bolomeetrite kambri vahel on pööratav ratas kolme filtri-paariga, joonis 6: klaas, fluorogold ja „Kodak“ filter. Erinevate materjalide optilised omadused THz-piirkonnas on avaldatud töös Halpern jt [16].





Joonis 6. Ülevaade spektromeetrist TeslaFIR<sup>2</sup>. Valgus koondatakse interferomeetri väljundis valgustorusse (valgevasesest toru, sisemine läbimõõt 16 mm), mille kaudu see jõuab vedelas heeliumis olevasse soojavahetusgaasiga täidetud objektikambrisse. Enne objekti on lineaarne polarisaator ja pärast objekti polariseeriv kiirejagaja. Objektikambri ja bolomeetrite kambri vahel on vedelas heeliumis filtrite ratas ning mõlemal kambril on polüpropüleenist vaakumkindlad aknad. Si bolomeetreid hoitakse temperatuuril 0,3 K <sup>3</sup>He gaasi ärापumpamisega <sup>3</sup>He vedeliku pealt. Valgus koondatakse bolomeetritele vasest koonusega, mis on lihtsustatud (sisepinna moodustaja on sirgloik) variant Winstoni koonusest [18]. LabView alusel töötav tarkvara kontrollib SPS200 tööd, objektide temperatuuri ja asendit, polarisaatori pöördenurka, magnetvälja tugevust ja 0,3 K jahuti tööd.

Ülevaade TeslaFIR<sup>2</sup>-st on toodud joonisel 6. Peamised osad on interferomeeter SPS 200 [17], magnet koos objektikambriga ja bolomeetrite kamber. TeslaFIR<sup>2</sup>-iga saab mõõta valguse neeldumise sõltuvust valguse polarisatsiooni suunast kristalli telgede suhtes. Martini ja Pupletti inter-

feromeetri väljundis sõltub valguse elliptilisus liigutatava peegli asendist, muutudes lineaarselt polariseeritud valgusest ringpolariseerituks, sõltuvalt valguse sagedusest ja käiguvahest. Bolomeeter registreerib valguse intensiivsuse muutust. Selleks, et ka intensiivsus sõltuks peegli asendist, on interferomeetri väljundis lineaarne polarisaator. Kuna valgus teel objektini depolariseerub peegeldustel valgustorus, on vahetult enne objekti teine lineaarne polarisaator, joonis 6. Kristalli ees olevat polarisaatorit saab pöörata 360° ulatuses. Transmissiooni ja peegelduse mõõtmisel on kasutuses üks bolomeeter. Kahe bolomeetriga mõõdetakse Faraday pööret. Faraday pööre on valguse polarisatsioonitasandi pööre läbiminekul ainst ja magnetilistes materjalides sõltub pöörde suurus magnetvälja tugevusest.

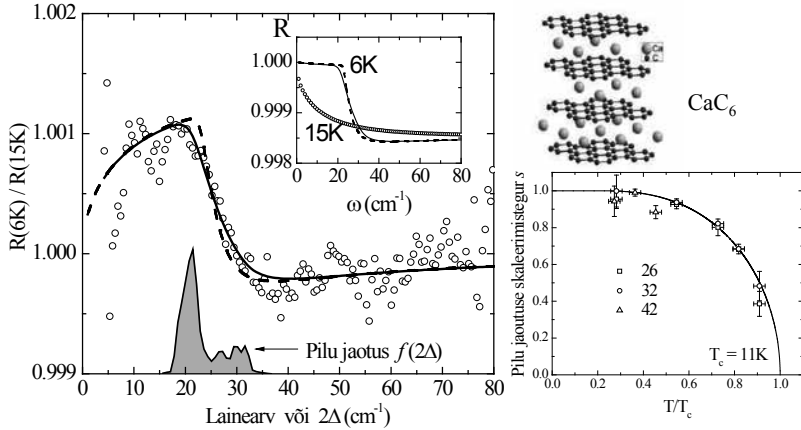
### **3. MATERJALIDE THZ-OMADUSED JA NENDE UURIMINE KBFI-S THZ-SPEKTROMEETRIAGA**

Materjalid, mida KBFI-s uuritakse, on uued materjalid. „Uus“ on teistsugune mõiste kui materjalide kirjeldamiseks kasutatavad füüsikalised mõisted, nagu näiteks „dielektriline“, „magnetiline“ või „üljuhtiv“. Selleks, et aru saada, millisel tasemel materjalide uurimise hierarhias asume, kirjeldame siin Oak Ridge'i Rahvusliku Laboratooriumi materjali-teadlase Brian Salesi „materjalide püramiidi“. Kirjeldus põhineb R.J. Cava artiklil [19]. Uute materjalide püramiidi aluse moodustavad tahkisekeemikute sünteesitud ning nende käsitluses „uued materjalid“, mille kohta varem teaduslikku kirjeldust ei olnud ja mis ei esine looduses üldse või esinevad mitte piisavalt puhtal kujul. Nende atomaarne struktuur ja kõige lihtsamad füüsikalised omadused, mida saab määrata standardsete laboratoorsete tehnikatega, sest keemikud ei ole materjalifüüsikud, kirjeldatakse. Teisel tasemel tulevad mängu materjalifüüsikud, kes valivad esimeselt tasemelt välja mingi väljapaistva omadusega materjali. See on füüsikalises mõttes „uus materjal“, kuigi keemikud on seda varem kirjeldanud. Sellel tasemel sünteesitakse puhtamaid materjale ja tehakse väikesi kristalle või kilesid. Kolmas tase hõlmab veel vähem materjale – kõige huvitavamad materjalid jäävad alles, milledest tehakse suuri kristalle või kilesid, nende füüsikalisi omadusi uuritakse põhjalikult ja võib-olla proovitakse teha uusi seadmeid või testitakse nende tööpõhimõtet. Sellel tasemel testitakse teooriaid või kasutatakse teooriat materjali omaduste

parendamiseks või uute seadmete kavandamisel. Neljandal tasemel asjatundjad tehnoloogiliste protsesside alal kitsendavad uute materjalide ringi püüdes neid integreerida olemasolevatesse seadmetesse või luua tehnoloogiat uute seadmete tootmiseks. Sealt edasi on püramiidi tipp: materjal on kasutuses tootmises olevates seadmetes.

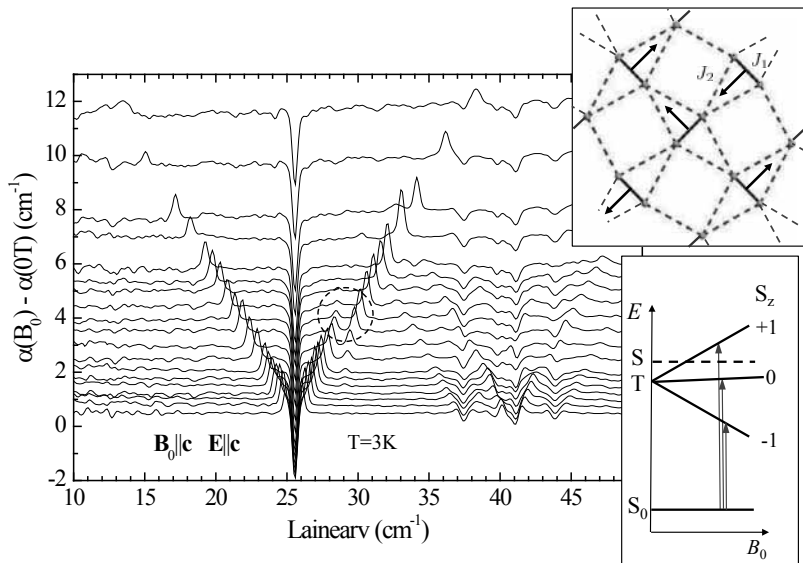
THz-spektromeetristeks uuringuteks KBFI-s kasutatakse uute materjalide püramiidi teise ja kolmanda taseme materjale. Sellise taseme materjale teevad materjalide sünteesile spetsialiseerunud laboratooriumid. Neil on olemas riistvara selliste peamiste füüsikaliste suuruste mõõtmiseks, nagu elektrijuhtivus, magnetiline vastuvõtlikkus, soojusmahtuvus ja nende temperatuuri ning magnetvälja sõltuvused. Piirangud THz-spektromeetriaie seab kristallide suurus ja kuju. Anisotroopsed materjalid peavad olema monokristallilised, et määrata THz-spektrite sõltuvust magnetvälja suunast ja valguse polarisatsioonist kristalli telgede suhtes. Kristalli või kile pind peab olema vähemalt mõne mm<sup>2</sup> suurusjärgus. Seetõttu ongi vajalik teise-kolmanda taseme materjal, kus on suured ja puhtad kristallid ning parameetrituum, temperatuur ja magnetväli on teada.

Teavet aine ehituse ehk struktuuri kohta saab röntgen- ja elastse neutronhajumise meetoditega. Kui struktuur on teada, siis otsitakse vastust küsimusele, kuidas materjali osised liiguvad ehk milline on dünaamika. THz-spektromeetria eesmärgiks on materjalis levivate ergastuste spektri määramine ja valguse vastasmõju tugevuse määramine nende ergastustega. Sellisteks ergastusteks võivad olla näiteks laengukandjad, võrevõnkumised (foononid), spinnlained (magnonid) ja tripletsed spinnergastused (triplonid). Tegemist on ühega vähestest meetoditest, millega saab uurida THz-ergastuste spektrit. Teised võimalikud meetodid on mitte-elastne neutronhajumine ja valguse Raman-hajumine. Neutronhajumise eelis on selles, et teada saadakse ergastuse energiaspektri sõltuvus ergastuse impulsist, ehk energiaspektri dispersioon. Pikalaineline THz-kiirgus neeldub ainult nende ergastuste peal, mille impulss on nullilähedane võrreldes impulsiga Brillouini tsooni äärel. Seega on tegemist ainult ühe punktiga impulsiruumis. THz-spektromeetria eeliseks neutronhajumise ees on parem energieetiline lahutus ning uuritavat ainet on vähem vaja. Raman-hajumine ja THz-spektromeetria täiendavad teineteist, sest neil on erinevad valikureeglid. Tehnilise poole pealt on Raman-hajumist tugevates magnetväljades keeruline teostada ning vajalik on horisontaalse avaga magnet ja akendega krüostaat.



Joonis 7.  $\text{CaC}_6$  ülijuhtiva pilu suuruse määramine peegeldusspektritest.  $\text{CaC}_6$  ehk Ca-ga interkaleeritud grafiidi ülijuhtiva faasisiirde temperatuur on 11 K. Punktid on ülijuhtivas faasis ( $T = 6 \text{ K}$ ) ja normaalses faasis (15 K) mõõdetud peegeldusspektrite suhe. Punktiriiga tähistatud kõver on arvatud eeldusel, et pilu on isotroopne  $s$ -tüüpi suurusega  $2\Delta = 22,6 \text{ cm}^{-1}$ . Parema lähenduse, pidev joon, annab mudel  $s$ -tüüpi pilude jaotusega. Pilude jaotus on võetud Sanna jt teoreetilisest tööst [20]. Lisatahvilil on kujutatud arvutatud absoluutsed peegeldused normaalses faasis, kasutades metallide Drude mudelit (punktid), ja ülijuhtivas faasis, kasutades  $2\Delta = 22,6 \text{ cm}^{-1}$  pilu (punktiri) ja pilude jaotust (pidev joon). Parempoolne alumine graafik on pilude jaotusfunktsiooni skaleerimisteguri temperatuuri sõltuvus, kus on kasutatud kolme erineva kristalli peal mõõdetud tulemusi. Materjal põhineb tööil Nagel jt [21].

THz-spektromeetria rakendustele materjaliteaduses pani aluse M. Tinkham Kalifornia Ülikoolis Berkeleys 1950. aastatel. Esimene läbimurre oli ülijuhtiva pilu mõõtmine pliis [22]. Riistvara ei olnud sel ajal piisavalt tundlik, et näha ülijuhtivusest põhjustatud peegeldusteguri muutusi metalli pinnalt, mille peegeldustegur on parem kui  $R = 0,999$ . Seepärast oli uurimisobjektiks õhukene kile või lasti valgusel peegelduda mitu korda [23]. Riistvara on täiustunud ning KBFI-s on ülijuhtivat pilu määratud ühe peegeldusega interkaleeritud grafiidi pinnalt [21], joonis 7. Peatselt sai Tinkham aru, et THz-spektromeetrial on potentsiaali magnetiliste süsteemide uurimisel, kui mõõtmisi teha magnetväljas [24]. Antiferromagnetilise (AFM) resonantsi sagedus sõltub elektronspinnide vahelisest vahetusvastasmõjust ja selle vastasmõju anisotroopiast. Need materjalist sõltuvad parameetrid võivad eri materjalides olla väga erinevad ning tihti on AFM resonantsi sagedus suurem kui standardse elektronspinnresonantsi sagedus.



Joonis 8.  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$  neeldumisspektrid temperatuuril 3 K ja magnetväljade vahemikus 0 kuni 12 T. Magnetväljas mõõdetud spektrist on lahutatud null-välja spekter,  $\alpha(B_0) - \alpha(0T)$ , ja allapoole suunatud spektrijooned moodustavad null-välja spektri. Spektrid on nihutatud vertikaalsuunas nii, et baasjoon asub kõrgusel, mis vastab magnetvälja väärtusele teslades. Vase  $\text{Cu}^{2+}$  spinnid  $S = \frac{1}{2}$  moodustavad dimeeride kahemõõdulise võrgustiku kristalli  $ab$  tasandis. Dimeerisisene vahetusvastasmõju on  $J_1$  ning dimeeridevaheline vahetusvastasmõju  $J_2$ . Tripleti  $T$  kaugus põhiseisundist null-väljas on määratud  $J_1$  ja  $J_2$  poolt ning on täpselt arvatav ainult numbriliselt lõpmatu arvu dimeeridega mudelis; joonisel on näidatud viie dimeeriga klaster. Punktiiriga ümbritsetud ala  $29 \text{ cm}^{-1}$  lähedal vastab ergastatud tripleti  $T$  ja singleti  $S$  nivooide tõukumisele. Tõukumist põhjustab dimeerisisene Dzyaloshinskii-Moriya vastasmõju, mis on tähistatud nooltega  $J_1$  sidemetel. Nivooide tõukumise ulatus annab Dzyaloshinskii-Moriya vastasmõju väärtuseks  $|\mathbf{D}| = 1,8 \text{ cm}^{-1} = 54 \text{ GHz}$ . Elektridipoolüleminekud toimuvad põhiseisundi singletist  $S_0$  tripleti nivooidele  $|-1\rangle$ ,  $|0\rangle$  ja  $|+1\rangle$  ning valguse elektriväli on risti dimeeride tasandiga,  $\mathbf{E} \parallel \mathbf{c}$ . Null-välja spektrijooned vahemikus 37 kuni  $44 \text{ cm}^{-1}$  on üleminekud kõrgemal asuva tripleti tasemetele.

THz-kiirguse vastasmõju magnetiliste ergastustega on nõrk, sest tavaliselt on need magnetilised dipoolüleminekud. Kui materjal on hea elektrijuht, siis ta peegeldab THz-kiirgust ning kiirguse sissetungimissügavus materjali jääb väikeseks. Mõne mikromeetri pikkuse tee peal neelavad magnetilised ergastused vähe THz-valgust, sest tüüpiline elektrit mittejuhtivate materjalide paksus magnetergastuste mõõtmiseks on 0,1 kuni 1 mm. Seega on praktiliselt võimatu „näha“ THz-valgusega magnetilisi ergastusi elektrit juhtivates materjalides.

Spektromeetria, mida nimetatakse tugeva välja elektron-spinn-resonantspektromeetriaks (*high field electron spin resonance* ehk HF ESR) on sarnane magnetväljas tehtavale THz-spektromeetriale, sest mõlemad tehnikad mõõdavad elektromagnetkiirguse neeldumist aines. HF ESR-s on kiirgusallikas kindla sagedusega ning resonantsi registreerimiseks muudetakse magnetvälja ja selle tugevused ületavad 1 T (ESR-s tavalised 0,3 ja 1 T), millest ka liides „tugev väli“. Vaja läheb mitut erineva sagedusega kiirgusallikat (pooljuhtdiodid või BWO-d) ning detektoriks on bolomeeter või vähem tundlik element. HF ESR ei registreeri neid ergastusi, mille resonantssagedus ei sõltu magnetvälja tugevusest. Näiteks võrevõnkumised ja singletsed magnetergastused jäävad HF ESR-ga registreerimata. Eeliseks on võimalus kasutada alalismagnetväljadest tugevamaid impulssmagnetvälju, sest signaal-müra suhet parandab kiirgusallika suhtelisel tugev võimsus (1 mW suurusjärgus) võrreldes termilise kiirgajaga ning seetõttu ei ole signaali kogumine vajalik.

$\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$  on hea näide uute materjalide püramiidist, kuigi tasemele 4 ja 5 see materjal ei jõudnud.  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$  struktuuri ja sünteesi kirjeldasid aastal 1991 Smith ja Keszler [25]. Läbimurre toimus, kui Kageyama ja Ueda [26] sünteesisid suured kristallid ja avastasid magneetuvuse platood ning et magnetiline mudel on topoloogiliselt sarnane Shastry-Sutherlandi mudeliga [27]. Esimene neutronhajumise töö ilmus aastal 2000 [28]. HF ESR spektromeetria tegi H. Nojiri [29] ja THz-spektromeetria tehti KBFI-s [30,31] ning Raman-hajumise töö G. Blumbergi uurimiserühmas [32].  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$  uurimiseks on rakendatud suurt hulka erinevaid eksperimenditehnikaid ja kirjutatud arvukalt teoreetilisi töid. On tehtud katsetusi seda isoleerivat materjali dopeerida eesmärgiga muuta ta elektrit juhtivaks ning ülijuhiks.

Spinnpiluga ainetes on põhiseisund singlett ja ergastatud seisund triplett. Magnetdipool- ja elektridipoolüleminekud on nende seisundite vahel keelatud seisundite erineva paarsuse tõttu. Kui on olemas Dzyaloshinskii-Moriya vastasmõju, mis segab singletset ja tripletset seisundit, siis on magnetdipoolüleminek osaliselt lubatud. Leidsime, et  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ ,  $\alpha'$ - $\text{NaV}_2\text{O}_5$  ja  $\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ -s on singlett-triplett siire elektridipoolüleminek, mis on lubatud dünaamilise Dzyaloshinskii-Moriya vastasmõjuga [31,33,34]. Tsükloidse spinnkorrastatusega  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$ -s, mis on ka multiferroidne materjal, on elektri- ja magnetdipoolüleminekud võrreldava tugevusega [35,36].

## 4. LÕPPSÕNA

Meie eesmärgiks oli anda ülevaade THz-spektromeetria riistvarast, kuidas see vastandub või täiendab teisi katsetehnikaid ning millist teavet see tehnika annab materjalides toimuvatest protsessidest ning suunata lugejat kirjanduses oleva detailsema teabe juurde. Kirjeldasime KBFi-s olevat spektromeetrit TeslaFIR<sup>2</sup>, millega uurime materjale tugevates magnetväljades polariseeritud THz-kiirgusega ning mille tundlikkus on hea tänu ülimaldal temperatuuril töötavatele bolomeetritele. Materjali on näitlikustatud ülijuht CaC<sub>6</sub>-ga ja tripletsete ergastustega magnetilise materjaliga SrCu<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

## 5. TÄNUAVALDUSED

Töötamine prof Toomas Timuski (McMasteri Ülikool, Hamilton, Ontario, Kanada) laboris 1996-97 järel doktorina tekitas sügava huvi kauge infrapuna (THz) spektromeetria vastu. Toomase näpunäiteid ja õpetusi on kasutatud ohtralt spektromeetri TeslaFIR<sup>2</sup> ehitamisel ning meie koostöö jätkub praegugi. Ilma prof Endel Lippmaa, toonase KBFi direktori, toetuseta ei oleks olnud võimalik alustada THz-spektromeetria laboratooriumi rajamist Tallinnasse 1998. aastal. Areng ja tulemused on tulnud tänu dr Urmas Nageli ja dr Dan Hüvoneni igapäevatööle. Suur tänu materjaliteadlastele, kes on olnud lahkesti nõus jagama meiega oma uusi materjale ning on meie avaldatud tööde kaasautorid. Täname Eesti Teadusfondi THz-spektromeetria projekti käivitamiseks ja käigus hoidmiseks antud toetuse eest, grandid 3443, 4926, 4927, 5553, 6138 ja 7011.

## VIITED

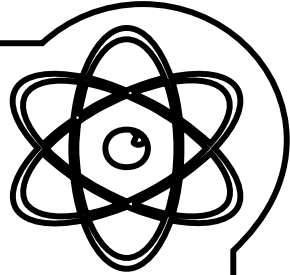
- [1] Virginia Diodes, Inc. Charlottesville, Virginia, USA, <http://www.vadiodes.com/>.
- [2] A. Roggenbuck, H. Schmitz, A. Deninger, I. Cámara Mayorga, J. Hemberger, R. Güsten, and M. Grüninger. Coherent broadband continuous-wave terahertz spectroscopy on solid-state samples. *New Journal of Physics*, 12(4):043017, 2010.

- [3] K.P. Cheung and D.H. Auston. A novel technique for measuring far-infrared absorption and dispersion. *Infrared Physics*, 26(1):23 – 27, 1986.
- [4] P. Y. Han, M. Tani, M. Usami, S. Kono, R. Kersting, and X.-C. Zhang. A direct comparison between terahertz time-domain spectroscopy and far-infrared fourier transform spectroscopy. *J. Appl. Phys.*, 89(4):2357–2359, 2001.
- [5] N. Kida, Y. Ikebe, Y. Takahashi, J. P. He, Y. Kaneko, Y. Yamasaki, R. Shimano, T. Arima, N. Nagaosa, and Y. Tokura. Electrically driven spin excitation in the ferroelectric magnet  $\text{DyMnO}_3$ . *Phys. Rev. B*, 78(10):104414, 2008.
- [6] M. F. Kimmitt, J. E. Walsh, C. L. Platt, K. Miller, and M. R. F. Jensen. Infrared output from a compact high pressure arc source. *Infrared Physics and Technology*, 37:471–477, 1996.
- [7] J. E. Harris. *Systems and Components*, volume 6 of *Infrared and Millimeter Waves*, chapter Infrared and Submillimeter Spectroscopy of the Atmosphere, pages 2–65. Academic Press, Inc. Ltd., London, 1982.
- [8] Peter R. Griffiths and James A. de Haseth. *Fourier Transform Infrared Spectrometry*. Chemical Analysis: A Series of Monographs on Analytical Chemistry and Its Applications. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2nd edition, 2007.
- [9] Gennadi Kozlov and Alexander Volkov. *Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids*, volume 74 of *Topics in Applied Physics*, chapter Coherent Source Submillimeter Spectroscopy, pages 50–109. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.
- [10] D. H. Martin. *Systems and Components*, volume 6 of *Infrared and Millimeter Waves*, chapter Polarizing (Martin-Puplett) Interferometric Spectrometers for the Near- and Submillimeter Spectra, pages 66–149. Academic Press, Inc. Ltd., London, 1982.
- [11] John Strong and G. A. Vanasse. Lamellar grating far-infrared interferometer. *J. Opt. Soc. Am.*, 50:113, 1960.
- [12] Infrared Laboratories, Inc. Tucson, Arizona, USA, <http://www.irlabs.com/>.
- [13] P. L. Richards. Bolometers for infrared and millimeter waves. *J. Appl. Phys.*, 76:1, 1994.
- [14] ESA mission Planck, part of Cosmic Vision Programme. <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=Planck/>.



- [15] H. D. Drew and A. J. Sievers. A  $^3\text{He}$ -cooled bolometer for the far infrared. *Appl. Opt.*, 8(10):2067–2071, 1969.
- [16] Mark Halpern, Herbert P. Gush, Edward Wishnow, and Vittorio De Cosmo. Far infrared transmission of dielectrics at cryogenic and room temperatures: glass, fluorogold, eccosorb, stycast, and various plastics. *Appl. Opt.*, 25:565–570, 1986.
- [17] Sciencetech, Inc. London, Ontario, Canada, <http://www.sciencetech-inc.com/>.
- [18] D. A. Harper, R. H. Hildebrand, R. Stiening, and R. Winston. Heat trap: an optimized far infrared field optics system. *Appl. Optics*, 15:53, 1976.
- [19] Robert J. Cava. A useful pyramid scheme. *Physics*, 4:7, Jan 2011.
- [20] A. Sanna, G. Profeta, A. Floris, A. Marini, E. K. U. Gross, and S. Massidda. Anisotropic gap of superconducting  $\text{CaC}_6$ : A first-principles density functional calculation. *Phys. Rev. B*, 75(2):020511 (R), 2007.
- [21] U. Nagel, D. Hüvonen, E. Joon, J. S. Kim, R. K. Kremer, and T. Rõõm. Far-infrared signature of the superconducting gap in intercalated graphite  $\text{CaC}_6$ . *Phys. Rev. B*, 78(4):041404, 2008.
- [22] R. E. Glover and M. Tinkham. Transmission of superconducting films at millimeter-microwave and far infrared frequencies. *Phys. Rev.*, 104(3):844–845, Nov 1956.
- [23] P. L. Richards and M. Tinkham. Far-infrared energy gap measurements in bulk superconducting In, Sn, Hg, Ta, V, Pb, and Nb. *Phys. Rev.*, 119(2):575–590, Jul 1960.
- [24] R. C. Ohlmann and M. Tinkham. Antiferromagnetic resonance in  $\text{FeF}_2$  at far-infrared frequencies. *Phys. Rev.*, 123(2):425–434, Jul 1961.
- [25] Robert W. Smith and Douglas A. Keszler. Synthesis, structure, and properties of the orthoborate  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ . *Journal of Solid State Chemistry*, 93(2):430 – 435, 1991.
- [26] H. Kageyama, K. Yoshimura, R. Stern, N. V. Mushnikov, K. Onizuka, M. Kato, K. Kosuge, C. P. Slichter, T. Goto, and Y. Ueda. Exact dimer ground state and quantized magnetization plateaus in the two-dimensional spin system  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ . *Phys. Rev. Lett.*, 82:3168–3171, 1999.
- [27] B.S. Shastry and B. Sutherland. Exact ground state of a quantum antiferromagnet. *Physica*, 108B:1069–1070, 1981.
- [28] H. Kageyama, M. Nishi, N. Aso, K. Onizuka, T. Yosihama, K. Nukui, K. Kodama, K. Kakurai, and Y. Ueda. Direct evidence for the

- localized single-triplet excitations and the dispersive multitriplet excitations in  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ . *Phys. Rev. Lett.*, 84:5876–5879, 2000.
- [29] H. Nojiri, H. Kageyama, K. Onizuka, Y. Ueda, and M. Motokawa. ESR study on the excited state energy spectrum of  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$  – a central role of multiple triplet bound states. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 72(12):3243–3253, 2003.
- [30] T. Rõõm, U. Nagel, E. Lippmaa, H. Kageyama, K. Onizuka, and Y. Ueda. Far-infrared study of the two-dimensional dimer spin system  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ . *Phys. Rev. B*, 61(21):14342–14345, 2000.
- [31] T. Rõõm, D. Hvonen, U. Nagel, J. Hwang, T. Timusk, and H. Kageyama. Far-infrared spectroscopy of spin excitations and Dzyaloshinskii-Moriya interactions in the Shastry-Sutherland compound  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ . *Phys. Rev. B*, 70(14):144417, 2004.
- [32] A. Gozar, B. S. Dennis, H. Kageyama, and G. Blumberg. Symmetry and light coupling to phononic and collective magnetic excitations in  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ . *Phys. Rev. B*, 72:064405, 2005.
- [33] T. Rõõm, D. Hvonen, U. Nagel, Y.-J. Wang, and R. K. Kremer. Low-energy excitations and dynamic Dzyaloshinskii-Moriya interaction in  $\alpha'$ - $\text{NaV}_2\text{O}_5$  studied by far-infrared spectroscopy. *Phys. Rev. B*, 69(14):144410, 2004.
- [34] Dan Hvonen, Urmas Nagel, Toomas Rõõm, P. Haas, M. Dressel, J. Hwang, T. Timusk, Y.-J. Wang, and J. Akimitsu. Magneto-optic far-infrared study of  $\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ : Triplet excitations in chains. *Phys. Rev. B*, 76:134418, 2007.
- [35] D. Hvonen, U. Nagel, T. Rõõm, Y. J. Choi, C. L. Zhang, S. Park, and S.-W. Cheong. Magnetic excitations and optical transitions in the multiferroic spin-(1/2) system  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$ . *Phys. Rev. B*, 80(10):100402, 2009.
- [36] Shunsuke Furukawa, Masahiro Sato, and Shigeki Onoda. Chiral order and electromagnetic dynamics in one-dimensional multiferroic cuprates. *Phys. Rev. Lett.*, 105(25):257205, Dec 2010.



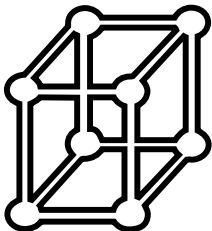
**XLI  
EESTI  
FÜÜSIKAPÄEVAD**

**JA**

**XXXIII  
FÜÜSIKAÕPETAJATE PÄEVAD**

**22. JA 23. MÄRTS 2011**

**TARTUS**



**22.–23. MÄRTS 2011. A**

**XLI EESTI FÜÜSIKAPÄEVAD JA  
XXXIII FÜÜSIKAÕPETAJATE PÄEVAD**

**TÄHE 4, TARTU**

**TEISIPÄEV, 22. MÄRTS**

1. SESSIOON

Avasõnad .....	10.00
EFS preemiate kätteandmine, laureaadi ettekanne .....	10.10
<b>Harry Alles</b> (TÜ FI)	
2010. a Nobeli füüsikapreemia .....	11.10
Stendiettekanded, kohvipaus .....	11.30

2. SESSIOON

<b>Vladimir Hižnjakov</b> (TÜ FI)	
Heelium-3 ja heelium-4 kvantvedeliku tilkade spektroskoopia .....	11.45
<b>Stefan Groote</b> (TÜ FI)	
Universum katseklassis ehk mida kaootilised stringid meile reedavad .....	12.15
<b>Kaupo Kukli<sup>1</sup>, Aile Tamm<sup>1</sup>, Mukesh C. Dimri<sup>2</sup> ja Raivo Stern<sup>2</sup></b> (TÜ FI <sup>1</sup> , KBFI <sup>2</sup> )	
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 sealt 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

*Kohvipaus*

Eesti Füüsika Seltsi üldkogu ..... 16.30

Eesti Füüsika Seltsi seltsiõhtu Tähe 4 kohvikus  
(Seltsiõhtule on vaja registreeruda, tasudes osavõtumaksu  
4 eurot EFS pangaarvele (Eesti Füüsika Selts, 1120073071,  
märksõna „seltsiõhtu, nimi”), saab tasuta ka füüsikapäevadel) .. 18.00

### KOLMAPÄEV, 23. MÄRTS

#### 4. SESSIOON

#### **Leonid Dolgov, Siim Pikker, Valter Kiisk ja Ilmo Sildos (TÜFI)**

Plasmonics, what on earth is that? ..... 9.30

#### **Els Heinsalu (KBFI), Marco Patriarca (KBFI),**

#### **Robert Kitt (TTÜ KÜBI) ja Jaan Kalda (TTÜ KÜBI)**

Ülevaade majandusfüüsikast Eestis ..... 10.00

#### **Andi Hektor (KBFI)**

CERN + kosmoseeksperimentid = väga põnevad arengud  
osakestefüüsikas ..... 10.30

#### *Kohvipaus*

Ettekanne (täpsustamisel) ..... 11.15

Ettekanne (täpsustamisel) ..... 11.45

Stendiettekanded, lõunapaus ..... 12.15

#### FÜÜSIKAÕPETAJATE SESSIOON

#### **Riina Murulaid, Jaan Paaver**

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

*Kohvipaus* . . . . . 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

**Jaan Järvik** (TTÜ/AM Instituut)

Ketserlike mõtteid õppimisest ja elektrist . . . . . 15.15

Füüsikaõpetajate osakonna üldkogu, arutelu, 2011. a plaanid . . . . 15.45

STENDISESSIOON

Kutsume üles tooma välja kõiki oma 2010. a või  
2011. a ette kantud stende!

# UNIVERSUM KATSEKLAASIS EHK MIDA KAOOTILISED STRINGID MEILE REEDAVAD

---

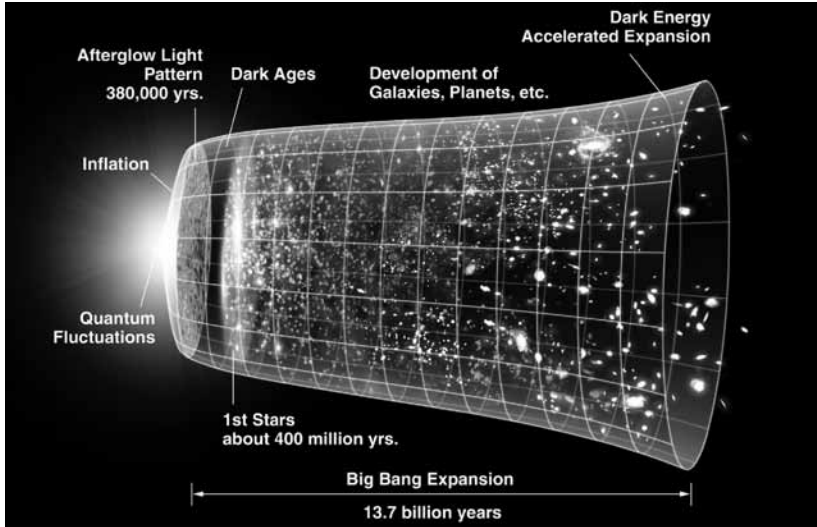
**STEFAN GROOTE**  
TÜ Füüsika Instituut

Ettekandes tutvustatakse kooatilisi stringe puhta matemaatilise mudelina, mis lubab vastata mõningatele küsimustele kaasaegses elementaarosakeste füüsikas ja kosmoloogias. Siiani on seletamata osakeste massispekter, tumeenergia päritolu ja neljamõõtmelise ruumi arenemine 11-mõõtmelisest muutkonnast protsesside käigus, mis on tuntud „Suure Paugu“ nimetuse all. Protsessi on vaadeldud uuest, filosoofilisest vaatenurgast toimununa mitte aegruumis, vaid aegruumi moodustavana. Ettekanne ei saa muidugi käsitleda kõiki vaatenurki detailselt, kuid annab loodetavasti ülevaate ja hinnangu teemast, mis on autori jaoks põnev ja haarav.

## 1. SISSEJUHATUS

Öösel tähtede ilu imetledes tundub, et maailmaruum meie ümber on igavesti püsiv ja liikumatu – välja arvatud planeetide ja kuude liikumine ja relatiivne liikumine, mis tekib maakera pöörlemisel ümber oma telje ja tiirlemisel ümber oma kesktähe – Päikese. Sügavasse maailmaruumi vaadates avaneb täiesti teine pilt – maailmaruum paisub pidevalt väikese küll, aga ikkagi mõõdetava kiirusega, mille mõõduks on Hubble'i konstant  $H_0 = 2,3 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ . Hubble'i konstant tuletatakse kaugete galaktikate punanihkkest, mis on seda suurem, mida kaugemal galaktika meist on.

Põhimõtteliselt saab Hubble'i konstandi pöördväärtusest arvutada maailmaruumi ehk universumi vanust. Selgub, et kõik on 13,7 miljardit aastat tagasi ühest punktist tekkinud. See teooria, mida 1931. a Belgia preester ja astrofüüsik Georges Edouard Lemaître (1894–1966) avaldas, nimetati hiljem (rohkem vastaste kui pooldajate algatusel) taunivalt Suure Paugu teooriaks. Täna on see teooria üldiselt vastu võetud.



Joonis 1. Universumi arengu skeem (NASA/WMAP Science Team).

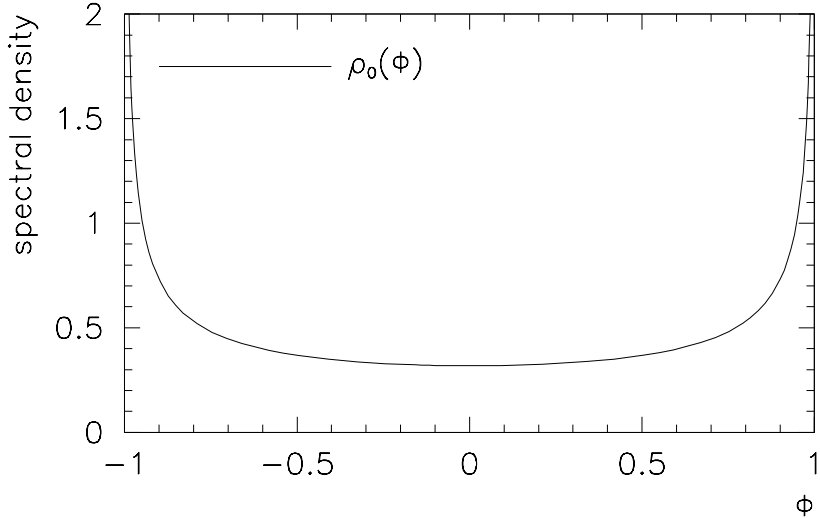
Teadlased on selgeks teinud, kuidas võib ette kujutada universumi esimest miljonit aastat, tuhandet aastat, sekundeid ja sekundite murdosi, kuigi sõna „ettekujutamine“ on siin väga petlik (vt joonist 1). Kõige suuremad küsimused jäävad siiski vastamata:

- millest kõik tuli?
- mis oli enne Suurt Pauku?

Viimase küsimusega jääme hätta. Kui kõik, nii aine kui energia, on alles Suures Paugus tekkinud, siis sellega ka aeg ja ruum. Ruum ilma igasuguste aineosakesteta kaotab oma mõtte, ja aeg ilma liikumisteta samuti. Juba Einsteini erirelatiivsusteooria on võtnud meilt absoluutse ruumi mõiste, ja tänapäeva filosoofid seovad aja ja ruumi olemasolu otseselt millegi „seal“ toimuvaga. Kui aga aeg ja ruum tekkisid koos aine ja energiaga, siis millest need omakorda tekkisid?

Näitan ettekandes, kuidas kaootiliste stringide matemaatiline mudel saab seletada mõnesid elementaarosakeste füüsikas ja astrofüüsikas veel seletamata jäänud asjaolusid ja lõpuks (hüpoteetiliselt) ka aegruumi tekke Suure Paugu raames. Matemaatikast kasvab välja füüsika samal viisil, nagu füüsikast keemia, keemiast bioloogia ja bioloogiast „elu“. Kaootilised stringid on nagu katseklaasid, millest saab aimu universumi arengu algusest.



Joonis 2. Invariantne tihedus  $\rho_0(\Phi)$ .

## 2. KAOOTILISED STRINGID

### 2.1. TŠEBÕŠEVI POLÜNOOMID

Kaootilised stringid on rajatud Tšebõševi polünoomidele

$$T_1(\Phi) = \Phi, T_2(\Phi) = 2\Phi^2 - 1, T_3(\Phi) = 4\Phi^3 - 3\Phi, \dots \quad (1)$$

Polünoomid moodustavad väga lihtsa kujutise, millel on kaks sobivat omadust. Esiteks on kujutis  $\Phi^{n+1} = T_N(\Phi^n)$  juhul  $N > 1$  ergoodne, mis tähendab, et pika iteratsiooni käigus kaotavad väärtused oma sõltuvust algväärtusest ning alluvad jaotusele  $\rho_0 = 1/\pi\sqrt{1-\Phi^2}$  (vt joonist 2). Seda omadust nimetatakse pseudokaootilisuseks. Teiseks on polünoomide vastastikune seos (korrelatsioon) kõikidest pseudokaootilistest kujutistest väikseim [1,2].

Tšebõševi polünoomid, mida saab kirjutada ka kujul

$$T_N(\Phi) = \cos(N \arccos \Phi) \quad (2)$$

on semikonjugeeritud Bernoulli informatsiooni  $N$  sümbolite nihkega.

## 2.2. KAOOTILISTE STRINGIDE KUUS TÜÜPI

Kui asetame Tšebõševi kujutisi abstraktse ruumi punktidesse  $i$  ja kaasame Laplace'i seose kaudu „naaberpunktid“  $i - 1$  ja  $i + 1$ , siis punkti  $i$  järgmine iteratiivne väärtus on

$$\Phi_{n+1}^i = (1-a)T_N(\Phi_n^i) + s\frac{a}{2}(T_{N^b}(\Phi_n^{i+1}) + T_{N^b}(\Phi_n^{i-1})) \quad (3)$$

( $s = \pm 1$ ,  $b = 0, 1$ ). Nii tekib ühemõõtmeline objekt, mis tsükliliste ääretin-gimuste korral on kaootiline string. Täpsemalt on kaootiline string mate-maatiline objekt, millel on

- üks tsükliline dimensioon (asukoha parameeter  $i$ ) ja
- üks fiktiivne arengudimensioon (arenguja parameeter  $n$ ).

Vastavalt parameetritele  $N$ ,  $s$  ja  $b$  leiduvad järgnevad stringi tüübid:

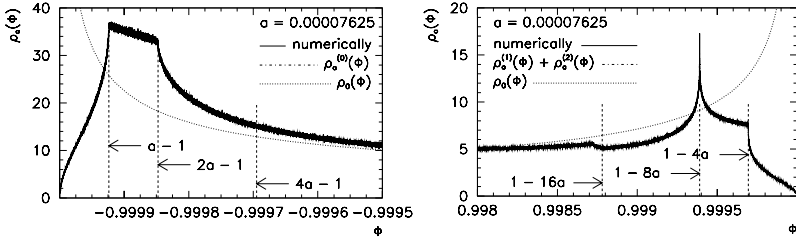
- $NA$  string ( $b = 1$ ,  $s = +1$ ) kirjeldab difuusset edasiseost,
- $NB$  string ( $b = 0$ ,  $s = +1$ ) kirjeldab difuusset tagasiseost,
- $NA^-$  string ( $b = 1$ ,  $s = -1$ ) kirjeldab antidifuusset edasiseost,
- $NB^-$  string ( $b = 0$ ,  $s = -1$ ) kirjeldab antidifuusset tagasiseost.

Edasiseosed on need, kus enne Laplace'i seost rakendatakse naabritele ka Tšebõševi kujutist, tagasiseosed aga need, kus seda ei rakendata,  $T_{N^0}(\Phi) = T_1(\Phi) = \Phi$ . Tagasiseosed mõjuvad efektiivselt arenguja vastassuunas. Difuussed seosed tulenevad diskreetsest difusioonivõrrandist, kus kahekordne tuletis on asendatud kombinatsiooniga  $\Phi^{i+1} - 2\Phi^i + \Phi^{i-1}$ . Antidifuusse seose korral on relatiivne märk vastupidine,  $-\Phi^{i+1} - 2\Phi^i - \Phi^{i-1}$ . Tuletise mõiste taastub, kui asendada igas teises punktis  $\Phi^i \rightarrow -\Phi^i$ . Seega on antidifuussed seosed võimalikud ainult paaris  $N$  korral.

Nagu mainitud, pole  $N = 1$  Tšebõševi polünoomid ergoodsed. Selle-pärast jätame praegu  $N = 1$  stringid arutelust välja. Samuti näivad  $N > 3$  stringid mitte midagi uut andvat võrreldes  $N = 2, 3$  stringidega. Seega jääme kuue stringiga,  $3A, 3B, 2A, 2B, 2A^-$  ja  $2B^-$ .

## 2.3. SÕLTUVUS SEOSEPARAMEETRIST

Mainimata jäi kõige tähtsam, nimelt stringide omaduste sõltuvus seose-parameetrist  $a$ . Kui  $a = 0$ , siis naabrid ei mõjuta, nii et jääme Tšebõševi iteratsiooniga  $\Phi_{n+1}^i = T_N(\Phi_n^i)$ . Naabrite mõjul aga muutub jaotus  $\rho_a(\Phi)$  võrreldes jaotusega  $\rho_0(\Phi)$ . Joonisel 3 on nähtavad jaotusfunktsiooni vasak- ja parempoolsed ääred. Viites [3,4] on näidatud, kuidas leitud struk-



Joonis 3. Jaotusfunktsiooni  $\rho_a(\Phi)$  vasak- ja parempoolneäär seoseparameetri  $a = 0,00007625$  jaoks. Murdjoonega on tähistatud jaotusfunktsioon  $\rho_0(\Phi)$ .

tuuri saab semianalüütiliselt esitada. Samuti on näidatud, et sellest järel-  
dub vaadeldavate  $\langle f(\Phi) \rangle$  skaleerimisomadus.

#### 2.4. OMAENERGIA JA VASTASTIKMÕJU ENERGIA

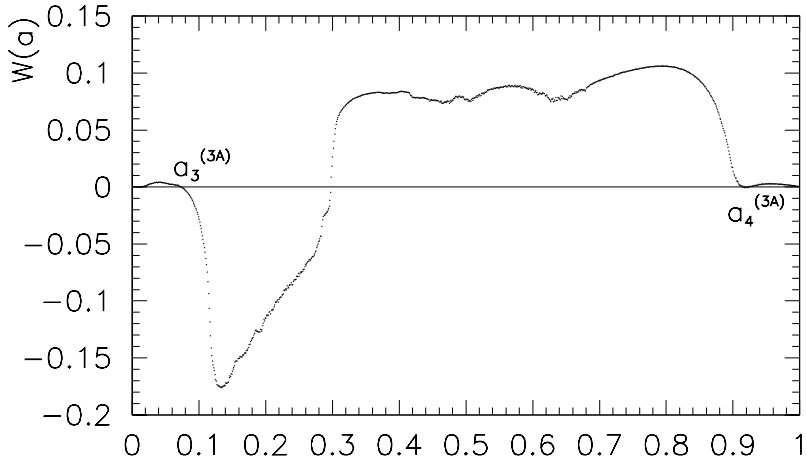
Kas matemaatilistel objektidel nagu kaootilistel stringidel saab olla vaadeldavaid ja milliseid neid on? Lahutades iteratsiooni (3) kahte ossa saab esimest (mittelinearset) osa  $\Phi_n^i = T_N(\Phi_n^i)$  vaadata kirjeldavana jõudu, mis viib  $\Phi$ -st  $\Phi'$ -le. Vastav potentsiaal on stringi *omaenergia*  $V^{(N)}(\Phi)$ ,

$$V^{(2)}(\Phi) = -\frac{2}{3}\Phi^3 + \Phi, \quad V^{(3)}(\Phi) = -\Phi^4 + \frac{3}{2}\Phi^2, \quad \dots \quad (4)$$

Teine (lineaarne) osa  $\Phi_{n+1}^i = (1-a)\Phi_n^i + a/2(\pm\Phi_n^{i+1} - 2\Phi_n^i \pm \Phi_n^{i-1})$  on eespool mainitud Laplace'i seos, mis kirjeldab naabrite omavahelist seost. Sellest järel-  
dub *vastastikmõju energia*  $W(\Phi) = \Phi_n^{i-1}\Phi_n^i/2$ . Kaootiline string nagu eelfüüsikaline süsteem eelistab seisundeid, kus omaenergia on minimaalne või vastastikmõju energia on negatiivse tõusuga null.

### 3. SEOSEPARAMEETER JA STANDARDMUDEL

Et kasutada kaootilisi stringe nagu katseklaase, peab uurima, kas on seost stringide nullide ja miinimumide ning kaasaegse füüsika vahel. Niisugused katsed on kaugel sellest, et me saame seosest õigesti aru. Me oleme nagu uudishimulikud lapsed, kes püüavad katsetest seoseid aima-  
ta ja kasutavad selleks oma kõige paremaid andeid – intuitsiooni ja analoogiat. Vaatamata sellele, et niisugustest katsetest „klaasis“ ilmub palju huvipakkuvat, mis ulatub palju kaugemale kui igati teostatav füüsikaline



Joonis 4. 3A-stringi vastastikmõju energia sõltuvus parameetrist  $a$ .

□

katse nagu Suure Hadronite Põrguti (LHC) oma, on vastav teooria tõepoolest arendamata. See ei ole häbilugu, vaid rohkem väljakutse, mis on vastu võetud Tartu–Londoni koostööna (ülevaateks on C. Becki raamat [5] või artikkel [6]).

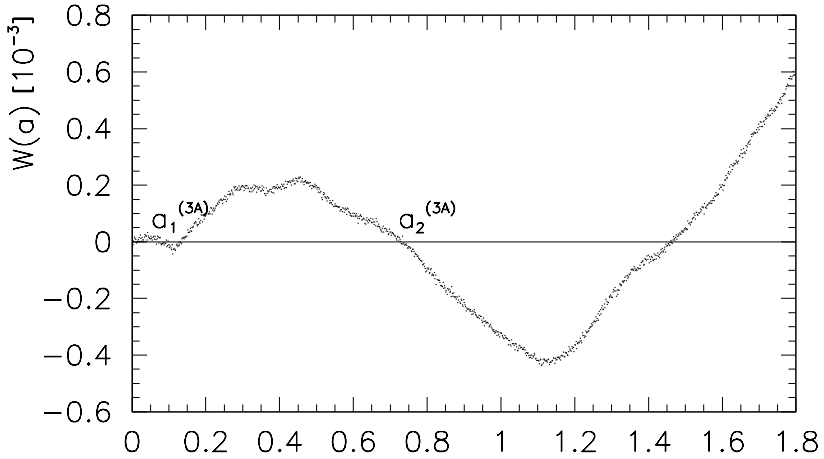
Just sellest vaatenurgast ongi järgnevad „katsed“ mõistetavad – mitte nagu teadmine, vaid pigem vihjed sellest, mida kaootilised stringid võivad parandada füüsikale, kui füüsika tuleneb tõepoolest matemaatikast. Õeldu kinnituseks vaatleme esiteks 3A-stringi vastastikmõju energiat joonisel 4.

### 3.1. 3A-STRINGI VASTASTIKMÕJU ENERGIA

Lisaks kahele joonisel 4 nähtavale nullile leidub  $a = 0$  lähedal veel kaks olulist nulli. Pika stringi ja paljude iteratsioonide korral saab nullid päris täpselt määrata. Väärtustes

$$a_1^{(3A)} = 0,0073038(17), \quad a_2^{(3A)} = 0,0008164(8) \quad (5)$$

peitub juba esimene üllatus:  $a_1^{(3A)}$  on peaaegu sama nagu tuntud  $1/137$ , mis on elektromagnetilise vastastikmõju seosekonstant, ja  $a_2^{(3A)}$  on umbes  $1/9$  sellest väärtusest. Niimoodi jõuame esimesele tähtsale järeldusele: *seoseparameetrit saab samastada füüsikalise seosekonstandiga*. Aga mis see  $1/9$  tähendab? Teame, et tegelik elektromagnetiline jõud on



Joonis 5. 3A-stringi vastastikmõju energia sõltuvus parameetrist  $a$  (detail).  $a [10^{-2}]$

võrdeline laengute korrutisega. Järelikult võib  $a_2^{(3A)}$  samastada laenguga  $-1/3$  osakeste seosega. Arvesse võttes renormeerimisteooriast tulevat seosekonstantide „jooksmist“ (st energiasõltuvust) osutub, et  $\alpha_{ei}(3m_e) = 0,007303$  ning  $\alpha_{ei}(3m_d)/9 = 0,0008165$ . Nullide väärtused langevad nende väärtustega hästi kokku. Kordaja 3 argumendis on seotud järguga  $N = 3$ .

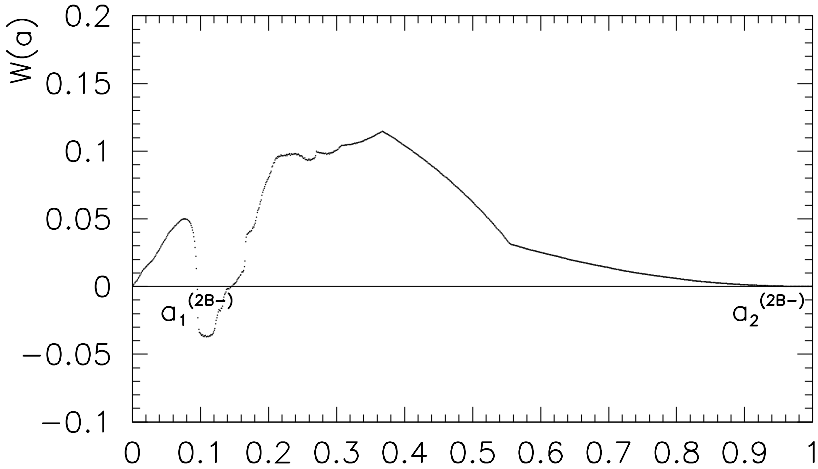
### 3.2. $2B^-$ -STRINGI VASTASTIKMÕJU ENERGIA

Tegelikult pakub iga string midagi huvitavat. Kuna kõigest me siin ei saa rääkida, siis mainin vaid, et  $2B^-$ -stringi vastastikmõju energia avastab midagi uut: nulli

$$a_1^{(2B^-)} = 0,095370(1) \quad (6)$$

ei saa enam samastada elektromagnetilise seosekonstandiga või murdosaga sellest. Abiks peab võtma tugeva vastastikmõju seosekonstandi  $\alpha_s$ , mis samuti „jookseb“, aga vastupidises suunas kui  $\alpha_{ei}$ . Osutub, et  $a_1^{(2B^-)} = \alpha_s(E)$ , kui  $E = m_H + 2m_q$  on Higgsi bosoni ja kahe kvargi massi summa. Arvesse võttes Higgsi bosoni massi praeguseid piiranguid on ainus võimalik valik t-kvark ja Higgsi bosoni mass

$$m_H = 154,4(5) \text{ GeV}. \quad (7)$$



Joonis 6.  $2B$ -stringi vastastikmõju energia sõltuvus seoseparameetrist  $a$ .

Selle valiku õigustuseks võib mainida, et umbes sama  $m_H$  väärtus tuleneb ka ühest  $2B$ -stringi miinimumidest.

### 3.3. KAOOTILISTE STRINGIDE ENNUSTUSVÕIMEST

Peale Higgsi bosoni massi saab suure täpsusega määrata kõigi olemasolevate elementaarosakeste massid (vt 6. peatükki artiklist „Mass elementaarosakeste füüsikas“ samas aastaraamatus). Seda võimaldab juba mainitud skaleerimisomadus, mis tähendab, et seoseparameetri  $a$  väikestel väärtustel kordub miinimumide muster vahemikkudes, mis vähenevad neli korda seoseparameetri  $a$  lähenemisel oma piirväärtusele  $a = 0$ . Skaleerimisel on oma eeliseid ja puuduseid. Nii on võimalik neutriinode pisikeste masside ennustamine. Teisalt aga vajab selgust, missugust skaleerimisvahemikku kasutada.

Ka koostisosakeste masse saab kirjeldada, kui täisenergiate

$$H_{\pm}(a) = V(a) \pm aW(a) \quad (8)$$

miinimumid sobivalt siduda mesonite ( $H_{-}(a)$ ) ja barüonide ( $H_{+}(a)$ ) massidega. Oletades, et seos parameetri  $a$  ja seosekonstantide vahel Standardmudelil on olemas, saab ennustada ka väga kõrgetel energiatel, kus leidub palju ruumi tumeaine osakeste jaoks. Veel saab mõtteid mõlgutada ka Suur-

te Ühenduste teooriast. Null  $a_2^{(2B)} = 1$  joonisel 6 näiteks võib vastata viimase ühenduse punktile, kus energia on Plancki energia, nii et gravitatsiooniline seosekonstant saab üheks. Järeldusi universumi võimalikust arengust leidub samuti artiklis „Mass elementaarosakeste füüsikas“ peatükis 6.2.

### 3.4. VEEL KÜSIMUSI JA VASTUSEID

- *Kas stringid seletavad ka tumeenergiat?* Seletavadki, nagu artiklis [7] näidatud. Kaootiliste stringide ergastus ongi just tumeenergia, ja seega „tunneme“ kaootiliste stringide mõju tänapäevani.
- *Kas kaootilised stringid peavad ühemõõtmelised olema?* Peavadki, sest selgub, et kõrgematel dimensioonidel kaob miinimumide peenstruktuur skaleerimisrajoonis täielikult [8].
- *Kas kaootilised stringid peavad olema pikad?* Tegelikult alati ei pea. Selgub, et eelmainitud peenstruktuur tekib ka pikkusega 3 stringil [9].
- *Kas saab nulle ja miinimume usaldada?* Mitte alati. Vaja on ergooduse analüüsi, mis on vastastikmõju energia puhul läbi viidud [10].

## 4. JA KUST TULEB AEGRUUM?

Kaootilistel stringidel põhinev universumi arengu pilt ennustab, et (pre-) universum jõuab staadiumisse, kus seoseparameeter on  $a = 1$ . Sellel „hetkel“ juhtub mõndagi olulist: seoseparameeter  $a$  asendub oma pöördväärtusega, gravitatsiooniline ja pseudoelektromagnetiline jõud hargnevad, tekib üliraske neljanda pere lepton, ja pseudoelektromagnetilisest jõust sünnib kaks erinevat jõudu. Kõigepealt aga tekivad aeg ja ruum 1-stringidest. Kuidas nii? On neli erinevat (mitteergoodset) 1-stringi,

$$\begin{aligned}
 +1^+ (N = +1, s = +1): \Phi_{n+1}^i &= +(1-a)\Phi_n^i + \frac{a}{2}(\Phi_n^{i+1} + \Phi_n^{i-1}), \\
 +1^- (N = +1, s = -1): \Phi_{n+1}^i &= +(1-a)\Phi_n^i - \frac{a}{2}(\Phi_n^{i+1} + \Phi_n^{i-1}), \\
 -1^+ (N = -1, s = +1): \Phi_{n+1}^i &= -(1-a)\Phi_n^i + \frac{a}{2}(\Phi_n^{i+1} + \Phi_n^{i-1}), \\
 -1^- (N = -1, s = -1): \Phi_{n+1}^i &= -(1-a)\Phi_n^i - \frac{a}{2}(\Phi_n^{i+1} + \Phi_n^{i-1}). \tag{9}
 \end{aligned}$$

Juhul  $a = 1$  on aga just stringid  $3B$ ,  $2B$ ,  $+1^+$  ja  $-1^-$  ning  $2B^-$ ,  $-1^+$  ja  $+1^-$  omavahel samased. Sel „hetkel“ annavad  $N = 2, 3$  stringid oma ergastuse edasi 1-stringide ergastuse algväärtuseks. Kui areng jätkub, surevad 1-stringi väljad  $\Phi_n^i$  küll ära, aga märgid neist jäävad ikkagi. Tekib neli erinevat mustrit (ülespoole on arenguaeg, paremale on koht stringis):

+ + + +	+ - + -	+ + + +	+ - + -
+ + + +	+ - + -	- - - -	- + - +
+ + + +	+ - + -	+ + + +	+ - + -
+ + + +	+ - + -	- - - -	- + - +

Kolm viimast mustrit kattuvad, kui pöörata  $\pm 45^\circ$ , esimene aga on erinev. Samas saab pöörete kaudu ruumisuunad ära vahetada, aga mitte ajasuunda ruumisuunaga, sest ajal on ainult üks suund. Silmade ees on nüüd niisugune eriline (hüpoteetiline, aga ilus) pilt, kus  $N = 2, 3$  stringide koostöös tekib aegruum. Erinevad stringid „koovad“ oma eripära „kangasse“, milles massiseisundid ilmuvad massiivsete osakestena aegruumis. Universum on „sündinud“, Suur Pauk on toimunud.

Eriti viimane väide vajab veenvamat toetust. Samuti on omaenergia ja vastastikmõju energia peenstruktuur veel seletamata. Loodetavasti saab vihjeid sellest, kui sobitada erinevaid stringe või stringi seoseid [11] või uurida stringe rühmateoreetiliselt. Igatahes oleme teel selgusele.

## VIITED

- [1] C. Beck, *Nonlinearity* 4 (1991) 1131
- [2] A. Hilgers, C. Beck, *Physica* D156 (2001) 1
- [3] S. Groote and C. Beck, *Phys. Rev.* E74 (2006) 046216
- [4] S. Groote and C. Beck, *Dyn. Syst.* 22 (2007) 219
- [5] C. Beck, “Spatio-Temporal Chaos and Vacuum Fluctuations of Quantized Fields”, in *Advanced Series in Nonlinear Dynamics*, Vol. 21, World Scientific, Singapore, 2002
- [6] C. Beck, *Physica* D171 (2002) 72
- [7] C. Beck, *Phys. Rev.* D69 (2004) 123515
- [8] M. Maher, C. Beck, *Chaos Sol. Fractals* 37 (2008) 9
- [9] S. Groote, H. Veermäe, *Chaos Sol. Fractals* 41 (2009) 2354
- [10] M. Schäfer, C. Beck, *Dynamical Systems* 25 (2010) 253
- [11] M. Schäfer, M. Greiner, to appear in *Chaos Sol. Fractals* (2011)



# MAJANDUSFÜÜSIKA EESTIS

---

**MARCO PATRIARCA<sup>1,2</sup>, ELS HEINSALU<sup>1,2</sup>,  
ROBERT KITT<sup>3,4</sup>, JAAN KALDA<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>KBFI

<sup>2</sup>Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos, Hispaania

<sup>3</sup>TTÜ Küberneetika Instituut

<sup>4</sup>Swedbank AS

## 1. SISSEJUHATUS

Mõiste „majandusfüüsika“ („econophysics“), mille pakkus 1995. aastal Kolkatas välja E. H. Stanley, on olnud kasutusel 15 aastat, ent majanduses toimuvaid protsesse on statistilise füüsika meetodeid kasutades uuritud juba varasemast ajast. Näiteks V. Pareto formuleeris oma kuulsa kasumi jaotuse seaduse juba 1897. aastal [1] ning kõigest kolm aastat hiljem võttis L. Bachelier kasutusele uitliikumise mudeli kui majanduslike ajajadade baasmudeli [2]. E. Majorana näitas, et statistiline mehaanika on töövahend, mida saab kasutada ka sotsiaalteadustes [3]. Aastal 1963 leidis B. Mandelbrot, et puuvilla hinna ajajadades esinevad suured fluktuatsioonid [4]. Kaheksakümnendatest aastatest alates on majandusfüüsika uurimine toimunud kiirenevas tempos, eriti peale nimetatud mõiste kasutuselevõttu. Aastatuhande vahetuse paiku pöördusid ka Eesti füüsikute pilgud uuele valdkonnale ning nende töö tulemusena on praeguseks ilmunud üle 15 teadusartikli.

Majandus on suurepärase näide kompleksüsteemide kohta: mitmed omavahel interakteeruvad ehituskivid moodustavad kvalitatiivselt uute omadustega terviku, mille tüüpilisteks joonteks on juhumuutlikkus ja mastaabi-invariantne käitumine. Majanduse puhul on aga juba ehituskivid ise — majandustehinguid sooritavad inimesed — tegelikult väga keerulised elemendid. See kujutab olulist erinevust võrreldes „lihtsate“ kompleksüsteemidega, nagu seda on näiteks liivakuhilad ja turbulentsed voolud. Kompleksüsteemide füüsikast on teada, et isegi „lihtsad“ ehituskivid võivad viia ekstreemsele juhumuutlikkusele ning

teoreetiline analüüs osutada vägagi raskeks. Seetõttu pole üllatav, et majandusfüüsikast võib leida kõige äärmuslikemaid keerukuse näiteid.

Mida on võimalik teha säherduse ülimalt keerukuse korral? Tõenäoliselt ei ole eriti mõttekas konstrueerida detailseid mudelid, kuna on võimatu võtta arvesse kõiki „ebamõistlikke“ kauplemissstrateegiaid. Seega jääb järele kaks varianti: esiteks, me võime koostada väga *robustseid mudelid*, mis vaatamata suurtele ebatäpsustele suudavad haarata majandusdünaamika teatavaid üldisemaid jooni. Näiteks turuhindade kõikumiste astmeseaduse tuletamiseks võib uurida juhuslikult interakteeruvate kauplejate kogumit [5]. Analoogselt, kasutades Pareto seaduse järgi jaotatud aktsiaturu osaliste ansamblit ning postuleerides kaubitsejate optimaalsed käitumisstrateegiad, võib tuletada suurte turuhinnahüpete astmeseaduse [6]. Alternatiivina võib turgude ajalis-ruumilise käitumise üldiste statistiliste kirjelduste kavandamisel kasutada (*pool*)-*empirilist* lähenemist. Näiteks võib kasutada pakkumis- ja tehinguhindade andmebaase demonstreerimaks, et finantsturgudel on kaks erinevat käitumisfaasi: peale tasakaalulise faasi on olemas ka faas, kus kõige tõenäolisemaks käitumiseks on kas müümine või ostmine [7]. Teiseks näiteks võib tuua uurimuse, mis demonstreerib, et turutehingute põhjustatud hinnamuutuste sõltuvus tehingusuurusest on kirjeldatav ühtse astmeseadusega, kui võtta arvesse erinevate majandussektorite erinevat turu-kapitaliseerumise määra [8].

Eestis on esindatud mõlemad, nii robustsetel mudelitel kui ka pool-empirilisel analüüsil baseeruvad lähenemised. Esimese suunaga on seotud peamiselt Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi uurimisrühm, teise suunaga aga Mittelineaarsete Protsesside Uurimiskeskus Tallinna Tehnikaülikooli Küberneetika Instituudis.

## 2. MITME AGENDI HEAOLU VAHETUSE MUDELID

Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi teadlased on uurinud suletud majandussüsteemide *kineetilisi heaolu vahetuse mudelid* (KHVM). Seda tüüpi mudelid kerkisid sõltumatult esile sellistes erinevates distsipliinides nagu sotsiaalteadused [9–11], majandus [12–14] ja (majandus)füüsika [15, 16]. 2005. aastal toimunud rahvusvaheline konverents *Econophys-Kolkata I* [17] omas olulist rolli seni uuritud erinevate mudelite ühendamisel, juhtides tähelepanu John Angle [18] ja Eleonora Bennati [19] varasema-

tele töödele ning tuues välja peamise mehhanismi, mis viib KHVM-des astmelise sõltuvuse ilmnemisele heaolu statsionaarses jaotuses.

Vaadeldes, milline on KHVM-de üldine struktuur ning omadused. KHVM-i korral koosneb süsteem  $N$  agendist, kelle olek mingil ajahetkel  $t$  on iseloomustatud heaolu väärtustega  $x_i(t) \geq 0$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ). Lihtsate mudelite korral interakteeruvad agendid omavahel paarikaupa: igal ajahetkel vahetavad kaks juhuslikult valitud agendi  $j$  ja  $k$  heaolu hulga  $\Delta x$  nii, et kogu heaolu on konstantne. Pärast sellist vahetust on agentide  $j$  ja  $k$  heaolu uuteks väärtusteks,

$$\begin{aligned} x'_j &= x_j - \Delta x, \\ x'_k &= x_k + \Delta x \end{aligned} \quad (1)$$

( $x'_j, x'_k \geq 0$ ). Suuruse  $\Delta x$  kuju defineerib mudeli dünaamika; kõige lihtsamal juhul on  $\Delta x$  konstantne [12–14], ent ta võib olla ka  $x_j, x_k$  ja mõne teise agente iseloomustava parameetri funktsioon [20]. Keerukamate mitme agendi interaktsioonimudelite korral on tehingus osalevate agentide arv  $M > 2$ . Sellisel juhul omab evolutsiooni seadus üldisemat kuju,  $x'_i = x_i + \Delta x_i$ , kus  $i = 1, \dots, M$ ,  $\sum_{i=1}^M \Delta x_i = 0$ , ning  $\Delta x_i$  sõltub  $M$  interakteeruva agendi heaoludest  $x_i$ .

KHVM-de korral on agendid tavaliselt iseloomustatud kõigest ühe parameetri kaudu. Näiteks võib selleks olla vahetusparameeter  $\omega \in (0, 1]$ , mis määrab ära, milline osa heaolust  $x$  osaleb vahetusprotsessis. Samaväärselt vahetusparameetriga võib sisse tuua kokkuhoiuparameetri,  $\lambda = 1 - \omega$ , mis määrab ära, milline osa heaolust  $x$  säilitatakse vahetuse käigus. Kui  $\omega$  (või  $\lambda$ ) väärtus on kõikide agentide jaoks sama, nimetatakse mudelit *homogeenseks*. Kui agendid omavad erinevaid väärtusi  $\omega_i$  (või  $\lambda_i$ ), siis kutsutakse mudelit *heterogeenseks*. Nagu on leitud artiklis [21], määrab parameeter  $\omega$  (või  $\lambda$ ) ära ka relaksatsiooni protsessi ajaskaala. Artiklis [20] on esitatud erinevate paarikaupa interakteeruvate agentidega KHVM-de unifitseeritud formuleering.

Parameetri väärtuste  $\omega < 1$  (või  $\lambda > 0$ ) korral omavad KHVM-d omadust koonduda stabiilsesse olekusse, mida iseloomustab heaolu jaotus, mille mediaan on nullist erinev, erinevalt eksponentsiaalse jaotuse juhust. See on hästi aproksimeeritud  $\Gamma$ -jaotusega, mis kirjeldab tegelikke heaolu jaotusi väikeste ja keskmiste heaolu väärtuste korral, mis iseloomustavad suuremat osa agentidest [22]. Artiklis [23] on näidatud, et töös [15] välja pakutud homogeenne KHVM, mis on defineeritud  $\Delta x = \omega(\bar{\epsilon}x_j - \epsilon x_k) = (1 - \lambda)(\bar{\epsilon}x_j - \epsilon x_k)$  poolt, kus  $\epsilon$  ja  $\bar{\epsilon} = 1 - \epsilon$  on kaks uniformset

juhuslikku arvu vahemikus  $(0, 1)$ , omab tasakaalulist heaolu jaotust  $f_n(x)$ , mis on väga sarnane järgmise  $\Gamma$ -jaotusega,

$$\frac{\langle x \rangle}{n} f_n(x) = \left( \frac{nx}{\langle x \rangle} \right)^{n-1} \frac{e^{-nx/\langle x \rangle}}{\Gamma(n)} = \frac{\xi^{n-1} e^{-\xi}}{\Gamma(n)} \equiv \gamma_n(\xi). \quad (2)$$

Siin  $\xi = nx/\langle x \rangle$ , kus  $n(\lambda) = (1 - 2\lambda)/(1 - \lambda)$ ,  $\langle x \rangle = \sum_i x_i/N$  on süsteemi (kons-tantne) keskmine heaolu ning  $\gamma_n(\xi)$  on  $\Gamma$ -jaotus. Artiklis [20] on esitatud võrdlus erinevate KHVM-de tasakaaluliste heaolu jaotuste vahel.

Vaadeldes nüüd, milline on seos KHVM-de ja statistilise füüsika vahel. Vahetusseaduse kuju (1) vihjab analoogiale energia ülekandega vedeliku molekulide vahel [17, 24, 25]. Veelgi enam, jaotus (2) on statistilisest mehaanikast hästi tuntud, esindades näiteks  $D = 2n$  dimensionaalse gaasi molekulaarkineetilise energia jaotust, kui keskmine kineetiline energia on  $\langle x \rangle = DT/2 = nT$ , kus  $T$  on temperatuur. Sellist otsust seost KHVM-de ja statistilise füüsika vahel kinnitab ka standardse kineetilise teooria lähenemine *à la* Clausius, mis näitab, et homogeenised KHVM-i agendid kokkuhoiuparameetriga  $\lambda$  käituvad dünaamiliselt nagu  $D(\lambda) = 2n(\lambda)$  dimensionaalse gaasi molekulid [26].

Artiklis [27] on näidatud, et kui kõik agendid üritavad kokku hoida nii palju kui võimalik ( $\lambda \rightarrow 1$ ), siis jaotus (2) kaldub olema egalitaarne, s.t lõpuks omavad kõik agendid sama suurt heaolu  $\langle x \rangle$ .

Kuigi  $\Gamma$ -jaotus on hea lähendus heaolu statsionaarsete jaotuste jaoks, ei ole see arvatavasti täpne lahend [28]. Heaolu tasakaalulise jaotuse kuju on ikka veel intensiivsete otsingute objektiks [11, 20, 28, 29].

Nagu juba mainitud, väikeste ja keskmiste heaolu väärtuste korral, mis iseloomustavad suuremat osa agentidest, on reaalsed heaolu jaotused hästi lähendatavad  $\Gamma$ -jaotuse poolt [22]. Ülejäänud agendid, keda iseloomustab heaolu suur väärtus ning kes moodustavad süsteemist väikese osa, ent omavad olulise osa kogu heaolust, on kirjeldatavad Pareto astmelise sõltuvusega. Säärased astmelise sõltuvuse sabad on reprodutseeritud heterogeensete mudelite poolt. Tõepoolest, nagu arutatud artiklis [30], heterogeensed mudelid, kus agendid on iseloomustatud erinevate parameetri väärtustega  $\omega_i$  (või  $\lambda_i$ ), viivad nii eksponentsiaalse või  $\Gamma$ -jaotuse ilmnemisele väikeste ning keskmiste heaolu väärtuste korral kui ka Pareto astmelise sõltuvuse ilmnemisele heaolu suuremate väärtuste juures.

Seega mängib heterogeensus olulist rolli astmelise sõltuvuse saba

ilmnemisel: astmeline sõltuvus on produtseeritud erinevate parameetritega  $\Gamma$ -jaotustega lähendatavate üksikute agentide heaolu jaotuste summa poolt. Teisisõnu, globaalne heaolu jaotus koosneb eksponentsiaalse sabaga heaolu osajaotustest. Artiklis [31] on välja pakutud, et see on kõigest üks näide üldisemast mehhanismist, mis viib astmelise sõltuvuse ilmnemisele paljudes teistes kompleksüsteemides, kaasa arvatud Zipfi seadus lingvistikas, s.t astmelise sõltuvuse ilmnemine sõnade järgu jaotuses kirjalikus tekstis.

Artiklis [21] on uuritud KHVM-i heaolu ja ajaskaalasid. Heterogeense KHVM-i korral on iga agendi  $i$  heaolu ja ajaskaala määratud parameetri  $\lambda_i$  (või  $\omega_i$ ) poolt. Agent kokkuhoiuparameetriga  $\lambda_i$  omab relaksatsiooniga  $\tau_i \propto 1/(1 - \lambda_i)$ . Seega on globaalse heterogeense süsteemi relaksatsiooniaeg  $\tau$  määratud suurima kokkuhoiuparameetriga  $\Lambda = \max\{\lambda_i\}$  järgmiselt:  $\tau \propto 1/(1 - \Lambda)$ . Heterogeense KHVM-i korral võib ilmned astmeline sõltuvus. Sellisel juhul omab heaolu statsionaarne jaotus loomuliku heaolu skaalat, mis on esindatud kriitilise heaoluga  $X$ , mille korral astmeline sõltuvus lõppeb ning heaolu jaotus läheb nulli.  $X = \max\{x_i\}$  esindab rikkaima agendi heaolu. Kriitiline heaolu  $X$  ja kriitiline kokkuhoiuparameeter  $\Lambda$  on teineteisega tihedasti seotud: mida lähedasem on  $\Lambda$  väärtus ühele, seda suurem on  $X$ . See on kooskõlas ka ütlemisega, et rikas ei ole mitte see, kes teenib palju, vaid see, kes vähe kulutab.

Kokkuvõttes, KHVM-d on minimaalsed mudelid suletud majanduste jaoks, kus heaolu kogu suurus  $\sum_i x_i$  on konstantne, ning seega on nad kasutatavad kirjeldamiseks süsteeme, kus rahavoog on jääv. Siiski on märkimisväärne, et KHVM-d annavad sellegi poolest heaolu statsionaarsete jaotuste jaoks realistlikud kujud, viidates sellele, et heaolu dünaamika põhineb kahel peamisel faktoril: kahe agendi vahel toimuv mikroskoopiline vahetuse mehhanism ning agentide heterogeensus.

### 3. RAHANDUSLIKE AJAJADADE POOL-EMPIIRILISED UURINGUD

Küberneetika Instituudis on majandusfüüsikalises teadustöös kasutatud peamiselt pool-empiriiliste meetodite lähenemist. Uuringud said alguse praktilisest vajadusest: toonases Hansapangas seati Robert Kiti ülesandeks optimaalsete portfelliide konstrueerimine. Selgus, et traditsioonilised optimaalse aktsiaportfelliidstruktuuri koostamise ökonomeetrilised

mudelid viisid ebastabiilsetele tulemustele [32]. Esimesed uuringud olid võrdlemisi lihtsad: eesmärgiks oli kontrollida kohaliku turu „regulaarsust“ analüüsidest Balti turuindeksite eneseafiinseid astmeseadusi ja võrreldes neid vastavate näitajatega globaalsetel turgudel [33]. Kooskõlas varasemate uuringutega [34] leidis kinnitust, et Balti turuindeksite ajajadad on statistiliselt eneseafiinised. Ent Hursti astmenäitaja väärtused olid mõnevõrra suuremad (0,6–0,7) kui suuremate ja pikema aja jooksul väljakujunenud turgude korral (ca 0,5). Selle alusel pakuti välja hüpotees, et uutele ja tasakaalustumata turgudele on iseloomulik hinnakõikumiste tugevam positiivne korreleeritus.

Tänapäeval on üldteada asjaolu, et eneseafiinne käitumine kujutab endast vaid kitsast mastaabivabaduse erijuhtu; seetõttu pole majanduslike ajajadade kirjeldamine Hursti astmenäitaja abil kaugeltki ammendav. Eelnevalt sai arutletud, et turgude dünaamika on olemuslikult väga keeruline protsess. Mõistmaks selle statistilisi omadusi, on seega vajalik formalism, mis oleks nii üldine kui võimalik. Multifraktaalsus katab juba märksa laiemat mastaabivabaduse klassi, hõlmates ka Gaussi seadusele mitte-alluvaid signaale ning on näidatud, et majanduslikud ajajadad on tõepoolest multifraktaalse iseloomuga [35, 36]. Ent ka multifraktaalsuse korral peavad kehtima teatavad eeldused, eeskätt on nõutav juhusliku multiplikatiivse spektraalse kaskaadi olemasolu. Tugeva turbulentsi puhul on see eeldus loomulikult viisil täidetud, sest keskkonna liikumisse „külmunud“ suurused (enstroofia, energia) antakse keeriste arenemise käigus üle järgmisele generatsioonile — suuremast keerisest jagunemise teel moodustunud väiksematele keeristele. Samal ajal ei ole turgude fluktuatsioonide puhul olemas ei „enstroofiat“ ega multiplikatiivseid kaskaade. Kui kogu turgudel liikuv rahasumma säiliks ja turud jaguneksid mingite protsesside toimel väiksemateks fragmentideks, siis võiks see põhjustada multifraktaalsust; paraku aga sellist turgude jagunemist reaalsuses ei toimu. Seetõttu oleks vaja välja arendada selline mastaabivabade ajajadade kirjeldamise statistiline meetod, mis oleks veel üldisem kui multifraktaalne formalism. Selle eesmärgi nimel sai välja töötatud meetod, mis kannab nime *madala muutlikkusega perioodide multiskaleerumise analüüs* (MPM) [37, 38].

Vaadelgem ajajada  $x(t)$ , kus  $x$  võib kujutada endast näiteks aktsiaindeksi väärtust. Sellisel juhul on madala muutlikkusega periood pikkusega  $l_i$  defineeritud kui ajaintervall  $T_i = [t_p, t_i + l_i]$  ( $i = 1, 2, \dots$ ), mille puhul:

(a)

$$|x(t) - \langle x(t) \rangle_\tau| \leq \delta \text{ kui } \tau \in T_i \quad (3)$$

$\delta$  on läviparameeter ja nurksulud tähistavad keskmistamist üle libiseva akna pikkusega  $\tau > \tau_0$  (põhimõtteliselt võib kasutada suvalise laiusega aknaid, kuid meetod saavutab suurima lahutusvõime ja suurima skaleerumisvahemiku siis, kui akna laius hoida nii väike kui võimalik, piirdudes ajajada resolutsioonisammu  $\tau_0$  mõnekordse väärtusega);

(b) iga periood omab maksimaalset võimalikku väärtust, s.t  $t_i$  suurendamine või  $l_i$  vähendamine viiks võrrandi (3) rikkumiseni.

Pangem tähele, et võrrandi (3) vasak pool võib olla alternatiivselt normaliseeritud libiseva keskmisega  $\langle x(t) \rangle_\tau$ . See lubab parendada analüüsi väga pikkade ajajadade korral, mis on iseloomustatud hinna eksponentsiaalse kasvuga. Eeskätt pakub meile huvi madala muutlikkusega perioodide kumulatiivne pikkusjaotus  $R(n)$  (selliste perioodide arv, mille puhul  $l_i \geq n$ ). Me räägime multiskaleersest käitumisest, kui kehtib astmeseadus

$$R(n) = R_0 n^{-\alpha(\delta, \tau)}, \quad (4)$$

kus  $\alpha(\delta, \tau)$  on skaleeringu astmenäitaja ja  $R_0$  on konstantne suurus. Märkigem, et selle meetodi erijuhtu (kus  $\tau$  on fikseeritud võrdseks ajajada resolutsioonisammuga  $\tau_0$ ) on hiljuti uuritud ka teiste uurimisgruppide poolt [39, 40].

Artiklites [37, 41] näitasid Küberneetika Instituudi teadlased teoreetiliselt, et multifraktaalsete ajajadade korral on tegemist ka MPM analüüsile alluva käitumisega; see järeldus on leidnud ka sõltumatut empiirilist kinnitust [39]. Edasi selgub, et astmenäitaja  $\alpha(\delta, \tau)$  on avaldatav Hursti astmenäitaja multifraktaalse spektri  $f(h)$  kaudu [37]:

$$\alpha(\delta, \tau) = f(\log_\tau \delta). \quad (5)$$

Sellal kui multifraktaalne spekter on ühe muutuja funktsioon, on MPM astmenäitaja kahe muutuja funktsioon ja seega on MPM-analüüs suuteline kirjeldama laiemat mastaabivabade signaalide klassi. Juhul, kui uuritav signaal allub MPM-kirjeldusele, siis võimaldab võrrand (5) kontrollida multifraktaalsuse olemasolu. Tõepoolest, kui esitada andmed graafikul, mille telgedele on kantud  $\alpha$  ja  $\log_\tau \delta$  väärtused, siis võrrandi (5) kohaselt peaksid erinevatele parameetrite  $\tau$  ja  $\delta$  väärtustele vastavad

punktid langema ühele ja samale kõverale; juhul, kui seda ei toimu ning punktid paiknevad hajusa pilvena, siis võib järeldada, et multifraktaalsus puudub. Kirjeldatud meetodi abil leiti, et kui parameeter  $\tau$  omab ühest päevast suuremaid väärtusi, siis käituvad valuutavahetuskursid ning aktsiaturuindeksid võrdlemisi lähedaselt multifraktaalsele mudelile [37]. Märkigem, et multifraktaalsete ajajadade korral asendab MPM-meetod edukalt multifraktaalset analüüsi, omades seejuures kahte väikest eelist: seda on võimalik rakendada ka siis, kui multifraktaalne mudel ei kehti, ning see võimaldab uurida suurimale võimalikule sagedusele vastavaid astmenäitajaid [sõltuvuse  $\alpha(\delta, \tau)$  puhul võib kasutada kitsaimat ajaakent,  $\tau = \tau_0$ , kuid spektri  $f(h)$  korral eeldab iga  $h$  väärtus skaleerumist teatavas sageduste vahemikus, mis katab vähemalt paari oktaavi ajamastaape].

Üheks MPM-meetodi rakenduseks on aktsiaturgude tehingumahude analüüs [42]. Kõikide uuritud aktsiaindeksite tehingumahude puhul oli täheldatav multiskaleeruv käitumine, kuid teljestiku  $\alpha - \log_r \delta$  kasutamisel ei toimunud andmepunktide kollapsit ühele kõverale. See viis järeldusele, et multifraktaalsus pole antud andmejadade jaoks piisavalt heaks mudeliks. MPM-meetodit on lihtne üldistada paralleelsete andmejadade analüüsimiseks. Olgu paralleelseteks signaalideks aktsiahind ja tehingumaht; piisab, kui kasutada kahte läviparameetrit, millest ühte rakendame tehingumahu ja teist hinna jaoks. Nüüd on üheks võimaluseks defineerida madala muutlikkusega periood kui ajavahe-mik, mil kumbki signaalidest ei ületa vastavat läviparameetrit; teiseks võimaluseks on nõuda, et vähemalt üks signaalidest püsiks allpool lävi-väärtust. Niisuguse meetodi rakendamine võimaldas tuvastada hinna ja tehingumahu vahelise tugeva paardumise olemasolu [42].

On näidatud ka, et niipea kui hinnamuutused alluvad MPM-käitumisele, kehtib omapärane super-universaalne astmeseadus: läviväärtusest suurema hinnamuutuse tõenäosus („rahuperioodi lõpu“ tõenäosus) on pöördvõrdeline käimasoleva „rahuperioodi“ (s.t madala muutlikkusega perioodi) pikkusega. Super-universaalseks nimetatakse astmeseadust siis, kui vaadeldav astmenäitaja ei sõltu teistest (süsteemi kirjeldavatest) astmenäitajatest. Teoreetilises mõttes on tegemist peaaegu et triviaalse tõdemusega, kuid reaalsete rahandus-ajajadade põhjal oli seda võrdlemisi keeruline demonstreerida: kasutatavad ajajadad on „jõumeetodil“ analüüsimiseks liiga lühikesed ega paku piisavalt statistilist materjali. Sellest raskusest on võimalik üle saada hõreda andmematerjali töötlemiseks sobiliku uudse meetodi konstrueerimise abil [41]; ennustatud



super-universaalne astmeseadus leidis kinnitust kõigi uuritud andmejadade puhul.

Mõnevõrra sõltumatu uurimisteemana on Küberneetika Instituudis uuritud probleemi, mis on otseses seoses töös [32] vaadeldud praktiliste rakendustega: kuidas optimeerida portfelle, kui võtta arvesse hindade juhumuutlikkust (Gaussi seadusele mitte-alluvat statistikat). Efektiivse turu hüpoteesile tuginedes võib väita, et aktsiaturgude hinnamuutused jäävad igal juhul allapoole müranivood. Igasugune vastunäide oleks ekvivalentne termodünaamika teise seaduse rikkumisega; ja isegi kui õnnestuks leida „teist liiki igiliikur“, s.t meetod mürataset ületavate aktsiahinnamuutuste prognooside tegemiseks, siis lakkaks see „igiliikur“ töötamast kohe peale publitseerimist. Samal ajal ei rakendu antud fundamentaalne piirang riskiprognosidele; niisiis kujutavad riskide optimeerimise meetodite parendamise püüded endast igati mõtestatud tegevust.

Portfelli koostamise probleem toob meid tagasi majandusfüüsika ja mittelineaarsete ajajadade analüüsi alustalade juurde: kuidas peaksid käituma investorid finantsturgudel, kui nad koguvad väärtpapereid oma portfelli? Nobelist Markowitz postuleeris (eeldades, et hinnamuutused finantsturgudel alluvad Gaussi seadusele), et riskimõduna tuleb kasutada hinna standardhälvet [43]. Väärtpapierikollektsiooni hinna standardhälbe optimeerimine on lineaarse portfelliteooria nurgakiviks. Samal ajal võib tõstatada küsimuse: mis on aktsiaturgudesse investeerimisel *tõeline* riskiallikas/riskimõõt? Üheks võimaluseks on kirjeldada riski kahekomponendilisena: üheks komponendiks on Gaussi statistikaga prognoositav risk, teine aga nn leptokurtiline risk, s.t Gaussi jaotusest kõrvalekalduvate hinnafluktuatsioonidega seotud risk. Neile kahele komponendile vastavad korrelatsioonimaatriksid võivad olla oluliselt erinevad, mistõttu võivad tunduvalt erineda ka vastavad riskikomponente minimeerivad aktsiapositsioonid. Niisiis tuleb portfelli koostades esmalt vastata küsimusele, millist riski tahetakse minimeerida. Kui selleks on Gaussi statistikaga riski minimeerimine, siis tuleb jääda keskmise standardhälbe optimeerimise juurde.

Kui eesmärgiks on kindlustada end äärmuslike (kuid harvade) hinnamuutuste vastu, siis tuleb valida teine tee. Lihtsaimaks meetodiks on ignoreerida väikeseid (Gaussi statistikale alluvaid) fluktuatsioone, mis jäävad allapoole läviväärtust (see kujutab endast meetodi kontrollparameetrit), ja koostada portfell suurte (astmeseadusliku jaotusfunktsiooni „sabale“ vastavate) hinnamuutuste korrelatsioonimaatriksi kohaselt.

Selle meetodi korral kerkib esile täiendav probleem: kuivõrd suuremat osa andmepunkte ignoreeritakse, siis väheneb korrelatsioonimaatriksi statistiline usaldatavus. Seetõttu on oluline vältida läviparameetri liiga suuri väärtusi ning rakendada täiendavaid meetodeid (nt faktoranalüüsi). Kirjeldatud strateegiat rakendati ja analüüsiti uurimuses [44] lihtsaima, kahte tüüpi aktsiatega portfelli korral. Oodatult andis mitte-Gaussilist riski optimeeriv portfell mõnevõrra suurema standardhälbe (võrrelduna traditsiooniliselt optimeeritud portfelliga), kuid portfelli väärtuse suured ja järsud langused jäid märgatavalt väiksemaks. Loomulikult ei saa niisugused uurimused vastata põhiküsimusele: mida siis ikkagi minimeerida, väikeseid hinnakõikumisi või suuri ja järske langusi? Vastus sellele küsimusele jääb paratamatult subjektiivseks otsuseks, kuid mõnikord osutub selle tegemine lihtsaks; toogem (paraku küll mitte-ideaalse) paralleeli lennundusest: mida on tähtsam minimeerida, kas vibratsioone salongis või allakukkumise tõenäosust?

#### 4. KOKKUVÕTE JA VÄLJAVAATED

Käesolev ülevaade Eestis seni tehtud majandusfüüsika alastest uurimustest on pühendatud ingliskeelse mõiste „econophysics“ 15. aastapäevale. Vastav eestikeelne termin „majandusfüüsika“ sündis aastal 2001, kui R. Kitt alustas oma doktoritööd, ja on seega oma ingliskeelsest „vanemast vennast“ umbes poole noorem. Samas on sellel „nooremal vennal“ „vanema venna“ ees ka üks eelis: kui eesliide „econo“ võib viia mõtted kokkuhoiule, siis liide „majandus“ on taolisest ballastist prii.

Absoluutarvudes võetuna on Eesti teaduslikult aktiivsete majandusfüüsikute kogukond väike, koosnedes vaid kuuest inimesest, ning senini on kaitstud vaid üks doktoritöö [45]. Samal ajal teeb see välja neli majandusfüüsikut miljoni elaniku kohta, mis pole enam kaugeltki väike number. Peale selle usume, et oleme saavutanud mitmeid olulisi tulemusi. Otsesed kontaktid teadlaste ja Eesti suurima panga vahel annavad ligipääsu suurtele andmemassiividele, mida oleks muul viisil raske saavutada.

Paraku tuleb tõdeda, et Eesti ülikoolides praegu majandusfüüsikat ei õpetata. Seminare aeg-ajalt siiski peetakse; samuti korraldati Tartu Ülikoolis M. Patriarca poolt 2007. aastal kaks kompleksüsteemide kursust, mille käigus anti (teiste teemade kõrval) ülevaade ka majandusfüüsika peamistest ideedest. Lisaks sellele töötab R. Kiti käe all praegu üks Tal-

linna Tehnikaülikooli majandusteaduskonna doktorant. Kõik see annab alust uskuda, et kiiresti edeneval teadussuunal, majandusfüüsikal, on häid arenguväljavaateid ka Eestis.

Käesolev artikkel on algselt ilmunud inglise keeles ajakirjas *Science and Culture* [46] ning on valminud sihtfinantseeritavate projektide SF0690030s09 ja SF0140077s08 ning Eesti Teadusfondi grantide 7466 ja 7909, samuti Hispaania MICINN projekti FISICOS (FIS2007-60327), Balearide Valitsuse ja FEDERi toetusel.

## VIITED

- [1] V. Pareto, *Cours d'économie politique* (Rouge, Lausanne, 1896-1897).
- [2] L. Bachelier, in *History of Actuarial Science*, edited by S. Haberman and T. A. Sibbett (Pickering and Chatto Publishers, London, 1995), vol. 7, p.15.
- [3] E. Majorana, *Scientia* 36, 55 (1942).
- [4] B. B. Mandelbrot, *J. Business* 36, 394 (1963).
- [5] T. Lux and M. Marchesi, *Nature* 397 (1999).
- [6] X. Gabaix, P. Gopikrishnan, V. Plerou, and H. E. Stanley, *Nature* 423, 267 (2003).
- [7] V. Plerou, P. Gopikrishnan, and H. Stanley, *Nature* 421, 1330 (2003).
- [8] H. Stanley, *Nature* 421, 1996 (2003).
- [9] J. Angle, in *Proc. Am. Soc. Stat. Ass., Social Statistics Section* (Alexandria, VA, 1983), p. 395.
- [10] J. Angle, *Social Forces* 65, 293 (1986).
- [11] J. Angle, *Physica A* 367, 388 (2006).
- [12] E. Bennati, *La simulazione statistica nell'analisi della distribuzione del reddito: modelli realistici e metodo di Monte Carlo* (ETS Editrice, Pisa, 1988).
- [13] E. Bennati, *Rivista Internazionale di Scienze Economiche e Commerciali* 35, 735 (1988).
- [14] E. Bennati, *Rassegna di lavori dell'ISCO X*, 31 (1993).
- [15] A. Chakraborti and B. K. Chakrabarti, *Eur. Phys. J. B* 17, 167 (2000).
- [16] F. Slanina, *Phys. Rev. E* 69, 046102 (2004).
- [17] A. Chatterjee, S. Yarlagadda, and B. K. Chakrabarti, eds., *Econophysics of Wealth Distributions - Econophys-Kolkata I* (Springer, 2005).
- [18] T. Lux, in Ref. [17] p. 51 (2005).

- [19] M. Patriarca, A. Chakraborti, K. Kaski, and G. Germano, in Ref. [17] p. 93 (2005).
- [20] M. Patriarca, E. Heinsalu, and A. Chakraborti, Eur. J. Phys. B 73 p. 145 (2010).
- [21] M. Patriarca, A. Chakraborti, E. Heinsalu, and G. Germano, Eur. J. Phys. B 57, 219 (2007).
- [22] V. Yakovenko and J. J. Barkley Rosser, arXiv:0905.1518 (2009).
- [23] M. Patriarca, A. Chakraborti, and K. Kaski, Physica A 340, 334 (2004).
- [24] B. Hayes, Am. Sci. 90, 400 (2002).
- [25] A. Chatterjee and B. Chakrabarti, Eur. Phys. J. B 60, 135 (2007).
- [26] A. Chakraborti and M. Patriarca, Pramana J. Phys 71, 233 (2008).
- [27] M. Patriarca, A. Chakraborti, and K. Kaski, Phys. Rev. E 70, 016104 (2004).
- [28] P. Repetowicz, S. Hutzler, and P. Richmond, Physica A 356, 641 (2005).
- [29] A. S. Chakrabarti and B. K. Chakrabarti, arXiv:0905.3972 (2009).
- [30] M. Patriarca, A. Chakraborti, and G. Germano, Physica A 369, 723 (2006).
- [31] A. Chakraborti and M. Patriarca, Phys. Rev. Lett. 103, 228701 (2009).
- [32] R. Kitt, *Equity asset allocation model for EUR-based Eastern European pension funds* (TTÜ, Tallinn, 2004).
- [33] R. Kitt, Proc. Estonian Acad. Sci. Phys. Math 52, 198 (2003).
- [34] N. Vandewalle and M. Ausloos, Physica A 246, 454 (1997).
- [35] A. Fisher, L. Calvet, and B. Mandelbrot, Cowles Foundation Discussion Papers 1166, Yale University (1997).
- [36] N. Vandewalle and M. Ausloos, The European Physical Journal B 4, 257 (1998).
- [37] R. Kitt and J. Kalda, Physica A 3 45, 622 (2005).
- [38] J. Kalda, M. Säkki, M. Vainu, and M. Laan, arXiv:physics/0110075v1 (2001).
- [39] M. Bogachev, J. Eichner, and A. Bunde, Phys. Rev. Lett. 99, 1 (2007).
- [40] W.-S. Jung, F. Z. Wang, S. Havlin, T. Kaizoji, H.-T. Moon, and H. E. Stanley, Eur. Phys. J. B 62, 113 (2008).
- [41] R. Kitt, M. Säkki, and J. Kalda, Physica A 388, 4838 (2009).
- [42] R. Kitt and J. Kalda, Physica A 353, 480 (2005).
- [43] H. Markowitz, The Journal of Finance 7, 77 (1952), ISSN 00221082.
- [44] R. Kitt and J. Kalda, The European Physical Journal B 50, 141 (2006).
- [45] R. Kitt, *Generalised scale-invariance in financial time series* (PhD thesis, Tallinn University of Technology Press, 2005).
- [46] M. Patriarca, E. Heinsalu, R. Kitt, and J. Kalda, Science and Culture 76, 374 (2010).

# POOLLÕPMATU KAHE- JA KOLME- DIMENSIONAALSE HEISENBERGI ANTIFERROMAGNEETIKU ÄÄRELÄHEDANE JA KESKELASUV PIIRKOND

---

NIINA VOROPAJEVA, ALEKSEI ŠERMAN

TÜ Füüsika Instituut

## SISUKOKKUVÕTE

Kasutades spinnlaine lähendust on uuritud elementaarergastusi ja lähinaabrite spinnide korrelatsioone poollõpmatutes kahe- ja kolmedimensionaalsetes Heisenbergi spinn-1/2 antiferromagneetikutes ruut/lihtsate kuubiliste võredega. Äärepinna olemasolu jagab antiferromagneetiku äärelähedaseks ja keskelasuvaks piirkonnaks, mis on iseloomustatud erinevate dominantsete spinn-ergastustega. Äärelähedases piirkonnas, mille moodustavad spinnide kaks äärele lähimat rida/kihti, koosneb spekter spinni pindlainete ( $d-1$ )-dimensionaalsest moodist. Siin  $d = 2$  või  $3$  on antiferromagneetiku dimensioonid. Antiferromagneetiku ülejäänud osa ergastused on  $d$ -dimensionaalsed seisvad spinnlained. Spinni pindlaine moodi madalama dimensiooni tõttu on seal lähinaabrite spinnide korrelatsiooni absoluutväärtus suurem kui keskelasuv ruumis, mis tekitab äärelähedaste spinnide korrelatsioonide kammstruktuuri [1]. Ääre poolt indutseeritud häirituste kirjeldamine spinn-ergastuste spektris on paljudes aspektides sarnane lokaalse defekti probleemiga [2]. Viimasel juhul on kristall häirituse poolt samuti jagatud kahte ossa, kus elementaarergastused on erinevad – defektilähedane osa lokaliseeritud olekutega ja kristalli ülejäänud osa ruumiliste olekutega.

- [1] N. Voropajeva and A. Sherman, Phys. Lett. A 373, 3473 (2009); Modern Phys. Lett. B 24, 2327 (2010); A. Sherman and N. Voropajeva, Int. J. Modern Phys. B 24, 979 (2010).
- [2] I. M. Lifshits, Sov. Phys. Usp. 7 (1965) 549.

# TARTU TÄHETORN: ASTRONOOMIAT KOOLIDELE

---

**JAAK JAANISTE<sup>1</sup>, TAAVI TUVIKENE<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>EMÜ, Tartu Tähetorni Astronoomiaring, <sup>2</sup>TO, Eesti Astronoomia Selts

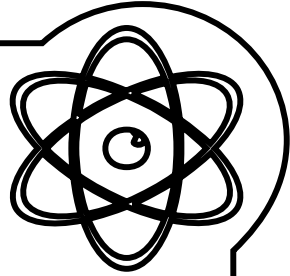
27. aprillil avab külastajatele ukсед renoveeritud Tartu Tähetorn. Praegu Tartu Ülikooli muuseumide süsteemi kuuluval 200-aastasel observatooriumil on lisaks maailmatasemel teadustööle alati olnud oluline roll Tartu kooli- ja kultuurielus. Seda tööd jätkab Tähetorn ka edaspidi.

Uuendatud Tähetorni idasaali jäävad ajaloolised vaatlusriistad ning teised stendieksponaadid. Läänesaali, mis pärast vahelae lammutamist on saanud oma esialgse kuju, hakkavad täitma interaktiivsed eksponaadid ja seda saab kasutada ka lektoriumina. Tööle hakkab planetaarium ja vaatlusriistana saja-aastane Zeissi refraktor.

Üritustest jätkuvad teispäevased astronoomialoengud ja avalikud vaatlusõhtud. Traditsiooniliselt on Tähetorn avatud õpilaste kevadvaheajal. Sihtasutuse Archimedes toel hakatakse Tähetornis õpetama planetaariumioperaatoreid ja astronoomiaringi juhendajaid. See programm ongi suunatud eelkõige kooliõpetajatele ning -õpilastele, eesmärgiga luua Eestisse harrastusastronoomia keskusi, mis oleksid toeks astronoomia õpetamisel koolides.

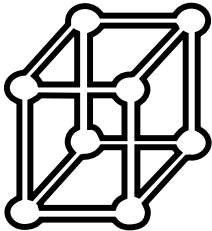
Astronoomiaõpetuse osatähtsus Eesti koolides on olnud kõikum, praeguste programmide valguses on ta selgelt madalseisus. Sellele vaatamata on meie täheteadlaste tööd olnud pidevalt maailmatasemel, tipptegijaid on ka harrastusastronoomide seas. Eesti koolinoored on viimaste aastate rahvusvahelistelt astronoomiaolümpiaadidelt toonud kokku 15 medalit. Meie soov on propageerida astronoomiat kui füüsika üht atraktiivsemat ja kättesaadavamat osa. Pole ju saladus, et maailma juhtivad tehnoloogiamaad USA, Jaapan ja Soome on juhtpositsioonil ka harrastusastronoomide suhtarvu poolest.

Operatiivset astronoomia-alast infot pakub astronoomiaportaali [www.astronoomia.ee](http://www.astronoomia.ee). Selle kaudu saab osaleda konkurssidel ning vastuseid astronoomiaga seotud küsimustele.



**EESTI FÜÜSIKA  
SELTS**

**2010**



## **EFS AUKIRJAD JA PREEMIAD**

### **EFS AASTAPREEMIA 2010**

#### DIPLOM

Eesti Füüsika Selts tunnistab oma aastapreemia vääriliseks

*Toomas Rõõmu ning  
KBFJ terahertsí ja madalate temperatuuride töörühma*

maailmatasemel terahertsspektroskoopia labori üles ehitamise ja eduka käivitamise eest.

Tunnustuseks annab Selts neile 2010. aasta numbrit kandva medali.

Tartus, 22. märtsil 2010. a.

EFS esimees

### **EFS ÜLIÕPILASPREEMIA 2009**

#### DIPLOM

Eesti Füüsika Selts tunnistab oma üliõpilaspreamia vääriliseks

*Martin Timuskí*

silmapaistva panuse eest uudsete elektro-optiliste pinnakatete arenduses.

Tartus, 22. märtsil 2010. a.

EFS esimees



**EFS AUKIRJAD 2010**

Eesti Füüsika Selts tunnustab aukirjaga

*Jaak Jõgi*

ennastsalgava töö eest uue põhikooli ainekava väljatöötamisel.

Tartus, 22. märtsil 2010. a.

EFS esimees

Eesti Füüsika Selts tunnustab aukirjaga

*Kalev Tarkpead*

ennastsalgava töö eest uue põhikooli ainekava väljatöötamisel.

Tartus, 22. märtsil 2010. a.

EFS esimees

Eesti Füüsika Selts tunnustab aukirjaga

*Riina Leeti*

ennastsalgava töö eest uute ainekavade väljatöötamisel ja ka EFS õpetajate osakonna vedamise eest eelmisel aastal.

Tartus, 22. märtsil 2010. a.

EFS esimees

## **EFS ÕPILASPREEMIA 2010**

### DIPLOM

Eesti Füüsika Selts tunnistab oma õpilaspreamia vääriliseks

*Agne Jõgise*

töö „Seebimulli füüsika“ eest.

Tartus, 22. märtsil 2010. a.

EFS esimees

### **TÄNUKIRI**

Eesti Füüsika Selts tänab

*Kadri-Ly Trahvi*

EFS õpilaspreamia saanud töö „Seebimulli füüsika“ autori Agne Jõgise juhendamise eest.

Tartus, 22. märtsil 2010. a.

EFS esimees

# EESTI FÜÜSIKA SELTSI JUHATUSE 2010. AASTA TEGEVUSARUANNE

Traditsioonilised Eesti füüsikapäevad toimusid 22.–23.03.2010. a 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 aastapremia, mille sai Toomas Rõõm KBFI terahertsi ja madalate temperatuuride tööühma maailmatasemel terahertsspektroskoopia labori üles ehitamise ja eduka käivitamise eest.

EFSi õpilaspremia sai Agne Jõgis töö „Seebimulli füüsika“ eest (juhendaja Kadri-Ly Trahv).

Ilmus EFSi aastaraamat 2009 (toimetajad Anna Aret, Helle Kaasik ja Piret Kuusk). EFSi listi seltsid.efs@lists.ut.ee ja EFSi kodulehte (www.fyysika.ee/efs) haldab Kaido Reivelt.

6.–7. märtsini toimunud Eesti koolinoorte 57. füüsikaolümpiaadil sai EFSi eriauhinna (ajakirja „Scientific American“ aastatellimuse) Erik Tamre (Tallinna Reaalkool, 10. kl).

Jätkusid EFSi mitmesugused füüsikat populariseerivad üritused. Taaivi Adambergi vedamisel jätkas oma tööd Teadusbuss Suur Vanker ja jätkus füüsikaportaali (www.fyysika.ee) arendamine. Ligi seitsmekümne TÜ LOTE tudengi ühise jõupingutusena korraldati järjekordsed Tähe Perepäevad „Täpe 2010“, sedakorda oli teemaks teadusteater, ette mängiti kõik parajasti Teadusbussi kavas olevad etendused.

EFS on koostöös TÜ Teaduskooliga korraldanud TÜ teaduslaagreid (www.teaduslaager.ee). 2010. a teaduslaager toimus 19.–25. juulini Kloogaranna noortelaagris. Osales 132 5.–9. klassi õpilast. Õpilased olid jagatud kuueks rühmaks, iga päeva sisustas üks teema. Teemadeks olid robotika, 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 käivitas 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 loodus-teadusliku hariduse andmisel. Koostati neli programmi (kaks füüsikas, üks bioloogias ja üks keemias), iga programm vastab  $8 \times 4 = 32$  h mahule. Õpikodadesse oli 2010. aasta lõpu seisuga registreerunud 1699 kasutajat (õpilased ja õpetajad), õpikojad toimuvad 25-s tugikoolis üle Eesti. Õpikodasid viivad läbi 38 juhendajat, kolme kuuga on toimunud 192 õpiko-da. Õpikodade programmi veebileht on [www.fyysika.ee/opikojad](http://www.fyysika.ee/opikojad).

Seltsi füüsikaõpetajate osakond korraldas EFS füüsikaõpetajate su-vekooli Tartus, Kohtla-Järvel ja Sillamäel. Teemaks oli keemia ja füüsi-ka lõiming – mõõtmised, eksperimendid. Tutvuti uue keemiahoonega, Kohtla-Järve TTÜ kolledžiga ja Silmeti tehasega. Osales 40 õpetajat.

Uute ainekavade rakendumisele kaasa aitamiseks kuulutas EFS välja gümnaasiumi füüsikaõpikute kirjutamise stipendiumikonkursi. Kon-kurs osutus edukaks ning õpikute kirjutamine on tänaseks päevaks ala-nud. Loodavad õpikud antakse välja nii traditsioonilisel paberkujul kui ka e-õpikuna. Ka e-õpiku väljatöötamine on juba käivitunud, EFS part-neriteks on siin Tiigrihüppe SA ja Webmedia.

Füüsikaõpetajate osakond korraldas kaks seminari füüsikaõpetajate võrgustiku arendamiseks. Esimene seminar toimus 5. detsembril Tar-tus, kus Riina Murulaiu eestvedamisel said kokku maakondade esin-dajad. Arutleti füüsikaõpetajate võrgustiku arendamise probleeme ja perspektiive. Teine seminar toimus 6.–8. jaanuarini Sakal. Seal käsitleti uurimuslikku õpet põhikoolis ja gümnaasiumikursust „Füüsikalise loo-duskäsitluse alused“ ning tehti ühistööd gümnaasiumi viie kohustusli-ku kursuse tunnijaotuskava koostamiseks. Füüsikaõpetajate võrgustiku tööd kajastab veebileht [www.fyysika.ee/vorgustik](http://www.fyysika.ee/vorgustik).

Eesti Füüsika Selts on läbi aasta organiseerinud GLOBE Eesti tegevust ([www.globe.ee](http://www.globe.ee)), kasutades selleks Euroopa Sotsiaalfondi projekti vahen-deid. Läbi on viidud GLOBE uurimistööde konkurss, suvelaager Jänedal (osales 150 õpetajat ja õpilast), õpilaskonverents Rakvere Reaalgümnaa-siumis ning õpetajate seminar Tartus. EFS on GLOBE'i kaudu algatanud programmi uurimusliku õppe ja uurimistööde tegemise toetamiseks Eesti koolides.

Noorfüüsikute osakonna eestvedamisel korraldati 18.–20. juunini Pärnseljal EFSi täppisteaduste suvekool ja 29.–31. oktoobrini Voore puh-kekeskuses EFSi täppisteaduste sügiskool. Suvekoolis osales kokku 67 ja sügiskoolis 119 tudengit, teadlast ja õppejõudu. Kuulati üle 30 tun-ni loenguid ja seminare. Töö toimus paralleelselt kahes auditooriumis.

Teemadest käsitleti kosmose- ja nanotehnoloogiaid, optikat, kvantmehaanikat ja arutleti füüsikahariduse teemadel ning esmakordselt kohustus sügiskoolis „Hea õppejõu klubi“. Organisaatoriteks olid Taavi Adamberg, Kaido Reivelt ja Aigar Vaigu.

2010. a astus EFSi 52 uut liiget. EFS kuulub jätkuvalt Euroopa Füüsikaühingusse.

EFSi ettevõtmisi toetasid aastal 2010 TÜ Füüsika Instituut, Eesti Teaduste Akadeemia, Haridus- ja Teadusministeerium, Tiigrihüppe SA, Hasartmängumaksu nõukogu, Tartu Ülikool, Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut, 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 2010. a

## AASTA PILT 2010



4. oktoober 2010. Just on alanud õpikodade programmi esimene õpikoda. Tartus, Miina Härma Gümnaasiumis, keemia.

## **EESTI FÜÜSIKA SELTSI TEETÄHISED 2010. AASTAL**

**Füüsikaõpetajate võrgustik** – arendamine ja tegevus, koostöö TÜ-ga täiendõppe võimaluste kättesaadavamaks tegemisel (AÜ, e-õpe jne);

**Füüsika, keemia ja bioloogia õpikodade projekt** (andekate ja/või motiveeritud õpilaste eriõpe maakondades);

**Halliday füüsikaõpik** – ära trükkida;

**Teadusbussi tegevus** – uued üliõpilased sügisel, uued etendused, seminarikursus;

**Füüsikaportaal** – teadusmeedia, kuukiri, virtuaalõpik;

**GLOBE Eesti tegevus** – koostöö TÜ LOTE-ga, INNOVE projekti edukas läbiviimine;

**TÜ Teaduslaager 2010 Kloogarannal;**

**Põhikooli ja gümnaasiumi füüsika (veebipõhiste) õpikute kirjutamise/loomise projekti käivitamine;**

**Täpe 2010;**

**Füüsikapäevad 2010.**

## **EFS LAIENDATUD JUHATUS 2010. AASTAL**

**Kaido Reivelt**  
esimees  
Tartu Ülikooli Füüsika Instituut, 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@kbfi.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: +372 742 2150 / 738 3033  
E-mail: taavi@fyysika.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** Lähte Ühisgümnaasium, Lähte sjsk, 60502 Lähte  
Tel/faks: +372 733 4180 / 733 4184  
E-mail: jaak.jogi@gmail.com

## EFS UUED LIIKMED

Sarah Aaspõllu  
Piret Avila  
Kert Einaste  
Mart Ernits  
Lauri Hämarik  
Alar Jantsikene  
Tauno Kahro  
Inger Kangur  
Laura Karindi  
Katrin Kaur

Taavet Kollo  
Raivo Kontus  
Kerttu Kruusma  
Tuule Mall Kull  
Priidik Kurik  
Ats Kurvet  
Ahto Leitu  
Jaanus Liigand  
Maido Merisalu  
Urmas Mihkelsoo

Annika Mikola  
Merily Murd  
Siiri Mägi  
Martin Neerot  
Laura Orgo  
Maris Palo  
Joosep Pata  
Tanel Peet  
Ereli Piile  
Annika Pille  
Uku Pütsepp  
Matt Rammo  
Priit Rinke  
Pille Salu  
Silver Silm  
Marek Sirendi

Tormi Soekõrv  
Edith Soosaar  
Sander Sõnajalg  
Aile Tamm  
Mihkel Tiganik  
Hans Tiismus  
Alan Henry Tkaczyk  
Taaniel Uleksin  
Tarmo Unt  
Sandhra-Mirella Valdma  
Alari Varmann  
Katrin Vassar  
Kadri Veende  
Mihkel Veske  
Anete Viise  
Tõnis Väin

## TÄPPISTEADUSTE SUVEKOOL 2010

18.–20. juunini toimus Pärslseljal, Pärnumaal täppisteaduste suvekool 2010. Lisainfo veebilehel [www.fyysika.ee/fyysika/nofy/suvekool2010](http://www.fyysika.ee/fyysika/nofy/suvekool2010).

### LOENGIKAVA

#### Reede, 18. juuni

- |               |   |
|---------------|---|
| 14:00 – 14:15 | Avasõna korraldajatelt  |
| 14:15 – 15:15 | Harry Alles. Grafeen – vaid ühe aatomkihi paksune tulevikumaterjal      |
| 15:15 – 16:00 | Eric Tkaczyk. Molecular control by tailored pulses                      |
| 16:30 – 17:15 | Martin Ligi. Kaugseire üldised alused ja veekaugseire rakendused Eestis |
| 17:15 – 18:15 | Mihkel Kree. Füüsika õppimisest (vedelike segunemiseni)                 |
| 18:15 – 19:00 | Toomas Römer. Informaatika ja päriselu                                  |

#### Laupäev, 19. juuni

- |               |  |
|---------------|--|
| 12:00 – 13:15 | David Vseviov. Ajalugu ja täppisteadus           |
| 14:15 – 15:00 | Margus Maantoa. Kõrgepingest Rootsi Kuningriigis |



15:00 – 15:45	Mihkel Kree. (Füüsika õppimisest) vedelike segunemiseni
15:45 – 16:30	Alar Ainla. Mikrofluidika bioteaduses ja -tehnoloogias 1.
17:00 – 18:00	Alar Ainla. Mikrofluidika bioteaduses ja -tehnoloogias 2.
18:00 – 19:00	Raivo Stern. KBFI Magnetlabor ja teekaart

**Pühapäev, 20. juuni**

10:00 – 11:00	Silver Lätt. European Student Moon Orbiter
11:00 – 12:00	Arvi Freiberg. Koherentsetest nähtustest bioloogias
13:15	Kohv ja kokkuvõte, auhindade jagamine

**TÄPPISTEADUSTE SÜGISKOOL 2010**

29.–31. oktoobrini toimus Voore Puhkekeskuses täppisteaduste sügiskool 2010. Lisainfo veebilehel [www.fyysika.ee/fyysika/nofy/sygiskool2010](http://www.fyysika.ee/fyysika/nofy/sygiskool2010).

**LOENGIKAVA****Reede, 29. oktoober**

15:00 – 15:15	Avasõna korraldajatelt
15:15 – 16:15	Matti Laan (TÜ FI). Keskkonnasaaste ja plasmakeemia
16:15 – 17:15	Veiko Palge (Leedsi Ülikool). Kvantmehaanika filosoofilistest probleemidest
17:30 – 18:30	Alvar Soesoo (TTÜ). Loodusprotsessidest ja mudelistest
18:30 – 19:30	Ivo Mägi (AS Webmedia). Teadus ja raha. Kas need peavad teineteist välistama?

**Laupäev, 30. oktoober**

13:30 – 14:30	Taavi Adamberg (EFS). Teadusbussi tegemistest: õpikojad
14:30 – 15:30	David Schryer (TTÜ KüBI). Revealing metabolic function using isotopes
15:30 – 16:30	Kaupo Kukli (TÜ FI). Tulevikumaterjale nanoelektronikas

- 17:00 – 18:00 Martti Pärs (Bayreuthi Ülikool). Fotolülitatavad molekulid: kuidas ja milleks?
- 18:00 – 19:00 Jaan Pruulmann (STACC, AS Cybernetica). Vallatleme informatsiooniga konteksti kaasates

### **Pühapäev, 31. oktoober**

- 10:00 – 11:00 Viljo Allik (TO). Kaasaegne elektroonikaseadmete projekteerimine EMC nõuetest lähtuvalt
- 11:00 – 12:00 Raivo Stern (KBFI). Eesti Magnetlabor
- 13:15 Kohv ja kokkuvõte, auhindade jagamine

## **EFS FÜÜSIKAÕPETAJATE SUVEKOOL 2010**

### **Füüsika seosed keemiaga – mõõtmised ja tehnoloogia**

28.–30. juunini korraldas Seltsi füüsikaõpetajate osakond füüsikaõpetajate suvekooli Tartus, Kohtla-Järvel ja Sillamäel.

### **PÄEVAKAVA**

#### **Esmaspäev, 28. juuni Tartu**

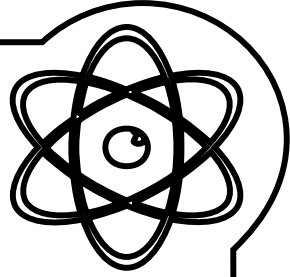
- prof Toomas Tenno. Kolloid- ja keskkonnakeemia
- Ain Tõnisson, Haridus- ja Teadusministeerium. Uute õppekavade rakendamine
- prof Peeter Burk. LOTE struktuur, tegevused ja perspektiivid
- Ekskursioon TÜ keemiahoones

#### **Teisipäev, 29. juuni Kohtla-Järve**

- TTÜ Virumaa Kolledži tutvustus
- Antonina Zguro. Füüsikalistele nähtustele baseeruvad instrumentaalmõõtmised keemias – loeng ja laboratoorsed tööd
- dots Tatjana Baraskova. Soojusfüüsika mõõtmised; katsed tahke keha mehaanikast; praktilised tööd elektromagnetismist – loeng ja laboratoorsed tööd

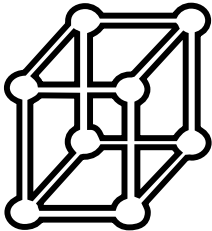
#### **Kolmapäev, 30. juuni Sillamäe**

- Anti Perkson (PhD). Ekskursioon ja ülevaade „Silmeti“ tegevusest
- Tõnis Seesmaa. Ekskursioon Sillamäe sadama territooriumile



# FÜÜSIKAKROONIKA

2010



## I. TÖÖKORRALDUS

- 1. veebruarist töötab Tartu Observatooriumis EstSpacE projekti erakorralise teadurina Viljo Allik.
- 1. veebr valiti TÜ nõukogu poolt materjalide kompuutermodelleerimise professoriks Mikhail G. Brik ja nanostruktuuride füüsika professoriks Aleksei Romanov. TÜ Eesti Mereinstituudi kaugseire ja mereoptika osakonna juhtivateaduriteks valiti Helgi Arst ja Tiit Kutser.
- 1. aprillil asus TO taimkatte seire töörühma vanemteadur Anu Reinart tööle Tartu Observatooriumi direktorina. Senine direktor Laurits Leedjärv jätkab tööd TO astrofüüsika osakonna tähefüüsika töörühma vanemteadurina. Samast ajast on ta ka astrofüüsika osakonna juhataja.
- 8. märtsil valiti TO vanemteaduriteks kosmoloogia erialal Maret Einasto, Erik Tago ja Jaan Vennik, teaduriteks kosmoloogia erialal valiti Elmo Tempel ja Lauri Juhan Liivamägi. Vanemteaduriteks astrofüüsika erialal valiti Tõnu Viik ja Indrek Kolka ning teaduriteks astrofüüsika erialal Mari Burmeister ning Anti Hirv.
- 26. aprillil toimus TO teadustöötajate üldkoosolek, kus valiti uus teadusnõukogu koosseis. Koosolekust võttis osa 48 hääleõiguslikku töötajat. Uue teadusnõukogu koosseisus on 12 liiget ja selle kinnitas haridus- ja teadusminister oma käskkirjaga nr. 459 28. mail 2010.
- 28. mail valis TÜ nõukogu Tartu Ülikooli audoktoriteks akadeemik Jaan Einasto ja keskkonnateadlase, Ohio Ülikooli professori William J. Mitschi. TÜ FI bioloogilise füüsika professoriks valiti Berliini Tehnikülikooli teadlane Jörg Pieper.
- 17. juunil kinnitati EV Valitsuse korraldusega Eesti teaduse infrastruktuuride teekaart – pikaajaline planeerimisvahend, mis sisaldab loetelu uutest või kaasajastamist vajavatest riiklikult olulistest teaduse infrastruktuuri ehk taristu üksustest. Eesti teaduse infrastruktuuri teekaardi 20 objekti seas on Eesti Keskkonnaobservatoorium, Eesti kiirekanal MAX-IV sünkrotronkiirguse allikale, Eesti magnetväljade laboratoorium, Eesti osalus Euroopa Tuumauuringute Keskuses (CERN), Euroopa Kosmoseagentuuris ja Euroopa Lõunaobservatooriumis, Euroopa neutronkiirguse allikas, Läänemere uurimislaev, nanomaterjalide uuringud ja rakendused.
- 21. juunil valiti TTÜ füüsikainstituudi direktoriks Pavel Suurvarik.
- 1. juulist on TO taimkatte seire vanemteadur Matti Möttus kolmeks aastaks Helsingi Ülikooli järeldoktor.

- 1. juulist on KBFi osakestefüüsika teadur Andi Hektor kolmeks aastaks Euroopa Tuumauuringute Keskuse (CERN) järeldoktor Genfis, Šveitsis.
- 1. septembrist töötab TÜ FI koolifüüsika keskuses (KFK) füüsika diaktika lektori 0,5 ametikohal Svetlana Ganina.
- 13. okt toimus Tallinnas Tartu Ülikooli ja Tallinna Tehnikaülikooli rektoraatide ühisistung. Kohtumisega kinnitasid kaks juhtivat teadusülikooli 2009. aastal sõlmitud koostööleppe eesmäärke aidata kaasa teaduse ja innovatsioonialase koostöö edendamisele ning ülikoolide kompetentsi suuremale kasutamisele ühiskonnas. Arutati ka akadeemilist kvaliteeti, ülikoolide rahastamist, regionaalarengut ja infovahetust.
- 26. nov tegi TÜ nõukogu otsuse viia Türi kolledži ainus õppekava „Keskkonnakorraldus ja planeerimine“ alates 2011. aasta sügisest üle TÜ loodus- ja tehnoloogiateaduskonna alla.
- 6. dets valiti TÜ loodus- ja tehnoloogiateaduskonna valimiskogu poolt teiseks ametiajaks tagasi senine dekaan professor Peeter Burk.
- 8. dets valiti Eesti Teaduste Akadeemia poolt akadeemikuks energia- tehnoloogia alal TÜ füüsikalise keemia professor Enn Lust ja akadeemikuks astronoomia alal TO kosmoloogia osakonna juhataja, vanemteadur Enn Saar.
- 30. sept võttis TÜ nõukogu vastu otsuse muuta akadeemiliste töötajate töösuhteid reguleerivaid õigusakte. Akadeemilised töökohad täidetakse kas avaliku konkursi korras või ilma konkursi korraldamata. Esimesel juhul täidetakse ametikoht kuni viieks aastaks, teisel juhul kuni kolmeks aastaks. Nii konkursiga kui ilma konkursita leitud kandidaate hinnatakse sarnaselt ja valitakse vastavas teadusnõukogus. Kõik õppejõud ja teadustöötajad, kaasa arvatud tähtajatut töölepingut omavad, kuuluvad perioodilisele atesteerimisele.
- TTÜ Küberneetika Instituudi juhtivteadur Tarmo Soomere kutsuti veel üheks semestriks (juulist novembrini) Austraalia Rahvusliku Mereuuringute Võrgustiku külalisteadlaseks ja nimetati 2010 sügissemestriks Townsville'i Ülikooli auprofessoriks.
- 2010. a valiti TÜ Füüsika Instituudis konkursi korras vanemteaduriteks materjalifüüsika alal Harry Alles, Kristjan Saal, Sebastian Vielhauer ning optika ja spektroskoopia alal Aleksei Treštšalov, teaduriteks tahkisetooria alal Vadim Boltruško, Helle Kaasik, Aleksander Šelkan, tahkisefüüsika alal Aleksei Krasnikov, Sergei Dolgov, Irina

Kudrjajtseva, optika alal Juri Maksimov, plasmaspektroskoopia alal Jüri Raud, pinnafüüsika alal Leonard Matisen, materjaliteaduse alal Valter Reedo, atmosfäärifüüsika numbrilise modelleerimise alal Aarne Männik, stohhastiliste protsesside alal Artjom Vargunin, matemaatilise modelleerimise alal Aare Luts ning aerosoolifüüsika alal Marko Vana. Ilma konkursita ja reeglina osalise koormusega töötavateks vanemteaduriteks valiti Peet Konsin, Aarne Maaros, Enn Realo ja Lembit Pung, teaduriteks optika alal Heli Lukner, materjaliteaduse alal Raul Rammula ning keskkonnafüüsika alal Rigel Kivi, Jaan Salm ja Andres Luhamaa.

- TÜ Füüsika Instituudile projekteeritakse uut maja Tartusse Maarjamõisa teaduslinnakusse Viljandi mnt 42. Plaanis on ehitada uus kaas-aegne hoone, mis kataks ära kogu TÜ füüsika-alase teadus- ja õppetööga seotud vajadused. Ehitust on kavas alustada 2012. a.

## II. VÄITEKIRJADE KAITSMINE

### 1. DOKTORITÖÖD

#### Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi nõukogu

- 17. juunil kaitses **Sven Lange** doktoritöö „Spectroscopic and phase-stabilisation properties of pure and rare-earth ions activated  $ZrO_2$  and  $HfO_2$ “ (Haruldaste muldmetallidega dopeeritud ja dopeerimata  $ZrO_2$  ja  $HfO_2$  spektroskoopilised ja faasi-stabilisatsiooni omadused) PhD kraadi saamiseks tahkisefüüsika erialal. Juhendajad dr Ilmo Sildos (TÜ FI) ja prof Mikhail Brik (TÜ FI). Oponendid dr habil phys Donats Millers (Läti Ülikool) ja prof Jüri Krustok (TTÜ).
- 2. juulil kaitses **Aarne Kasikov** doktoritöö „Optical characterization of inhomogeneous thin films“ (Mittehomogeensete õhukeste kilede optiline iseloomustamine) PhD kraadi saamiseks rakendusfüüsika erialal. Oponendid prof Arne Roos (Uppsala Ülikool, Rootsi) ja dots Arvo Mere (TTÜ).
- 27. augustil kaitses **Heli Valtna-Lukner** doktoritöö „Superluminally propagating localized optical pulses“ (Superluminaalselt levivad lokaliseeritud valgusimpulsid) PhD kraadi saamiseks optika ja spektroskoopia erialal hindega *summa cum laude*. Juhendaja akad Peeter

Saari. Oponendid prof Ari T. Friberg (Aalto Ülikool, Helsingi; Ida-Soo-me Ülikool, Joensuu; Kuninglik Tehnoloogiainstituut, Stockholm) ja dr Rüdiger Grunwald (Max Borni nim Mittelineaarse Optika ja Spektroskoopia Instituut, Berliin, Saksamaa).

- 31. augustil kaitses **Artjom Vargunin** doktoritöö „Stochastic and deterministic features of ordering in the systems with a phase transition“ (Korrastuse stohhastilised ja deterministlikud omadused faasisiirdega süsteemides) PhD kraadi saamiseks teoreetilise füüsika erialal. Juhendajad prof Teet Örd (TÜ FI) ja Risto Tammelo (TÜ FI). Oponendid prof Grzegorz Litak (Lublina Tehnikaülikool, Poola) ja dots Ain Ainsaar (TLÜ).
- 31. augustil kaitses **Hannes Liivat** doktoritöö „Probing new physics in  $e^+e^-$  annihilations into heavy particles via spin orientation effects“ (Uue füüsika otsingud raskete osakeste tekkel  $e^+e^-$ -annihilatsiooniprotsessides spinnorientatsiooni efektide kaudu) PhD kraadi saamiseks teoreetilise füüsika erialal. Juhendaja vanemteadur Ilmar Ots (TÜ FI). Oponendid dr Katri Huitu (Helsingi Ülikool, Soome) ja dr Margus Saal (TO).
- 31. augustil kaitses **Tanel Mullari** doktoritöö „On the second order relativistic deviation equation and its applications“ (Teist järku relativistlik hälbevõrrand ja selle võrrandi rakendusi) PhD kraadi saamiseks teoreetilise füüsika erialal. Juhendaja prof Risto Tammelo (TÜ). Oponendid prof Roman Plyatsko (Mehaanika ja Matemaatika Rakenduslike Probleemide Instituut, Ukraina TA) ja dr Väino Unt (TO).
- 7. septembril kaitses **Aleksandr Lissovski** doktoritöö „Pulsed high-pressure discharge in argon: spectroscopic diagnostics, modeling and development“ (Kõrgrõhu impulss-gaaslahendus argoonis: spektroskoopiline diagnostika, modelleerimine ja arendus) PhD kraadi saamiseks optika ja spektroskoopia erialal. Juhendaja dr Aleksei Treštšalov (TÜ FI). Oponent dr Andreas Ulrich (Müncheni Tehnikaülikool, Saksamaa).
- 1. oktoobril kaitses **Mari Burmeister** doktoritöö „Characteristics of the hot components of symbiotic stars“ (Sümbiootiliste tähtede kuumad komponendid) PhD kraadi saamiseks astrofüüsika erialal. Juhendaja dr Laurits Leedjärv (TO). Oponendid dr Romano L. M. Corradi (Kanaari saarte Astrofüüsika Instituut, Hispaania) ja dr Nikolai A. Tomov (Astronoomia Instituut, Bulgaaria TA; Rahvuslik Astronoomia Observatoorium Rozhen, Smolyan, Bulgaaria).

- 26. novembril kaitses **Aile Tamm** doktoritöö „Atomic layer deposition of high-permittivity insulators from cyclopentadienyl-based precursors“ (Kõrge dielektrilise läbitavusega isolaatorkilede aatomkihtsademine tsüklopentadienüüllähteainetest) PhD kraadi saamiseks tahkisefüüsika erialal. Juhendajad dr Kaupo Kukli (TÜ FI) ja dr Kalev Tarkpea (TÜ). Oponendid dr Malle Krunks (TTÜ) ja prof Karol Fröhlich (Bratislava, Slovakkia Teaduste Akadeemia).

### **Tartu Ülikooli Keemia Instituudi nõukogu**

- 21. juunil kaitses **Tavo Romann** doktoritöö „Preparation and surface modification of bismuth thin film, porous, and microelectrodes“ (Vismuti õhukeste kihtide, poorsete ja mikroelektroodide valmistamine ning nende pinna modifitseerimise meetodid) PhD kraadi saamiseks füüsikalise ja elektrokeemia erialal. Juhendaja prof Enn Lust (TÜ KI). Oponendid prof Kyösti Kontturi (Helsingi Tehnikaülikool, Soome), prof Andres Õpik (TTÜ).

### **Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituudi nõukogu**

- 21. juunil kaitses **Margit Kõiv** doktoritöö „Treatment of landfill leachate and municipal wastewater in subsurface flow filters using mineralized peat and hydrated oil shale ash“ (Prügila nõrgvee ja olmereovee puhastamine pinnasfiltrites mineraliseerunud turba ja hüdratiseerunud põlevkivituha abil) PhD kraadi saamiseks keskkonnatehnoloogia erialal. Juhendaja prof Ülo Mander (TÜ ÖMI). Oponent prof Yves Comeau (Montreali Polütehniline Kool, Kanada).
- 21. juunil kaitses **Jaanis Juhanson** doktoritöö „Impact of phytoremediation and bioaugmentation on the microbial community in oil shale chemical industry solid waste“ (Fütoremediatsiooni ja bioaugmentatsiooni mõju poolkoksi mikroobikooslusele) PhD kraadi saamiseks keskkonnatehnoloogia erialal. Juhendaja vanemteadur Jaak Truu (TÜ MRI). Oponent dots Kim Yrjälä (Helsingi Ülikool, Soome).
- 15. detsembril kaitses **Riho Mõtlep** doktoritöö „Composition and diagenesis of oil shale industrial solid wastes“ (Põlevkivitööstuse tahkete jäätmete koostis ja diagenees) PhD kraadi saamiseks keskkonnatehnoloogia erialal. Juhendaja prof Kalle Kirsimäe (TÜ ÖMI). Oponent prof Ron Zevenhoven (Åbo Akadeemia, Soome).



- 17. detsembril kaitses **Igor Zaytsev** doktoritöö „Bioaugmentation in LWA-filled horizontal subsurface flow filters for wastewater treatment: Impact of flow regime, temperature and donor system“ (Bioaugmentatsioon LWA substraadiga horisontaalfiltris reovee puhastuseks: voolurežiimi, temperatuuri ja doonorsüsteemi mõju) PhD kraadi saamiseks keskkonnatehnoloogia erialal. Juhendajad prof Ülo Mander (TÜ ÖMI) ja dr Kaspar Nurk (TÜ ÖMI). Oponent dr Jan Vymazal (Maastiku ökoloogia osakond, Tšehhi Põllumajanduse Ülikool, Praha, Tšehhi Vabariik).

### **Tartu Ülikooli Matemaatika Instituudi nõukogu**

- 20. detsembril kaitses **Larissa Roots** doktoritöö „Free vibrations of stepped cylindrical shells containing cracks“ (Pragudega silindriliste koorikute vaba võnkumine) PhD kraadi saamiseks matemaatika erialal. Juhendaja prof Jaan Lellep (TÜ). Oponentid prof Werner H. Schmidt (Greifswaldi Ernst-Moritz-Arndti Ülikool, Saksamaa) ja prof emer Martti Mikkola (Aalto Ülikool, Soome).

### **Tallinna Tehnikaülikooli doktorinõukogud**

- 26. aprillil kaitses **Mihhail Berezovski** doktoritöö „Numerical simulation of wave propagation in heterogeneous and microstructured materials“ (Lainelevi numbriline simulatsioon heterogeensetes ja mikrostruktuuriga materjalides) PhD kraadi saamiseks loodus- ja täppisteadustes. Juhendaja prof Jüri Engelbrecht (TTÜ Küberneetika Instituut). Oponentid prof Harm Askes (Sheffildi Ülikool, Inglismaa) ja dr Jiri Plesek (Tšehhi TA Termomehaanika Instituut).
- 21. oktoobril kaitses **Merle Randrüüt** doktoritöö “Wave propagation in microstructured solids: solitary and periodic waves” (Lainelevi mikrostruktuursetes tahkistes: üksik- ja perioodilised lained) PhD kraadi saamiseks loodus- ja täppisteadustes. Juhendajad prof Jüri Engelbrecht (TTÜ Küberneetika Instituut) ja prof Andrus Salupere (TTÜ Küberneetika Instituut). Oponentid prof Franco Pastrone (Torino Ülikool, Itaalia) ja vanemteadur Alexey Porubov (Venemaa TA Mehaanikaprobleemide Instituut, Peterburg).
- 22. juunil kaitses **Andrus Räämet** doktoritöö “Spatio-temporal variability of the Baltic Sea wave fields” (Läänemere lainetuse tingimuste

ajalis-ruumiline muutlikkus) PhD kraadi saamiseks ehituse ja keskkonnatehnika erialal. Juhendaja prof Tarmo Soomere (TTÜ Küberneetika Instituut). Oponendid dr Arno Behrens (Institute for Coastal Research, Geesthacht, Saksamaa) ja prof Sirje Keevallik (TTÜ Meresüsteemide Instituut).

### Tallinna Ülikooli loodusteaduste doktorinõukogu

- 10. septembril kaitses **Jaanis Priimets** doktoritöö „Diffusion paths in single-phase ternary metal systems“ (Difusiooniteed ühefaasilistes ternaarsetes metallisüsteemides) PhD kraadi saamiseks füüsikas. Juhendaja prof emer Ülo Ugaste (TLÜ MLI). Oponendid prof Valeri Pimenov (Venemaa TA Metallurgia ja Materjaliteaduste Instituut) ja vanemteadur Lembit Kommel (TTÜ Materjalitehnika Instituut).

### Oulu Ülikool

- 22. oktoobril kaitses **Indrek Vurm** doktoritöö „Time-Dependent Modelling of Radiative Processes in Magnetized Astrophysical Plasmas“ (Kiirgusprotsesside ajast sõltuv modelleerimine magnetilises astrofüüsikalises plasmas). Juhendajad prof J. Poutanen (Oulu Ülikool), dr T. Viik (TO). Esialgssed oponendid (*reviewers*) dr G. Ghisellini (Brera Astronoomia Observatoorium, Itaalia) ja dr A.A. Zdziarski (N. Copernicuse Astronoomiakeskus, Varssavi, Poola). Oponent dr G. Ghisellini (Brera Astronoomia Observatoorium, Itaalia).

## 2. TEADUSMAGISTRITÖÖD

### Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi nõukogu

26. augustil kaitsiti järgmised (4+2) teadusmagistritööd:

- **Veiko Hani** „Urimumusliku õppe rakendamine ja praktiliste tööde erinevad realisatsioonid uurimuslikus õppes“ (eriala: füüsikaline info-tehnoloogia). Juhendajad teadur Anne Laius (TÜ loodusteadusliku hariduse keskus) ja dots Kalev Tarkpea (TÜ FI). Oponendid lektor Enn Pärtel (TÜ FI koolifüüsika keskus) ja teadur Klaara Kask (TÜ loodusteadusliku hariduse keskus).
- **Karin Laansalu-Veskioja** „Meemide käsitus füüsikas praktikumi

ahelkatse näitel“ (eriala: füüsikaharidus). Juhendaja dots Henn Voolaid (TÜ FI). Oponendid dots Kalev Tarkpea (TÜ FI) ja haridustehnoloog Ly Sõõrd (TÜ Teaduskool).

- **Kadri Hillermaa** „Üldistatud Hénon-Heiles'i võrrandite liikumisintegraalid“ (eriala: teoreetiline füüsika). Juhendaja teadur Lembit Sossi (TÜ FI). Oponendid dots Peeter Tenjes (TÜ FI) ja vanemteadur Tõnu Viik (TO).

30. augustil kaitsti järgmised (4+2) teadusmagistritööd:

- **Grigori Savustjan** „Comparison of Foucault cardiogram with MRI ventricular volume-time curve“ (Foucault' kardiogrammi ja MRT-ga saadud vatsakeste ruumala kõvera võrdlemine) (eriala: meditsiinifüüsika). Juhendaja dots Jüri Vedru (TÜ FI). Oponendid dr Kalle Kepler (TÜ FI) ja arst-õppejõud Kristina Lotamõis (TÜ Kliinikum).
- **Anatoli Vladimirov** „Comparison of image quality test methods in computed radiography“ (Pildi kvaliteedi hindamismeetodite võrdlus kompuuterradiograafias) (eriala: meditsiinifüüsika). Juhendaja dr Kalle Kepler (TÜ FI). Oponendid MSc Andrus Aavik (TÜ Kliinikum) ja dots Kalev Tarkpea (TÜ FI).
- **Priit Tuvike** „Esimese järgu kvantkromodünaamilised kiirgusparandid polariseeritud  $W^+$ -bosoni hadronlagunemisel“ (eriala: teoreetiline füüsika). Juhendaja vanemteadur Stefan Groote (TÜ FI). Oponendid vanemteadur Ilmar Ots (TÜ FI) ja dots Rein Saar (TÜ FI).

### III. ÕPPETÖÖ

- Tartu Ülikoolis on avatud füüsikaga seonduvad õppekavad:
  - bakalaureuseõppes: arvutitehnika, füüsika, keskkonnatehnoloogia, materjaliteadus, infotehnoloogia;
  - magistriõppes: arvutitehnika, fundamentaalfüüsika, füüsika, füüsikaõpetaja, gümnaasiumi loodusteaduste õpetaja, infotehnoloogia, keskkonnatehnoloogia, kultuuriväärtuste säilitamine, materjalid ja protsessid jätkusuutlikus energeetikas, materjaliteadus, molekulaartehnoloogia, rakendusfüüsika, rakenduslik mõõteteadus;
  - doktoriõppes: füüsika, keskkonnatehnoloogia, molekulaartehnoloogia, materjaliteadus, tehnika ja tehnoloogia, loodusteaduslik haridus.

- Tartu Ülikooli doktoriõppesse võeti:
  - füüsika erialal: Alar Jantsikene, Urmas Kvell, Mihkel Pajusalu, Erik Randla, Artur Tamm, Andres Tiko, Sebastian Traud, Kaupo Voor-  
mansik;
  - materjaliteaduse erialal: Urmas Joost, Kaja Pae, Madis Umalas,  
Raul Välbe;
  - keskkonnatehnoloogia erialal: Mariina Hiiob, Kaisa Kesanurm,  
Janika Laht;
  - tehnika ja tehnoloogia erialal: Jelizaveta Geimanen, Hanna Hõrak,  
Liina Margna, Margit Mutso, Marit Orav, Sirle Saul, Aleksei Suslov,  
Rauno Temmer, Age Utt, Veiko Vunder;
  - loodusteadusliku hariduse erialal: Ana Valdmann, Maksim Zina-  
kov.
- Tartu Ülikooli loodus- ja tehnoloogiateaduskonna magistriõppe  
(3+2) lõpetasid:
  - loodusteaduse magister: Kadri Aljas (heitmete tehnoloogia), Erik  
Anderson (füüsikaline ja elektrokeemia), Liis Astover (heitmete  
tehnoloogia), Roman Belov (keskkonnaseire tehnoloogia), Irina Bi-  
duljak (heitmete tehnoloogia), Galina Danilišina (heitmete tehno-  
loogia), Polina Degtjarenko (ökosüsteemide tehnoloogia), Reelika  
Eiche (heitmete tehnoloogia), Priit Jaanson (füüsika), Margarita  
Kagan (heitmete tehnoloogia), Kärt Kasak (heitmete tehnoloogia),  
Karl Kaupmees (analüütiline ja füüsikaline keemia) – *cum laude*,  
Joosep Kepler (füüsika) – *cum laude*, Elo Kibena (heitmete tehno-  
loogia), Kaie Kriiska (ökotehnoloogia), Piret Krillo (heitmete teh-  
noloogia), Katre Kurvits (heitmete tehnoloogia), Riho Kägo (füüsi-  
ka), Janika Laht (ökotehnoloogia), Kristel Lopsik (ökotehnoloogia),  
Merle Mandel (heitmete tehnoloogia), Gea Ovsjannikov (analüüti-  
line ja füüsikaline keemia), Mihkel Pajusalu (füüsika) – *cum laude*,  
Erik Randla (teoreetiline füüsika), Scheila Schulz (ökosüsteemide  
tehnoloogia), Artur Tamm (füüsika) – *cum laude*, Mihkel Vestli  
(füüsikaline ja elektrokeemia);
  - tehnikateaduse magister: Dana-Maria Bunaciu (rakenduslik mõõ-  
teteadus), Klodian Dhoska (rakenduslik mõõteteadus), Merike  
Hein (infotehnoloogia), Urmas Joos (rakenduslik mõõteteadus) –  
*cum laude*, Madis Juurma (rakenduslik mõõteteadus), Liina Kruus  
(rakenduslik mõõteteadus), Urmas Kvell (arvutitehnika) – *cum  
laude*, Kerli Lauk (rakenduslik mõõteteadus), Alo Peets (arvuti-

tehnika), Rando Saar (materjaliteadus), Ivan Sidorov (infotehnoloogia), Gert Suurkuusk (rakenduslik mõõteteadus), Gert Toming (infotehnoloogia), Madis Umalas (materjaliteadus), Veiko Vunder (arvutitehnika), Raul Välbe (materjaliteadus);

- haridusteaduse magister (füüsikaõpetaja): Anne Anier, Mari Lepp, Heli Lätt.
- TÜ magistriõppesse võeti:
  - füüsika erialal: Varmo Ernits, Jakob Jõgi, Rain Kipper, Harti Kiveste, Teet Kuutma, Allan Lepp, Peeter Mihhailov, Erki Metsanurk, Kaarel Piip, Liis Reisberg, Liina Roots, Mihkel Rünkla, Kadri Savi ja Katrin Tuude;
  - materjaliteaduse erialal: Taivo Jõgiaas, Arko Kesküla, Robert Matias Mononen, Henri Mägi, Mailiis Pala, Inga Põldsalu, Keio Riikjärv, Pille Rinne, Kaspar Roosalu, Anton Ruzanov, Kristjan Saul, Silver Sepp, Triinu Taaber, Indrek Tallo ja Taavi Tikk;
  - keskkonnatehnoloogia erialal 56 üliõpilast;
  - erialal „materjalid ja protsessid jätkusuutlikus energeetikas“ 37 üliõpilast;
  - gümnaasiumi loodusteaduste õpetaja erialal 32 üliõpilast;
  - rakendusliku mõõteteaduse erialal 13 üliõpilast;
  - arvutitehnika erialal 4 üliõpilast.
- Tartu Ülikooli 3-a bakalaureuseõppe lõpetasid:
  - füüsika erialal: Varmo Ernits, Jakob Jõgi – *cum laude*, Rain Kipper, Teet Kuutma, Allan Lepp, Jevgeni Makarov, Siim Meerits, Erki Metsanurk, Peeter Mihhailov, Kaarel Piip – *cum laude*, Liis Reisberg, Liina Roots, Annika Ruusmann, Mihkel Rünkla, Kadri Savi, Katrin Tuude – *cum laude*, Ott Vilson;
  - materjaliteaduse erialal: Hanno Evard, Taivo Jõgiaas, Liina Kalm, Asko Laaniste, Robert Matias Mononen, Henri Mägi, Mailiis Pala, Inga Põldsalu, Eldar Rassulov, Keio Riikjärv, Pille Rinne, Kaspar Roosalu, Anton Ruzanov, Silver Sepp, Triinu Taaber, Indrek Tallo, Taavi Tikk;
  - keskkonnatehnoloogia erialal: Martin Absalon, Jane Adler, Alo Alt, Viljo Aros, Kadre Heinaste, Angeli Ivanov, Sven Kalbus, Kuno Kasak, Triin Kase, Teet Kerem, Kristi Kesküla, Kairid Leks, Mari Loss, Aigi Margus, Rainer Napits, Rainer Paenurk, Merili Pokasaar, Andre Priisalu, Airi Saarmäe, Rain Saarmäe, Johanna-Maria Siilak, Martin Sööt, Annika Teino, Triin Tigane, Diana Tiidema, Andres Trei, Taavi Vaasma, Priit Vabamäe;

- infotehnoloogia erialal: Marko Arrak, Indrek Bauvald, Madis Haug, Kristjan Metsalu, Reiko Randoja, Martti Savolainen, Siim Sundla, Martin Usk.
- Tallinna Ülikooli füüsika doktorandid olid Anna Šeletski (juh Anne Tali), Tarmo Metsmägi (juh Andi Kivinukk), Natalja Timohhina (juh Valdur Saks), Katrin Laas (juh Romi Mankin), Veroonika Širokova (juh Tõnu Laas).
- TLÜ füüsikaõpetaja eriala magistriõppe lõpetas Andrus Niitenberg.
- TLÜ magistrandid:
  - füüsika erialal: Piret Avila (juh Astrid Rekker), Jana Paju (juh Tõnu Laas), Martin Vällik (juh Tõnu Laas);
  - füüsikaõpetaja erialal: Virgi Einaste (juh Anneli Roode-Neumann), Kalle Kebbinau (juh Rando Tuvikene), Ave Kokka (juh Anneli Roode-Neumann), Alis Langemets (juh Katrin Laas), Julia Tsõgankova (juh Priit Reiska).
- TLÜ bakalaureuseõppes lõpetasid füüsika erialal Virgi Einaste, Jana Paju ja Martin Vällik.
- TTÜ füüsikainstituudis õppisid tehnilise füüsika doktorantuuris: Erkki Kask (juh prof Jüri Krustok), Himani Khanduri (juh KBFI vanemteadur 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);
- TTÜ tehnilise füüsika magistriõppe (3+2) lõpetasid loodusteaduse magistri kraadiga tehnilise füüsika erialal Indrek Mandre, Ivan Sertakov, Erkki Kask, Marion Murumaa, Rait Valksaare ja Kaspar Kevvai.
- TTÜ füüsikainstituudis õppisid tehnilise füüsika magistrantuuris (3+2 õppekaval): Ahti Bloom, Aleksandr Graf, Aleksandr Hohlatšov, Irina Jelisseeva, Kaspar Kaarlep, Maria Kesa, Triin Leetmaa, Merike Martsepp, Radu Prekup, Aet Põldma, Rait Rand, Styna Randmaa, Joonas Rihma, Päivo Simson, Andres Sock, Taaniel Uleksin, Eduard Vaselo ja Richard Villenberg.
- TTÜ tehnilise füüsika õppekava lõpetasid loodusteaduste bakalaureuse kraadiga tehnilise füüsika erialal Margus Rätsep, Taaniel Uleksin, Eduard Vaselo, Ürgo Saaliste, Joonas Kaljulaid, Triin Leetmaa, Aune Nigol, Sten Mäses, Oliver Parmasto ja Fred Buschmann.

- Üliõpilaste teadustööde riiklikul konkursil 2010 premeeriti järgmisi autoreid loodusteaduste ja tehnika valdkonnas:
  - rakenduskõrgharidusõppe ja bakalaureuseõppe üliõpilaste astmes:
    - \* I preemia (15000.- kr) Victor Alari (TTÜ), konkursitöö „Lainenergia vähenemine ranniku lähedal avamere tuulikute tõttu“ eest;
    - \* I preemia (15000.- kr) Kaur Alasoo (TÜ), konkursitöö „Tugivektormasinatate kombineerimine angiogeneesiga seotud geenide ennustamiseks“ eest;
    - \* II preemia (10000.- kr) Marek Kõllo (TTÜ), konkursitöö „9,11-seksterooli D-ringi sünteesi uurimine“ eest;
    - \* II preemia (10000.- kr) Risto Reilson (TÜ), konkursitöö „Antrakinooniga modifitseeritud elektrodide elektrokeemilised omadused“ eest;
    - \* III preemia (5000.- kr) Johannes Ehala (TTÜ), konkursitöö „Bokode passiivmarkeri lahendused“ eest;
    - \* III preemia (5000.- kr) Silja Treialt (TÜ), konkursitöö „Faktorruumid ja aproksimatsiooniomadused“ eest;
    - \* Tänukirjad: Jakob Jõgi (TÜ), Kristjan Kriips (TÜ), Robert Mononen (TÜ).
  - magistriõppe üliõpilaste astmes:
    - \* I preemia (25000.- kr) Heisi Kurig (TÜ), konkursitöö „1-etüül-3-metüülimidiasoolium tetrafluoroboraadi kasutamine elektrilise kaksikkihi kondensaatori elektrolüüdina“ eest;
    - \* II preemia (20000.- kr) Einar Pius (Edinburghi Ülikool), konkursitöö „Kvantskeemide automaatne paralleliseerimine kasutades mõõtmispõhist kvantarvutuste mudelit“ eest;
    - \* III preemia (10000.- kr) Mihkel Pajusalu (TÜ), konkursitöö „Fotosünteetiliste antennide eksitontsooni sõltuvus temperatuurist“ eest;
    - \* Tänukirjad: Kaur Lumiste (TÜ), Jaana-Kateriina Gomoni (TTÜ), Julia Iljina (TTÜ).
  - doktoriõppe üliõpilaste astmes:
    - \* I preemia (25000.- kr) Nadežda Aleksejeva (TÜ), konkursitöö „Hapniku elektrokatalüütiline redutseerumine süsiniknanotruudel põhinevatel nanokomposiitmaterjalidel“ eest;
    - \* I preemia (25000.- kr) Kairit Zovo (TTÜ), konkursitöö „Afiinsuse gradient suunab vase rakulistesse sihtkohtadesse“ eest;

- \* II preemia (20000.- kr) Aivo Jürgenson (TTÜ), konkursitöö „Ründepuude paralleel- ja jadamudelite efektiivsed semantikad“ eest;
  - \* II preemia (20000.- kr) Indrek Zolk (TÜ), konkursitöö „Kommuteruvad tõkestatud aproksimatsioonimadused Banachi ruumides“ eest;
  - \* III preemia (10000.- kr) Deniss Klauson (TTÜ), konkursitöö „Bioloogiliselt mittelagunevate saasteainete fotokatalüütiline oksüdatsioon vesifaasis“ eest;
  - \* III preemia (10000.- kr) Evely Leetma (TÜ), konkursitöö „Tõketeega silumisülesannete lahendamine“ eest;
  - \* III preemia (10000.- kr) Heli Lukner (TÜ), konkursitöö „Superluminaalselt levivad lokaliseeritud valgusimpulsid“ eest;
  - \* Tänukirjad: Jaanus Eskusson (TÜ), Maris Tõnso (TTÜ), Signe Vahur (TÜ).
- Eesti Teaduste Akadeemia üliõpilastööde konkursi füüsikaga seotud töödest sai I auhinna 10000.- krooni Mihkel Pajusalu (TÜ) magistritöö „Fotosünteesiliste antennide eksitontsooni sõltuvus temperatuurist“ (juh akad Arvi Freiberg ja dr Margus Rätsep).
  - 26.-28. veebr Laulasmaal toimunud TalveAkadeemia 2010 konverentsil kuulutati välja tudengite teadusartiklite konkursi tulemused. Konkursile laekus loodusteaduste ja tehnika valdkonnas 16 artiklit, millest auhinnati kolme:
    - \* Karin Robam (TTÜ, doktoriõpe) „Jõed, mis saavad alguse kaevandamisest“, auhinnaks Rahva Raamatu kinkekaart;
    - \* Jüri-Ott Salm (1. autor) (TÜ, doktoriõpe) „Kasvuhoonegaaside CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O emissioon looduslikest ja kuivendatud soodest ning turbatootmisaladelt“, auhinnaks Rahva Raamatu kinkekaart;
    - \* Karin Kipper (TÜ, doktoriõpe) „Antibiootikumijääkide määramine Tartu ja Tallinna reoveemudast vedelikkromatograafia-massispektromeetria meetodil“, auhinnaks Horisondi aastatellimus.
  - TÜ Füüsika Instituudi 2010. aasta tudengistipendiumi konkurss toimus traditsiooniliselt kahes osas. Bakalaureuseastmes sai esikoha Jakob Jõgi (stipendium 6000 kr, juh Ants Lõhmus ja Jaan Kalda (TTÜ)), teise koha Siim Meerits (4500 kr, juh Laur Järv) ja kolmanda koha Joosep Pata (4000 kr, juh Alan Tkaczyk). Neile järgnesid Kadri Savi (3000 kr, juh Martin Järvekülg ja Martin Timusk), Varmo Ernits (2000 kr, juh Margo Plaado) ning Robert Matias Mononen (1500 kr, juh Margo Plaado), Mihkel Rünkla (1500 kr, juh Margus Saal ja Laur Järv) ja



Henri Mägi (1500 kr, juh Eduard Feldbach). Magistriastmes sai esikoha Ott Rebane (10000 kr, juh Peeter Saari), teise koha Erik Randla (7000 kr, juh Laur Järv) ning kolmanda koha Eliko Töldsepp (6000 kr, juh Tea Avarmaa ja Eduard Feldbach) ja Mihkel Pajusalu (6000 kr, juh Arvi Freiberg ja Margus Rätsep). Neile järgnesid Raul Laasner (3000 kr, juh Vitali Nagirnõi) ning Raul Välbe (2000 kr, juh Valter Reedo, Uno Mäeorg ja Ants Lõhmus) ja Madis Umalas (2000 kr, juh Valter Reedo, Ants Lõhmus ja Irina Hussainova (TTÜ)).

- 20. septembril määras Tartu Observatooriumi teaduslik nõukogu toetusi noortele teadlastele. Ernst Julius Öpiku nimelise stipendiumi sai TÜ teise aasta doktorant Tiit Sepp. Juhan Rossi nimelise stipendiumi sai TÜ teise aasta doktorant Margit Aun.
- Jaan-Mati Punningu sihtkapitali stipendiumi sai TÜ keskkonnatehnoloogia eriala doktorant Krista Alikas.
- Heinrich Lauulu stipendium TTÜ Arengufondilt anti Andrus Räämele (TTÜ).
- Alates 1. septembrist on TÜ füüsika eriala magistriõppe üliõpilastel võimalik spetsialiseeruda nanotehnoloogia erialale. Nanotehnoloogia eriala avamine sai teoks Euroopa Sotsiaalfondi abil projekti „Nanotehnoloogia moodulite loomine füüsika magistriõppekava jaoks“ raames. Eriala koduleht asub aadressil [www.fi.tartu.ee/nmfm](http://www.fi.tartu.ee/nmfm).

## IV. TEADUSÜRITUSED EESTIS

- 1. veebr toimus Tõravere konverents „145 aastat Tartu Ülikooli Meteoroloogiaobservatooriumi avamisest ja 60 aastat Tartu-Tõravere meteoroloogiajaama asutamisest“.
- 16. veebr tähistati KBFI 30. juubelit ajalooteemalise väljapanekuga ning sünnipäevale pühendatud seminariga Eesti Teaduste Akadeemias. Juubeliseminaril esinesid sõnavõtude ja ettekannetega KBFI sõbrad ja koostööpartnerid ning esitleti ka instituudi teadusloomet. Ettekandeid pidasid Tuuli Käämbre, Toomas Rõõm, Anne Kahru ja Mario Kadastik.
- 25.-26. veebr toimus Tartus Dorpati Konverentsikeskuses TÜ ja TTÜ doktorikooli „Funktsionaalsed materjalid ja tehnoloogiad“ (FMTDK) teaduskonverents. Doktorikooli nõukogu valis parimaks suuliseks ettekandeks Aile Tamme ettekande „Atomic layer deposition and characterization of  $ZrO_2$ - $Er_2O_3$  and  $ZrO_2$ - $Gd_2O_3$  nanolaminates“ (kaasau-

torid: Indrek Jõgi, Kaupo Kukli, Jekaterina Kozlova, Mikko Heikkilä, Marianna Kemell, Timo Sajavaara, Jun Lu, Massimo Tallarida, Väino Sammelselg, Mikko Ritala, Markku Leskelä). Parimaks posterettekanded valiti Atanas Katerski poster „Phase and elemental composition of spray deposited CuInS<sub>2</sub> thin films for solar cells“ (kaasautorid: A. Katerski, M. Krunks). Mõlemad doktorandid saavad preemiaks doktorikooli reisiraha. Lisainfo: [www.fi.tartu.ee/doktorikool](http://www.fi.tartu.ee/doktorikool)

- 16. märtsil toimus TÜ füüsikahoones Kalju Kudule (16.03.1930 – 13.07.2001), füüsikule, õppe- ja teadustöö organisaatorile Tartu Ülikoolis pühendatud teadusõhtu.
- 22.–23. märtsini toimusid Tartus, TÜ Tähe 4 õppehoones XL Eesti füüsikapäevad ja XXXII 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.
- 22.–24. märtsini toimusid Tartu Ülikooli Raamatukogu konverentsikeskuses COST 733 (COST: European Cooperation in Science and Technology) juhtgrupi ja tööruhmade koosolekud. Koostööprojekti COST 733 teemaks on „Ilmatüüpide klassifikatsioonide harmoniseerimine ja rakendamine Euroopa regioonide tarvis“. Koosolekul kõneldi kõige värskematest tulemustest Euroopa ilmapuustrite uuringutes ning edasistest koostöövõimalustest, sest juhtgrupi ja tööruhmade koosolek oli selle projekti üheksas ehk eelviimane. Eestist osalesid COST 733 töös Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi ning Ökoloogia ja Maateaduste Instituudi teadlased, kes ürituse Tartus ka korraldasid. Koosolekul osales 34 teadlast 15 Euroopa riigist.
- 23.–25. apr viibisid Eestis Saksa Kosmoseagentuuri ja Soome teadus-asutuste delegatsioonid, et koostöös Eesti partneritega leppida kokku Eesti esimese satelliidiprojekti EstCube-1 missiooni edasiste etappide elluviimises. Eesti tudengisatelliit on aastal 2008 Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi ja Tartu Observatooriumi koostöös alguse saanud projekt, mis on kasvanud täismõõtmetes rahvusvaheliseks koostööks. Satelliit on kavas kosmosesse lennutada aastal 2012. Projekti viivad ellu Tartu Ülikooli, Tallinna Tehnikaülikooli ja Eesti Lennuakadeemia tudengid TÜ ja Tartu Observatooriumi teadlaste juhendamisel koostöös Saksa Kosmoseagentuuri, Helsingi ja Jyväskylä ülikoolide ning Soome Meteoroloogainstituudiga. Lisainfo [www.estcube.eu](http://www.estcube.eu).

- 26.-27. apr toimus Tartus (Tähe 4) Helsingi Ülikooli atmosfääriteaduste osakonna prof Hanna Vehkamäki ja dr Ilona Riipineni kahepäevane intensiivkursus aerosoolide moodustumisest atmosfääris. Üritus oli osa aktsioonist „Women’s Aerosol Train 2010 is coming to you!”, mille raames nad esinesid loengutega mitmes Euroopa linnas. Ürituse korraldajad Tartus olid Madis Noppel ja Urmas Hörrak TÜ Füüsika Instituudi keskkonnafüüsika laborist.
- 5.-7. maini korraldati Tallinnas EstSpaceE projekti raames rahvusvaheline konverents „Space Downstream Services 2010“. Konverentsil osales ligi 300 teadlast, spetsialisti, ettevõtjat ja ametnikku Balti riikidest, Põhjamaadest, Venemaalt ja mujalt Euroopast, kes vahetasid kogemusi kosmose maapealsete teenuste valdkonnas, tutvusid uute ärivõimaluste ja teadusuuringute tulemustega, millest Eesti jaoks olid olulisemad satelliitkaugseire, -positsioneerimise ja navigatsiooni rakendused. Esinejateks olid ESA, NASA, EADS Astrium, Infoterra, Thales, Nokia, Logica, Google, Microsoft, GMES Bureau, GNES, Italian Space Agency, British National Space Center, German Aerospace Center jt organisatsioonide tippspetsialistid.
- 25. mail toimus Tartu Ülikooli ajaloo muuseumis teaduspäev „Astronoom Taavet Rootsmäe – 125“. Ettekannetega esinesid akadeemik Jaan Einasto ja TO teadur Antti Tamm.
- 14.-16. juunini toimus Pühajärvel XIV Soome-Eesti aeroioonide ja atmosfääriaerosooli ühisseminar. Osavõtjaid oli Soomest, Rootsist, Indiast, Lätist ja Eestist kokku 37 teadlast ja kraadiõppurit, nende hulgas 18 väliskülalist, kes kolmel päeval esitasid 30 ettekannet atmosfääriaerosooli ja aeroioonide tekkeprotsesside teoreetilisest ja eksperimentaal-vaatluslikust uurimisest. Esindatud olid Helsingi Ülikool, Soome Meteoroloogiainstituut, Tampere Tehnoloogiaülikool, Lundi Ülikool, India Troopilise Meteoroloogia Instituut, Läti Rezekne Kõrgkool, TÜ Füüsika Instituut ja Eesti Maaülikool. Seminari korraldas TÜ FI keskkonnafüüsika labor. Korraldustoimkonda kuulusid Urmas Hörrak (TÜ), Anne Hirsikko ja Markku Kulmala (Helsingi Ülikool).
- 18.-20. juunini toimus Pärnumaal Pärtseljal EFS täppisteaduste suvekool. Kavas olid ettekanded grafeenist, kaugseirest, füüsika õppimisest, informaatikast, mikrofluidikast, koherentsetest nähtustest bioloogias jm. Suvetooli korraldasid Kaido Reivelt, Aigar Vaigu ja Taavi Adamberg.

- 28.–30. juunini toimus Pühajärve puhkekeskuses FMTDK suvekool „Functional materials and applications“, korraldasid TÜ Füüsika Instituut ja TÜ Keemia Instituut. 60-le osavõtjale planeeritud suvekooli programmis olid lisaks TTÜ, KBFI ja TÜ lektorite loengutele ka mitmete välislektorite loengud.
- 29. juunil toimus Haapsalus Eesti-Vene piiriveekogude kaitse ja kasutamise ühiskomisjoni seire, hinnangu ja rakendusuuringute tööruhma teadusseminar.
- 25.–28. aug toimus Tartus Atlantise konverentsikeskuses NASA maakattemuutuste programmis osalevate teadlaste ühiskonverents koos kolleegidega vastavatest Põhja-Euraasia koostööprogrammidest (GOFC-GOLD/NERIN ja NEESPI). Konverentsi „Maakatte ja -kasutuse muutuste jälgimine Euroopa subarktilises ja parasvöötmes“ Eestipoolseks korraldajaks oli Tartu Observatoorium. Tartusse kogunes 60 teadlast 11 riigist, lisaks Eestile ka Bulgaariast, Tšehhimaalt, Soomest, Saksamaalt, Ungarist, Itaaliast, Lätist, Venemaalt, Slovakiast ja Ameerika Ühendriikidest. Konverentsi avas haridus- ja teadusminister Tõnis Lukas.
- 26. okt toimus Pühajärvel TÜ ja TTÜ ühisseminar sünkrotronkiirguse kasutamisest. Arutleti uute võimaluste üle sünkrotronkompleksi MAX-IV valmimisel Lundis, Rootsis. Seminari ühe põhiteemana tutvustas TÜ elektronspektroskoopia professor Ergo Nõmmiste rajatava Eesti kiirekanali võimalusi MAX-IV sünkrotronkiirguse allikal. Esinesid külalistedadlased Rootsist, Saksamaalt, Poolast ja Lätist.
- 28.–29. okt Tallinnas Nordic Hotel Forumi konverentsikeskuses peetud teadusmeedia konverentsil „Teadusrikkuse levialas“ osales paar-sada huvilist: teadlasi, ajakirjanikke, pressiesindajaid, üliõpilasi, õpetajaid. Konverents oli järg kahe eelmise aasta konverentsidele, mis kandsid nimetusi „Teadus – tumm või tummine?“ ja „Bermuda kolmnurk“. TeaMe programmi raames peetud konverentsi korraldasid Eesti Rahvusringhääling, Eesti Teadusajakirjanike Selts ja sihtasutus Archimedes.
- 29.–31. okt toimus Voore Puhkekeskuses EFS täppisteaduste sügis-kool. Ettekannete teemadeks olid keskkonnasaaste ja plasmakeemia, kvantmehaanika, loodusprotsessid ja mudelid, tulevikumaterjalid nanoelektronikas, elektroonika projekteerimine, teadusbuss, teaduse rahastamine, magnetlabor jm. Korraldasid Kaido Reivelt, Aigar Vaigu ja Taavi Adamberg. Täpsem info [www.fyysika.ee/fyysika/nofy/](http://www.fyysika.ee/fyysika/nofy/).

- 4. nov toimus Tallinnas Keskkonnateabe Keskuses Seirefoorum 2010, mis oli sel aastal pühendatud sisevete seirele.
- 15. nov korraldas TÜ Eesti Mereinstituut REGIOCLIMA projekti raames Tartus kliimaseminari.

## V. TEADUSTÖÖ

- 24. veebr anti kätte Eesti Vabariigi teaduspreemiad. 600 000 krooni suuruse pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest antava preemia sai põlevkiviekspert, TTÜ emeriitprofessor ja soojustehnika instituudi erakorraline vanemteadur Arvo Ots. Eelmise nelja aasta jooksul valminud ja avaldatud parimate teadustööde eest 300 000 krooni suurused riigi teaduspreemiad said:
  - täppisteaduste alal Hannes Tammet (TÜ) uurimuste tsükli „Atmosfääri aerosooli ja aeroioonide tekkeprotsesside ja evolutsiooni uurimine, aeroioonide liikuvusspektromeetria meetodite ja aparatuuri arendamine“ eest;
  - tehnikateaduste alal Rein Kuusik (kollektiivi juht), Andres Triikkel ja Tiit Kaljuvee tööde tsükli „Uurimusi happeliste gaaside emissiooni piiramiseks energeetikas“ eest.
- Juuli alguses avaldatud ISI Web of Knowledge'i ESI (*Essential Science Indicators*) andmebaasi ülevaates on Tartu Ülikool materjaliteadustes 1 protsendi maailma mõjukaimate teaduskeskuste hulgas.
- KBFI, TO ja TÜ FI kosmoloogia töörühmad algatasid fundamentaalfüüsika seminari, mille istungid korraldatakse iga paari kuu tagant nimetatud kolmes asutuses. 2010. a toimus viis seminari: 26. märtsil Tartus Villa Margaretha seminariruumis, peaesinejateks Kristjan Kannike (KBFI), Gert Hütsi (TO) ja Andi Hektor (KBFI), 30. apr TÜ FIs, peaesinejateks Andi Hektor (KBFI), Gert Hütsi (TO) ja Laur Järv (TÜ FI), 27. mail Tartu Observatooriumis, peaesinejateks Siim Meerits (TÜ), Tiit Sepp (TO) ja Gert Hütsi (TO), 24. sept KBFIs, peaesinejateks Hannes Liivat (TÜ FI), Martti Raidal ja Kristjan Kannike (KBFI), Marion Murumaa (TTÜ) ning Liina Roots (TÜ), 12. nov TÜ FIs, peaesinejateks Antonio Racioppi (KBFI), Antti Tamm (TO), Elmo Tempel (TO), Erik Randla (TÜ FI) ja Mario Kadastik (KBFI).
- TÜ FI Tähe tn hoones toimusid teoreetilise füüsika, astrofüüsika, meditsiinifüüsika ja biomeditsiinitehnika, gaaslahenduse, didakti-

lise füüsika ja keskkonnanfüüsika seminarid ning teadusbussi info-tunnid.

- TÜ FI Riia 142 hoones alustas nanotehnoloogia tudengiseminar (toimus 23 ettekannet) ja jätkasid tööd spektroskoopia ja materjalfüüsika seminarid.
- TLÜ-s oli täitmisel IAEA grant nr. 14797 „Stohhastilised protsessid tiheda plasma interaktsioonil konstruktsioonimaterjalidega“.
- Tartu Ülikooli, Euroopa Kosmoseagentuuri ja AS Regio koostöös valmis uudne teenus, mis näitlikustab kosmosetehnoloogia radarsatelliitide abil, kuidas on võimalik jooksvalt kaardistada Eesti üleujutuste värskeimat seis. Teenuse loojateks on Silver Lätt TÜ kosmose- ja militaartehnoloogia töörühmast ning TÜ ja AS Regio doktorant Kaupo Voormansik.
- Jätkus EL 7. raamprogrammi projekt EstSpace (Eesti kosmoseuurin-gute ja -tehnoloogia võimekuse avamine partnerluse kaudu tippta-semel Euroopa teadusasutustega). Projekti juht on TO direktor Anu Reinart, kestus kolm aastat (01.03.2008 – 28.02.2011).
- Algas EL 7. raamprogrammi projekt WaterS (Täiustatud vee kvaliteedi parameetrite määramine optilisest signatuurist strateegilise partner-luse abil), mis kestab 4 aastat. TO partneriteks on Stockholmi Ülikool ja Soome Keskkonnainstituut ning kolm äriettevõtet: Water Insight (Holland), Brockmann Consult (Saksamaa), Vattenfall Power Consult (Rootsi). Projekti koordinaator on A. Reinart.
- Algas EL 7. raamprogrammi 3-aastane projekt ESAIL (Elektrilise päikeseurje tehnoloogia), mille TO koordinaator on M. Noorma. TO partneriteks on Soome Meteoroloogia Instituut, Saksa Kosmo-seagentuur, Uppsala Ülikool, Helsingi Ülikool, Jyväskylä Ülikool, Pisa Ülikool jt. Elektrilise päikeseurje tehnoloogia kohta saab lähemalt lugeda [www.electric-sailing.fi](http://www.electric-sailing.fi) ja [www.estcube.eu](http://www.estcube.eu).
- Tartu Observatooriumis toimusid regulaarselt astronoomia (kolma-päeviti kl 15:00) ja atmosfäärifüüsika (reedeti kl 10:00) seminarid.
- TO taimkatte seire töörühma eestvedamisel rajati Järvseljale lennuki- ja satelliidimõõtmiste peegeldusetalon (projekt TAP13-2 „Kaugseire etalonide komplekslabor“).
- Teaduse väikesemahulise infrastruktuuri meetme raames hangiti Tartu Observatooriumi 1,5 m teleskoobi spektrograafi jaoks uus difraktsioon-võrede komplekt maksumusega 254 428 kr, mis vahetab välja vanad võred ja aitab tõsta spektraalvaatluste efektiivsust, ksenoonlambiga kiir-

gusallikas spektroradiomeetrite kalibreerimiseks, erinevate karakteristike määramiseks ja mõõtemääramatuste hindamiseks UV, nähtavas ja lähisinfrapunases spektripiirkonnas, komplekti maksumus 370 700 kr, ning uus andmebaasserver kosmoloogia töörühmale (370 500 kr).

- Teaduse väikesemahulise infrastruktuuri meetme raames hangiti TÜ Füüsika Instituudi keskkonnafüüsika laborile uus nanomeeterosakeste ja aeroioonide liikuvusspektromeeter NAIS maksumusega 1 016 400 krooni. Spektromeeter vahetab välja FI keskkonnafüüsika labori Tahkuse vaatlusjaamas alates 1989. aastast pidevalt töötanud ioonispektromeetrite kompleksi.
- Äriees Raivo Hein kinkis Tartu Observatooriumile teleskoobikomplekti, mis koosneb 12,5-tollisest teleskoobist PlaneWave ja monteeringust Paramount ME. Kingitud komplekti saab käima panna täisautomaatse fotomeetrilise robotteleskoobina, mis võimaldab ära kasutada Eestis levinud osaliselt selgeid öid ning sellega tunduvalt tõsta fotomeetriliste aegridade ajalist tihedust.
- Algas EL Interreg IVb Läänemere piirkonna programmi projekt PLASTE (Plasmal baseeruva keskkonnakaitsealase tehnoloogilise innovatsiooni juurutamine Läänemere regioonis), mis kestab 3 aastat. TÜ FI gaaslahenduslabori 14 partnerit on kõigist EL Läänemere piirkonna riikidest, näiteks Plasmauuringute ja Tehnoloogia Leibniz-Instituut (Saksamaa), Riso Taastuvenergia Riiklik Laboratoorium (Taani), Uppsala Ülikool (Rootsi), Lappeenranta Tehnoloogia Ülikool (Soome), Hüdrodünaamiliste Seadmete Robert Szewalski Instituut (Poola), Leedu Energiainstituut (Leedu), Riia Tehnikaülikool (Läti). Projekti TÜ FI poolne koordinaator on Indrek Jõgi. Projektiga saab lähemalt tutvuda [www.plastep.eu](http://www.plastep.eu).

## **TEADUS- JA ARENDUSASUTUSTE SIHTFINANTSEERITAVAJAD TEADUSTEEMASID 2010. AASTAL**

### **Tartu Ülikool**

- SF0182732s06 Ökosüsteemi süsiniku ja veevoogude interaktsioon muutuv keskkonnas Söber, Anu 2006-2011, 2 331 800 kr.
- SF0182747s06 Madaltemperatuurilise gaaslahendusplasma ja tahkise vastasmõju uurimine Laan, Matti 2006-2011, 1 391 300 kr.
- SF0182724s06 Keerukate süsteemide modelleerimine stohhastiliste meetoditega Kollo, Tõnu 2006-2011, 627 200 kr.

- SF0182712s06 Suuremahuliste ja keeruliste arvutusülesannete lahendamise meetodid, arvutuskeskkonnad ja rakendused  
Vilo, Jaak 2006-2011, 1 587 300 kr.
- SF0180042s07 Infotehnoloogiliste ja nanoelektroniliste rakendustega tahkiskihstruktuurid  
Kukli, Kaupo 2007-2012, 1 246 400 kr.
- SF0180013s07 Kondenseeritud aine ja fundamentaalväljade teooria  
Hižnjakov, Vladimir, 2007-2012, 3 510 900 kr.
- SF0180058s07 Madaladimensionaalsed struktuurid ja nende rakendused  
Kikas, Jaak 2007-2012, 4 972 200 kr.
- SF0180055s07 Bioloogiliselt oluliste molekulide ja molekulaarkomplekside füüsikalised uuringud  
Freiberg, Arvi 2007-2012, 1 793 000 kr.
- SF0180037s07 Kiiritusnähtused laia keelutsooniga funktsionaalmaterjalides  
Luštšik, Aleksandr 2007-2012, 3 576 100 kr.
- SF0180073s07 Uute optika- ja spektroskoopiameetodite arendamine ja rakendamine materjali- ja plasmauuringutes  
Saari, Peeter 2007-2012, 2 018 300 kr.
- SF0180046s07 Pinnanähtused tahkisefüüsikas ja -tehnoloogias  
Sammelselg, Väino 2007-2012, 4 130 800 kr.
- SF0180043s08 Nanomeeterosakeste tekkimine ja aerosooliosakeste mõõtmespektri kujunemine nõrgalt ioniseeritud atmosfääri keskkonnas  
Hõrrak, Urmas 2008-2013, 1 567 600 kr.
- SF0180061s08 Molekulide ja molekulaarsüsteemide keemiliste ja füüsikaliste parameetrite mõõtemetodite arendus ja rakendused  
Leito, Ivo 2008-2013, 1 444 800 kr.
- SF0180081s08 Rakendusmatemaatika ja mehhaanika mudelid  
Lellep, Jaan 2008-2013, 1 378 500 kr.
- SF0180002s08 Protsessid modifitseeritud piirpindadel ja faasides ning nende rakendused uuetüübilistes energia allikates ning superkondensaatorites  
Lust, Enn 2008-2013, 4 438 300 kr.
- SF0180127s08 Maastike aineringe muutuvates kliima- ja maakasutuse tingimustes ning selle ökotehnoloogiline reguleerimine  
Mander, Ülo 2008-2013, 3 215 200 kr.
- SF0180178As08 Relevantse loodusteadusliku hariduse osa teadmistepõhises ühiskonnas: multidimensionaalse loodusteadusliku kirjaoskuse kujundamise modelleerimine ja rahvusvaheline evalvatsioon  
Rannikmäe, Miia 2008-2012, 314 700 kr.
- SF0180038s08 Numbrilise ilmaennustuse arendamine õhukeskkonna prognooside suunas  
Rõõm, Rein 2008-2013, 1 365 800 kr.
- SF0180135s08 Protsessid makro- ja mikroheterogeensetes ning nanomõõtmes süsteemides ning vastavad tehnoloogilised rakendused  
Tenno, Toomas 2008-2013, 1 827 300 kr.
- SF0180056s09 Kriitilised ja stohhastilised nähtused mittelineaarsetes füüsikalistes süsteemides  
Tammelo, Risto † (Örd, Teet) 2009-2014, 1 214 900 kr.



### **TÜ Tehnoloogiainstituut**

- SF0180008s08 Ioonised elektroaktiivsed polümeersed materjalid, nende juhtimine ja rakendused  
Aabloo, Alvo 2008-2013, 1 391 300 kr.

### **TÜ Eesti Mereinstituut**

- SF0712699s05 Ranna- ja sisevete optika ning kaugseire  
Kutser, Tiit 2005-2010, 1 507 300 kr.
- SF0180012s08 Keskkonna väikse- ja suuremastaabilise muutlikkuse interaktiivne mõju Läänemere ökosüsteemi protsessidele  
Kotta, Jonne 2008-2013, 2 279 000 kr.
- SF0180104s08 Hüdrodünaamiliste protsesside ja nende mõju uurimine põhjaelustikule kõrgtiheda modelleerimise ning eksperimentaal mõõtmiste baasil  
Suursaar, Ülo 2008-2013, 1 567 600 kr.

### **Tallinna Tehnikaülikool**

- SF0142684s05 Toodete ja tootmisprotsesside kiire teostamine - teooria ja metodoloogia.  
Küttner, Rein 2005-2010, 2 238 400 kr.
- SF0142687s05 Sünteetiliste ja looduslike polümeer materjalide omadused ja väärastamine  
Viikna, Anti 2005-2010, 1 146 400 kr.
- SF0142737s06 Missioonikriitiliste sardsüsteemide elektroonsed komponendid ja alamsüsteemid  
Min, Mart 2006-2011, 3 184 300 kr.
- SF0142719s06 Tehnoloogiliste protsesside intensiivistamine aktuaalsete keskkonna-probleemide lahendamiseks  
Munter, Rein 2006-2011, 1 334 400 kr.
- SF0142714s06 Elektrit juhtivate polümeer materjalide omaduste uurimine ja modifitseerimine kasutamiseks funktsionaalsete materjalidena ning elektronseadiste komponentidena  
Õpik, Andres 2006-2011, 2 736 900 kr.
- SF0140024s07 Energiaressursside säästlik kasutamine ja protsesside täiustamine põletusseadmetes  
Ots, Arvo 2007-2012, 3 443 900 kr.
- SF0140070s08 Kolmemõõtmelised mudelid aerosoolsete kanal-, gradient- ja keeris-vooluste modelleerimiseks ning lahendused tehnoloogilistes protsessides  
Kartušinski, Aleksander 2008-2013, 1 881 200 kr.
- SF0140072s08 Vedeliku ja konstruktsiooni koostoime mehhaanika  
Koppel, Tiit 2008-2013, 1 494 200 kr.
- SF0140092s08 Õhukeskilelised ja nanostruktuursed materjalid keemilistel meetoditel  
Krunks, Malle 2008-2013, 1 601 900 kr.
- SF0140091s08 Kõvapinded ja pinnatehnika  
Kulu, Priit 2008-2013, 1 773 400 kr.
- SF0140062s08 Mitmefasiliste tribomaterjalide arendamine ja tehnoloogia  
Kübarsepp, Jakob 2008-2013, 3 164 600 kr.
- SF0140099s08 Uued materjalid ja tehnoloogiad tuleviku päikeseenergeetikale  
Mellikov, Enn 2008-2013, 4 031 600 kr.
- SF0140090s08 Toidu süsteemibioloogia ja füüsika  
Paalme, Toomas 2008-2013, 1 747 600 kr.
- SF0140113Bs08 Mehhatroonika- ja tootmissüsteemide proaktiivsus ja käitumismudelid  
Tamre, Mart 2008-2013, 1 077 800 kr.

## FÜÜSIKAKROONIKA

- SF0140041s08 Töökindlate sardsüsteemide disain  
Ubar, Raimund 2008-2013, 3 848 500 kr.
- SF0140028s09 Põlevkivi ja kütuste segude termokeemilise töötlemise uued tehnoloogiad  
Luik, Hans 2009-2014, 1 322 700 kr.
- SF0140011s09 Algebra ja analüüsi kaasaegsed rakendusmeetodid diferentsiaal- ja integraalvõrrandite teoorias, matemaatilises füüsikas ja statistikas  
Puusemp, Peeter 2009-2014, 682 100 kr.

### **TTÜ Küberneetika Instituut**

- SF0322709s06 Usaldusväärsed tarkvara- ja inimkeele tehnoloogiad  
Uustalu, Tarmo 2006-2011, 2 574 700 kr.
- SF014007s08 Mittelineaarne dünaamika ja kompleksüsteemid  
Engelbrecht, Jüri 2008-2013, 4 650 900 kr.
- SF014083s08 Mittelineaarsed, puuduliku informatsiooni ja keeruka struktuuriga matemaatilised mudelid  
Kangro, Inga 2008-2013, 1 362 000 kr.
- SF0140018s08 Keerukate mittelineaarsete juhtimissüsteemide süntees  
Kotta, Ülle 2008-2013, 1 908 900 kr.

### **TTÜ Meresüsteemide Instituut**

- SF0140017s08 Läänemere vee- ja ainevahetusprotsessid muutuvate välismõjude tingimustes  
Elken, Jüri 2008-2013, 2 576 700 kr.

### **Tallinna Ülikool**

- SF0132723s06 Mittelineaarsed stohhastilised protsessid nano- ja ökosüsteemides: teooria ning rakendused materjaliteadustes ja ökoloogias  
Mankin, Romi 2006-2011, 1 035 000 kr.
- SF0180178Bs08 Erinevate interdistsiplinaarsuse dimensioonide mõju loodusteadusliku kirjaoskuse kujundamisel  
Reiska, Priit 2008-2012, 550 200 kr.

### **Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut**

- SF0690063s08 Mehhanismid ja interaktsioonid toksikoloogias ja toksinoloogias: in vitro mudelid  
Kahru, Anne 2008-2013, 2 930 100 kr.
- SF0180114Bs08 Integreeritud energeetilise metabolismi regulatsioonimehhanismid lihasrakkudes  
Saks, Valdur 2008-2013, 1 709 300 kr.
- SF0690034s09 Tuumamagnetresonantsi meetodi uued arendused ja rakendused  
Heinmaa, Ivo 2009-2014, 2 131 900 kr.
- SF0690001s09 Põlevkivi töötlemise tahkete jäätmete keskkonnasõbraliku kasutamise strateegia  
Kirso, Uuve 2009-2014, 1 205 800 kr.
- SF0690021s09 Keemiline energiatehnoloogia  
Lippmaa, Endel 2009-2014, 1 567 600 kr.
- SF0690030s09 Kõrgete energiatega ja teoreetiline füüsika  
Raidal, Martti 2009-2014, 2 111 100 kr.
- SF0690029s09 Funktsionaalsete materjalide spektroskoopia  
Rõõm, Toomas 2009-2014, 1 636 200 kr.

**Tartu Observatoorium**

- SF0060030s08 Evolutsiooni hilisfaasis tähtede ja nende ümbriste vaatluslik ja teoreetiline uurimine  
Kipper, Tõnu 2008-2013, 4 389 200 kr.
- SF0060115s08 Optiliselt keerukate looduskeskkondade kaugseire  
Kuusk, Andres 2008-2013, 940 600 kr.
- SF0060067s08 Tumeenergia, tumeaine ja struktuuri teke Universumis  
Saar, Enn 2008-2013, 3 500 000 kr.

**EESTI TEADUSFONDI 2010. AASTAL ALANUD  
UURIMISTOETUSI**

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

**4. Loodusteadused ja tehnika**

**4.2 Maateadused**

- Atmosfääri ioon-aerosoolprotsesside analüüs vaatlusandmetele ja füüsikalise-keemilisele teooriale tuginevate mudelite abil (Urmas Hörrak, TÜ) ETF8342 2013
- Mereliste komplekssete meteoriidikraatrite tekke iseärasused (Sten Suuroja, Eesti Geoloogiakeskus) ETF8266 2013
- Ordoviitsiumi ja Siluri kliima peamised tsüklid, mis on tõendatud süsiniku ja hapniku isotoopide, faatsieste ning stratigraafilistele uuringutega (Tõnu Martma, TTÜ) ETF8182 2013
- Pleistotseeni viimase jäävaheaja loodusolude arengulugu Põhja-Eestis 5. merelise isotoopstaadiumi kestel (Anatoli Molodkov, TTÜ)<sup>1</sup> ETF8425 2012

**4.3 Kosmoseuringud ja astronoomia**

- Eksperimentaalne kõrge energia füüsika (Mario Kadastik, KBFI)<sup>1</sup> ETF8499 2013

**4.10 Füüsika**

- Aerosooli nanoosakeste suurusjaotuse mõõtmise teoreetilised ja tehnoloogilised probleemid. (Aadu Mirme, TÜ) ETF8417 2012
- Bose-Einsteini kondensatsioon ja magnetiseeruvuse platood frustreritud spinn-dimeersetes kvantmagnetites (Raivo Stern, KBFI) ETF8440 2013
- Endoheedraliste vesiniku-fullereenikomplekside infrapunaspektroskoopia (Urmas Nagel, KBFI) ETF8170 2013
- Korrastamata pehmete materjalide optiline spektroskoopia (Indrek Renge, TÜ) ETF8369 2013

- Kõrge tundlikkusega maagilise pöörlemisega tahke keha TMR tehnika arendamine (Ivo Heinmaa, KBF) ETF8198 2013
- Laserindutseeritud vooluimpulsside uurimine (Märt Aints, TÜ) ETF8237 2012
- Metalliga dopeeritud titaandioksiidi kilede uuringud (Vambola Kisand, TÜ)<sup>2</sup> ETF8216 2013
- Mikrotorujate oksiidstruktuuride väljatöötamine metalloksiidide plastse-elastse kontrollitava ülemineku teel (Ants Lõhmus, TÜ)<sup>2</sup> ETF8377 2013
- Nanostruktuursete metamaterjalide valmistamine, karakteriseerimine ja modelleerimine (Ilmar Kink, TÜ)<sup>2</sup> ETF8420 2013
- Rekombinatsioonilised kaod CZTS(Se) päikesepatareides (Jüri Krustok, TTÜ) ETF8282 2013
- Uued funktsionaalsed materjalid nanostruktuursete oksiidide baasil (Marco Kirm, TÜ)<sup>2</sup> ETF8306 2013
- Valguse levik ja kvantnähtused sub-lambda keskkondades (Viktor Palm, TÜ) ETF8167 2013

#### 4.12 Protsessitehnoloogia ja materjaliteadus

- Biotundlikud süsteemid pindmiste mälu pesadega molekulaarselt jäljendatud elektrit juhtivatest polümeeridest (Vitali Sõritski, TTÜ) ETF8249 2012
- Jääkpingete uurimine termopihustatud ja sadestatud pinnetes (Alexander Ryabchikov, EMÜ) ETF8459 2012
- Katalüsaatorid hüdroksüülapatidil baseeruvatest hübridmaterjalidest (Kaia Tõnsuaadu, TTÜ) ETF8207 2013
- Keemilise pihustuspürolüüsi meetodil kasvatatud ZnO nanovarraste areng (Tatjana Dedova, TTÜ) ETF8509 2013
- Klaasdispergeeritud elektro-optilised pinnakatted (Kristjan Saal, TÜ) ETF8428 2013
- Materjalide ja konstruktsioonide optimeerimine arvestades elastset ja/või plastset anisotroopiat (Jüri Majak, TTÜ)<sup>3</sup> ETF8485 2013
- Nanoosakeste valmistustehnoloogia mõju metallmaatriks nanokomposiitide omadustele (Lauri Kollo, TTÜ) ETF8472 2012
- Nelikmaterjalide kiled kalgogeniseerimise protsessis; mehhanism ja kineetika (Olga Volobujeva, TTÜ)<sup>4</sup> ETF8147 2013
- Suurendatud sitkusega ülikõva keraamiliste komposiitmaterjalide disain (Irina Hussainova, TTÜ) ETF8211 2013
- Uudsed bimodaalse koostisega polüetüleenid: makromolekulaarsete koostisosade ja hargnemiste mõju kristallisatsioonile, reoloogiale ja mehaanilistele omadustele (Andres Krumme, TTÜ) ETF8134 2013

#### 4.13 Mehhanotehnika, automaatika, tööstustehnoloogia

- Aparatuur fotosünteesi uurimiseks: LED-valgusallikad, impulss-spektrofotomeeter, taimekambrid, juhtimisprogrammid (Vello Oja, TÜ) ETF8344 2013
- Inimliigutuste tuvastamine ja modelleerimine (Sven Nõmm, TTÜ) ETF8365 2013

<sup>1</sup> osaliselt erialal 4.10 Füüsika

<sup>2</sup> osaliselt erialal 4.12 Protsessitehnoloogia ja materjaliteadus

<sup>3</sup> osaliselt erialal 4.13. Mehhanotehnika, automaatika, tööstustehnoloogia

<sup>4</sup> osaliselt erialadel 4.11 Keemia ja keemiatehnika ja 4.17. Energeetikaalased uuringud

## VI. RAAMATUD JA KOGUMIKUD

- Leet, R. Füüsika lõiming põhikoolis. Raamatus: Lõiming. Lõimingu võimalusi põhikooli õppekavas, 452-470. // Tartu Ülikooli haridusuuringute ja õppekavaarenduse keskus. 2010.
- Loide, R.-K. Füüsika näidisülesandeid: elekter ja magnetism. 1. osa. // Tallinn: Koolibri. 2010.
- Loide, R.-K. Füüsika näidisülesandeid: elekter ja magnetism. 2. osa. // Tallinn: Koolibri. 2010.
- Mankin, R., Reiter, E. Statistiline termodünaamika III. // Tallinn Technical University Press. 2010.
- Pärtel, E. Füüsika mõisted gümnaasiumile. Eesti-vene-eesti sõnastik. // Tartu Ülikooli Kirjastus. 2010. 277 lk.
- Pärtel, E. Loodusõpetus. Sissejuhatus füüsikasse ja keemiasse. 7. klass. // Koolibri 2010. 160 lk.
- Pärtel, E. Loodusõpetus. Töövihik 7. klassile. 1. osa. // Koolibri 2010. 80 lk.
- Pärtel, E. Loodusõpetus. Töövihik 7. klassile. 2. osa. // Koolibri 2010. 80 lk.
- Olbrei, M., Pärtel, E., Teller, M. Loodusained. Raamatus: Õppimine ja õpetamine I ja II kooliastmes, 297-318. // Tartu: ECOPRINT. 2010.
- Pärtel, E. Loodusainete valdkond. Raamatus: Lõiming. Lõimingu võimalusi põhikooli õppekavas, 396-400. // Tartu Ülikooli haridusuuringute ja õppekavaarenduse keskus. 2010.
- Pärtel, E. Loodusõpetus. Raamatus: Lõiming. Lõimingu võimalusi põhikooli õppekavas, 401-433. // Tartu Ülikooli haridusuuringute ja õppekavaarenduse keskus. 2010.
- Voolaid, H., Ganina, S. Füüsika. Riigieksamite ülesandeid & soovitusi lahendamiseks. // Atlex, 2010, 96 lk.
- Гаврилов, А. Курс общей физики. II том (Üldfüüsika kursus II, The course of general physics vol II). // Nelli Print. 2010.

## VII. IN MEMORIAM

### Tõnu Tuvikene

28. VI 1952 – 13. III 2010

13. märtsil 2010 lahkus raske haiguse tagajärjel Tõnu Tuvikene – astronoom, arvuti-asjatundja, eelkõige aga rahvalgustaja, kes kogu hingest hoolitses selle eest, et ees-  
timaalased teaksid paremini, milline on meid ümbritsev Universum, kuidas teda uuritakse, milliseid teaduse ja tehnoloogia saavutusi kasutavad uuemad kosmose-aparaadid. Päikesesüsteemis tegutsevate automaatjaamade tegemisi ja kulgemisi teadis ta ilmselt paremini kui näiteks Tartu linnaliinibusside sõiduplaane.



Tõnu Tuvikene sündis 28. juunil 1952 Tartus. 1970. aastal lõpetas ta tollase 1. Keskkooli. Füüsikust isa eeskujul kujunes haridustee jätkuks Tartu Ülikooli füüsikaosakond, kust Tõnu Tuvikene sai diplomi 1975. aastal. Järgnesid tööaastad Tõravere, Eesti täheteaduse ja kosmoseuuringute keskuses, kus peamisteks märksõnadeks olid astronoomia, arvutid ja kosmos. Eesti jaoks huvitaval ajal, 1980. aastate lõpul muutusid majandus- ja tööolud. Tõnu Tuvikese igapäevatööks sai programmeerimine, esialgu firmas „Urania“, viimastel aastatel Eesti hariduse ja teaduse andmesidevõrgus EENet. Hobiks, aga pigem siiski armastuseks jäid astronoomia ja kosmos. Üle 20 aasta hoidis Tõnu Tuvikene käigus Tartu Tähetorni Astronoomiaringi, mille koosolekutel oli ta ise juba koolipoisina käima hakanud. Ta pidas väga tähtsaks ringi töö järjepidevust ja töötas selle nimel viimaste nädalateni. Tema populaarteaduslike kirjatööde arv ulatub üle saja. Eesti astronoomia populariseerimise tähtteosest „Universum“ on tema autorluses valminud üle 60 lehekülje. Ajakirjad „Horisont“, „Tehnikamaailm“, „Tarkade Klubi“ jt on jäänud ilma heast kaasautorist, kes kauge kosmose keerukaid asju inimlähedaselt kirjeldas. Aastaid raadios esinenud Tõnu Tuvikese hääl kostis viimati kõige sagedamini Viikerraadio saadetes „Huvitaja“ ja „Labor“. Tema ettekanded olid alati oodatud astronoomiahuviliste üle-Eesti kokkutulekutel, mitmesugustel teaduspäevadel, koolides, AHHA näitustel.

Hingega tehtust jätkub innustust ka ümberkaudsetele. Üks Tõnu Tuvikese poegadest, Taavi, jätkab isa jälgedes astronoomi tööd. Küllap on nii mõnedki noored leidnud tee täppisteaduste juurde just Tõnu Tuvikese kirjatükke lugedes või raadiovestlusi kuulates. Oleme tänulikud koos oldud aja eest. See võinuks olla pikem, kuid tuleb leppida looduse poolt seatud piiridega.

### Harald Keres

15. XI 1912 – 26. VI 2010

Meie hulgast on lahkunud Eesti teoreetilise füüsika *grand old man* Harald Keres.

Harald Keres sündis 15. novembril 1912. aastal Pärnus käsitöölise perekonnas. 1932. aastal lõpetas ta Pärnu Linna Poeglaste Gümnaasiumi ja 1936. aastal *cum laude* Tartu Ülikooli matemaatikaosakonna. 1938. aastal kaitses ta magistrikraadi matemaatikast teemal „Kattumismuutlikkude dünaamika“ ja 1942. aastal *doctor philosophiae naturalis* teaduskraadi teoreetilisest füüsikast teemal „Ruumi ja aja relativistlik teooria“. Doktoriväitekirja tuli tal 1947. aastal teistkordselt kaitsta, et omandada füüsika-matemaatikadoktori teaduslik kraad. 1954. aastal sai ta teoreetilise füüsika professori kutse.

Ülikooli lõpetamise järel jäi Harald Keres tööle ülikooli juurde, oli algul tähetorni abiassistent, edasi noorem abiõppejõud matemaatika alal ja matemaatikadotsendi kohusetäitja. Sel ajal alustas ta ka loengute lugemist eri- ja üldrelatiivsusteooria alustest. Relatiivsusteooria jäigi tema kitsamaks erialaks, mis tähendas ühtlasi siirdumist matemaatikast teoreetilisse füüsikasse. 1944. aastal mobiliseeriti Harald Keres Saksa mereväkke, kus oli abiteenistuslasteks värvatud teismeliste eesti poiste hooldaja-õpetaja. Sõja lõppedes sattus ta Ameerika poolele, kuid läbi raskuste õnnestus tal pääseda tagasi Eestisse.

Õppetöö Tartu Ülikoolis jätkus matemaatilise analüüsi kateedri vanemõpetaja ja dotsendina ning alates 1954. aastast professorina teoree-



tilise füüsika erialal. Aastail 1949–1958 oli ta teoreetilise füüsika kateedri juhataja ja 1958–1960 ülikooli teadusprorektor. Samaaegselt ülikooliga töötas Harald Keres Eesti Teaduste Akadeemia Füüsika ja Astronoomia Instituudi tähetorni juhatajana ning 1960–1989 füüsikainstituudi teoreetilise füüsika laboratooriumi juhatajana. Alates 2000. aastast oli ta Tartu Ülikooli emeriitprofessor.

1961. aastal valiti Harald Keres Eesti Teaduste Akadeemia liikmeks teoreetilise füüsika alal.

Teadustegevuses keskendus Harald Keres üldrelatiivsus- ja gravitatsiooniteooria arendamisele. Ta defineeris nn üldistatud inertsiaalsüsteemid, mis on määratud vabalt langevate osakeste ja kelladega ning mis ei ole kirjeldatavad jäikade koordinaadistikkude abil. Ta näitas, et neis taustsüsteemides on liikumise üldrelativistlik kirjeldus paljuski sarnane kirjeldusega klassikalise Newtoni teooria raames, mis lubas sõnastada täpse matemaatilise piirülemineku Einsteini gravitatsiooniteoorialt Newtoni teooriale. Seda piirüleminekut nimetakse nüüd vastavuse printsiibiks üldrelatiivsusteoorias. Harald Kerese sulest on ilmunud üle kolmekümne kõrgetasemelise teadusartikli, kaks ülikooliõpikut, populaarteaduslik vihik ajast ja ruumist ning mälestusteraamat „Sajandi seiklus“. Ta oli silmapaistvalt aktiivne publitsistika vallas, populariseerides teadust kui rahvuskultuuri lahutamatu osa. Need tema artiklid on taas-trüki ilmunud Eesti mõtteloo sarja raamatus „Ruum ja aeg“.

Harald Kerese paljude tunnustuste hulgas on riiklik teaduspreemia, Riigivapi III klassi teenetemärk ja Eesti Rahvuskultuuri Fondi elutöö tänuauhind. 1996. aastal valiti ta Tartu linna aukodanikuks. Ta oli Eesti Füüsika Seltsi asutajaliige ning 2004. aastal valiti seltsi auliikmeks. Kuid püsiva suhtlusringkonna leidis ta eelkõige üliõpilasseltsis Liivika, mille liikmeks astus juba üliõpilaspäevil ja kus sõbralikud koosviibimised jätkusid läbi aegade.

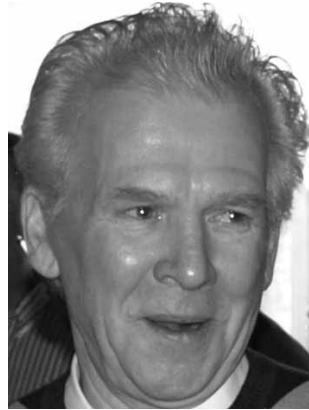
Akadeemik Keres võttis kuni viimaste aastateni sõna paljudes olulistes teaduse ja hariduse küsimustes. Tema loomupärane väärikus ja ausus pälvisid kõikide kolleegide lugupidamise ning sellisena jääb ta Eesti teadusajalukku ja kolleegide mälestustesse.



**Ilmar Kuusmann**

29. XII 1938 – 25. VII 2010

25. juulil 2010, pärast aastaid kestnud visa võitlust pika ja raske haigusega, lahkus meie hulgast Ilmar Kuusmann. Ta sündis 29. detsembril 1938. a Tallinnas, kus omandas ka keskhariduse. Läbinud sõjaväeteenistuse õppis ta aastail 1960 – 1965 Tartu Riiklikus Ülikoolis ja lõpetas selle füüsika erialal. Kursusekaaslased mäletavad teda kui väga aktiivset ja teokat kursusevanemat, kelle ettevõtlikkusest sündis palju häid ettevõtmisi. Ilmari kandidaaditöö, mis valmis 1975. aastal, oli pühendatud ionkristallide katoodluminesentsi spektraal-kineetilisele uurimisele, mis



kuulus vaieldamatult tollaegse teaduse eesliini. Kahtlemata oli Ilmar Kuusmann Füüsika Instituudi üks andekamaid, sihikindlamaid ja täiuslikkuse poole püüdlevaid eksperimentaatoreid. Ilmar ei tunnistanud kompromisse ei isiklikus elus ega teadustegevuses. Tänu tema erakordsele ettevõtlikkusele ja energilisusele loodi FI-s unikaalne katoodluminesentsi seadmekompleks nõrkade kiirguste mõõtmiseks vaakumult-ravioleti spektripiirkonnas laias temperatuuride vahemikus, mis pärast kaasajastamist suures osas toimib siiani. Sellel seadmel avastati muuhulgas vabade ja iselöksustunud eksitonide kooseksisteerimise nähtus, mida hiljem uuriti erinevates materjalides paljudes maailma juhtivates füüsikalaborites. Oma teadlasettee jooksul ilmus tema kaasautorlusel mitmeid teadusartikleid, mida siiani jätkuvalt tsiteeritakse. Ilmar Kuusmannist sai Füüsika Instituudi esimene Alexander von Humboldti fondi stipendiaat (1980). See võimaldas tal aasta jooksul töötada Hamburgi sünkrotronkiirguse laboris HASYLAB professor G. Zimmereri grupis. See oli rohkem kui teedrajav sündmus – tänu Ilmar Kuusmanni aastatepikkusele sõprussele professor Zimmereriga sai alguse siiani kestev Tartu füüsikute viljakas koostöö Hamburgi Ülikooli ja HASYLABi uurimisgruppidega. Ilmari energiast pakatav elustiil väljendus ka tema armastuses tennise vastu – üks ilusamaid saavutusi oli võit Hamburgis sünkrotronikeskuse korraldatud rahvusvahelisel turniiril, kust auhinnaks saadud profireket tema

pingutusi kroonis. Ilmari elutööks oli aga kahtlemata oma kodu rajamine Kurepalus maalilise Mörraoja pervel. Igaüks, kes sattus seda hoole ja armastusega loodud paradiisnurgakest nägema, sai unustamatu vaatepildi osaliseks. Mitte igapähele pole sellist isiklikku mälestusmärki – ei isiklikus ega teaduselus.

Mälestus heast kolleegist ja suurepärasest teadlasest jääb meisse kauaks püsima nagu ka tema avastused laia keelutsooniga materjalide uurimisel teadusajalukku.

### Ivar Jaek

11. X 1930 – 26. VII 2010

Mullustel kuumadel juulipäevadel rabas ülikooli ja füüsikainstituudi peret järsk leinasõnum: lahkunud on professor Ivar Jaek.

Ivar Jaek sündis 11. oktoobril 1930 Võrus, ohvitseri perekonnas. Omandanud keskkooli Tartus Hugo Treffneri gümnaasiumis (tollal Tartu 1. keskkool), astus ta Tartu Ülikooli, mille füüsikaosakonna lõpetas kiitusega 1955. aastal. Kui äsja ülikooli lõpetanud nooruk otsis oma teed teadusse, suunas nüüdne akadeemik Tšeslav Luštšik ta kristallide luminesentsi avarale uurimiseväljale.



Ivar Jaek oli aastail 1955 – 1957 TÜ assistendiks, 1960 – 1962 Füüsika Instituudi nooremteaduriks, samas vanemteaduriks 1962 – 1967. Kaitstes kandidaadiväitekirja aastal 1961, doktoriks promoveerus 1976. 1983 valiti ta TÜ professoriks. Aastate lisandudes sai temast 1996 TÜ emeriitprofessor. 1967 valiti ta Füüsika Instituudi vastloodud kristallide kiiritusfüüsika sektori (hilisema labori) juhatajaks. Ta kujundas erakordselt üksmeelse ja kokkuhoidva teadlaskollektiivi, kes siinamaani aegajalt tema kodus koos käis.

Aastail 1984 – 1989 oli Ivar Jaek TÜ füüsika-keemiateaduskonna teadusprodekaan. Tudengitele on ta lugenud mitmeid üld- ja erikursusi, olnud 9 kandidaaditöö ning hulga diplomitööde juhendajaks. Tema ja tema töökaaslaste teadustöö oli pühendatud kristallide kiiritusfüüsikale

ning kvaasiosakeste (elektronide ja aukude) rekombinatsiooniprotsessidele kristallides.

Ühenduses tuumafüüsika ning tuumaenergeetika arenguga sai tollal (s.o 1960ndail – 70ndail aastail) ülimalt aktuaalseks kiiritusohutuse problemaatika. Muuhulgas vajati kiiritusannuse mõõtureid (dosimeetreid), mis on selektiivse tundlikkusega: vähem tundlikud suhteliselt ohutuma gammakiirguse suhtes, tundlikumad ohtlikuma kiirguskomponendi, raskete osakeste (nimelt kiirete neutronite) voogude suhtes. Just sellele probleemile keskendus Ivar Jaek ja tema juhitud uurijate-rühm, saades teadusilmas üldtunnustatud tulemusi. 1987 pälvis ta koos kaastöötajatega Eesti riikliku preemia.

Koos TA Geoloogia Instituudi teaduritega töötas ta edukalt ka arheoloogiliste keraamikaleidude ja kivimite ea määramise kallal nende termoluminesentsi järgi (paleodosimeetria).

Ivar Jaeki teadustööde nimistus on üle saja üllitise, neist paljud nimekaid teadusajakirjades, lisaks 5 leiutise autoritunnistust. Tema esimene trükitud teadustöö (koos juhendaja Leonid Uiboga) avaldati eriti prestiižikas ajakirjas NSVL TA Toimetised.

Ivar Jaekist jääb meile mälestus kui usinast teadusmehest, leebe ja sõbraliku loomuga inimesest.

### **Hilda Teral**

19. XII 1940 – 31. VII 2010

Möödunud palavat suve ei elanud üle neli aastakümnet Tartu Ülikoolis füüsikat õpetanud kolleeg Hilda Teral. Üldfüüsika kateedri kauaaegse õppejõuna õpetas ta põhiliselt mittefüüsikuid arsti- ja bio-geoteaduskonnas.

Hilda Teral (a-ni 1972 Kallas) sündis ja kasvas Pihkva oblastis, astus Leningradi RÜ füüsikateaduskonda ja lõpetas selle 1964. a. Aastail 1965–68 oli ta samas aspirant ja kaitses füüsika-matemaatika kandidaadikraadi plasmafüüsika alal 1971. a. Ühena vähestest eestlastest sai temast



seal üleliidulise avastuse kaasautor. Väga tagasihoidliku inimesena ei reklaaminud ta seda saavutust, seda enam, et pidas avastuste registreerimist pelgalt NSVL teaduskorralduse juurde kuuluvaks. Töö sisuline väärtus aga on püsiv ja seda kirjeldas ta elu lõpuaastal nii:

„Aspirantuuri viimasel aastal läbi viidud eksperimendis kerkis esile üks nähtus, mida minu juhendaja, kvantelektronika labori juhataja Maria Pavlovna Tšaika (1923–2003) ja mina kirjeldasime artiklis X. Каллас, М. Чайка, „„Выстраивание“ возбужденных состояний неона в разряде постоянного тока“ („Оптика и спектроскопия“ 1969, т. 27, вып. 4, стр. 694–696): helendavates gaasilistes keskkondades eksisteerivad aatomite elektronkatete orientatsioonis varjatud korrapärasused. Nähtuse (mis hiljem 1982 avastuseks kvalifitseeriti) edaspidisest uurimisest ei saanud ma enam osa võtta, kuna aspirantuuriaeg lõppes ja asusin taas tööle Tartusse. Väitekirja materjal oli mul ilma selletagi olemas.“

Aastail 1964–65 ja edasi alates aastast 1969 töötas Hilda Teral Tartu ülikooli üldfüüsika kateedris. Kui 1980ndate alguses taasavati TÜ geofüüsika kateeder, asus ta seal tööle vanemõpetajana. Prof Olev Avaste palvel arendas ta välja füüsikutele mõeldud atmosfäärioptika kursuse.

Kuna Hilda Teral kasvas Pihkva oblastis ja lõpetas Leningradi Ülikooli, valdas ta laitmatult vene keelt ja tema koostatud või tõlgitud oli suur osa omaaegseid TÜ füüsikaosakonnas publitseeritud venekeelseid füüsikapraktikumi juhendeid.

Vanemad inimesed mäletavad 1950ndate lastehalvatusepideemiat. Pärast kuudepikkust põdemist õnnestus H. Teralil, erinevalt oma palatikaaslastest, paraneda, kuid seda invaliidistumise hinnaga. Viimastel aastatel hakkas tema tervis uuesti halvenema, pedagoogilisest tööst tuli loobuda. Teadustööd, ikka atmosfäärioptikast, tegi ta möödunud kevadeni.

*Vita nostra ...*

### **Risto Tammelo**

13. VII 1945 – 27. XI 2010

Hilissügisel, 27. novembril lahkus kuuekümmne kuuendal eluaastal meie seast füüsik-teoreetik, Tartu Ülikooli professor Risto Tammelo. Põlise tartlasena oli ta ülikoolilinna teaduse ja kultuurielu üks kandjaid ja edendajaid, luues silla klassikalise ja kaasaegse füüsika vahel. Pärast

Tartu 5. Keskkooli lõpetamist astus ta Tartu Ülikooli füüsikaosakonda, erialaks teoreetiline füüsika. Tema valik oli kindel ja tulenes siirast kiindumusest teadmistesse, teada saamisesse ning veel seni tundmatu avastamisesse. Selleks sobis tugevate traditsioonidega Tartu Ülikooli teoreetilise füüsika kateeder, millega ta jäi tihedalt seotuks kuni elu lõpuni.



Lõpetanud 1970. aastal Tartu Ülikooli füüsikaosakonna *cum laude*, alustas Risto Tammelo oma teadlaseteed aspirantuuris üldrelatiivsusteooria alal ning seejärel töötas kakskümmend aastat Eesti Teaduste Akadeemia Füüsika Instituudis samas valdkonnas. Aastal 1990 kaitses ta füüsika-matemaatika doktori kraadi ning 1993. aastal valiti siis juba juhtivteadur Risto Tammelo TÜ teoreetilise füüsika instituudi korraliseks professoriks. Lisaks õppetööle oli prof Tammelo teoreetilise füüsika instituudi juhataja aastatel 1996–2007, millele lisandus füüsikaosakonna juhatamine aastatel 1998–2007. Kuni viimase ajani seisis ta Füüsika Instituudi väljateooria labori juhatajana hea selle labori käekäigu eest.

Õppe- ja teadustöö administreerimisel oli Risto Tammelo tasakaalukas ning perspektiivi- ja missioonitundlik. Ta suutis ületada erimeelsusi ning hoiduda äärmustesse kalduvatest arengutest. Kõik Risto Tammelo kaastöötajad on kogenud tema kui juhi toetust ja heasoovlikust.

Professor Risto Tammelo uuris mitmeid gravitatsiooniteooria fundamentaalprobleeme nagu näiteks lõpliku ulatusega kehade liikumist Riemanni aegruumis, gravitatsioonilaineid ja nende detekteerimist ning laineprotsesse kõveras aegruumis. Viimasel ajal keskendus tema teadushuvi üldrelatiivsusteooria kõrval aga ka statistilisele füüsikale ja stohhastilistele nähtustele. Risto Tammelo oli füüsik, keda iseloomustas sügav erudeeritus ning selge ja distsiplineeritud mõtlemine, ja kes jätkas teoreetilise füüsika traditsioone Eestis nii uurijana kui ka õpetajana.

Füüsikud jäävad professor Risto Tammelot mäletama kui pühendunud teadlast ja õppejõudu, alati abivalmis kolleegi ja kaaslast.

## VIII. FÜÜSIKAHARIDUSLIK TEGEVUS

- SA Archimedes jagas 2010. aasta Eesti teaduse populariseerimise auhinnad (vt [www.archimedes.ee/teadpop](http://www.archimedes.ee/teadpop)). Auhinnale esitati 37 kandidaati. Auhindade hulgas oli ka füüsikaga seotuid.
  - Elutööpreemia pikaajalise süstemaatilise teaduse ja tehnoloogia populariseerimise eest (60 000 krooni) sai Rein Veskimäe.
  - Peapreemia kategoorias „Teaduse ja tehnoloogia populariseerimine trükisõna abil“ (30 000 krooni) said Tiit Kändleri 2009. ja 2010. aastal ilmunud populaarteaduslikud raamatud.
  - Peapreemia kategoorias „Tegevused / tegevuste sarjad teaduse ja tehnoloogia populariseerimisel“ (30 000 krooni) sai Energia avastuskeskuse virtuaalse poolkuppelplanetaariumi avamine ning tegutsemine 2009. aastal, avastuskeskuse juhataja Kertu Saks.
  - Peapreemia kategoorias „Parim teadust ja tehnoloogiat populariseeriv teadlane, ajakirjanik, õpetaja“ (30 000 krooni) sai Aare Baumer, Energia avastuskeskuse teadus- ja arendusjuht.
- Õpilaste teadustööde riiklikule konkursile laekus 75 tööd 30 koolist, neist parimate tööde autoritele ja edukamate tööde juhendajatele jagati preemiatena välja 175 000 krooni. Gümnaasiumiastme II preemiad (12 000 krooni) said:
  - Maria-Liesbeth Kaitsa (Tallinna Reaalkool) töö „Kapillaartsoon-elektroforeetilise meetodi väljatöötamine toidu lisainete analüüsiks jookides“ eest, lisaks võimalus osaleda Euroopa Liidu noorte teadlaste konkursil 2010 septembris Lissabonis Portugalis.
  - Kert Pütsepp (Tallinna Reaalkool) töö „Pinge-voolutugevuse vaheliste seoste uurimine keemilises analüüsis. Klassikaline polarograafia ja selle arendused“ eest. Lisaks pälvis Kert ka SA Archimedes eripreemia – osalemine *London International Youth Science Forumil* (juuli 2010) Suurbritannias.
- Teaduskeskus AHHA korraldas teadusnäitusi, teaduskohvikuid, õpilaste- ja pereüritusi. AHHA-keskuse teadusnäitus Tartu Lõunakeskuses suleti novembri lõpus, et avada see 2011. a mais juba uues majas Tartu kesklinnas. Lõunakeskuses jätkas töötamist AHHA 4D elamusokino. Näitusi korraldati ka AHHA Tallinna filiaalis (Vabaduse väljak 9) ja populariseeriti energeetikateadust Ida-Virumaal.
- TTÜ korraldas ekskursioone Tallinna Tähetornis lasteaia- ja koolilastele ning organisatsioonidele, läbiviijaks Mario Mars.

- Valmistutakse 43. rahvusvahelise füüsikaolümpiaadi IPHO 2012 korraldamiseks Tallinnas. Akadeemilise korralduskomitee juhid on Jaak Kikas (TÜ) ja Jaan Kalda (TTÜ).
- TÜ koolifüüsika keskuse tegevusi aastal 2010:
  - 26. veebruarist kuni 7. maini viidi koostöös Avatud Ülikooli keskusga programmi Primus raamides läbi kursus „Reaalteaduste didaktika“, mille lõpetas 23 õppejõudu TÜ FI-st, TÜ KI-st ja EMÜ-st.
  - Enn Pärtel pidas XL füüsikapäevadel ettekande „Loodusõpetus 7. klassis: ainekava, lõiming, konstruktiivne sidusus, õpekomplekt“.
  - 9. aprillil esines H. Voolaid bioloogiaõpetajate aktiivile (Tähe 4 – 315, 20 osalejat).
  - 24. septembril esines H. Voolaid loenguseerias „Monumentaalfüüsika“ teemal „Siga ja pooljuhid“ Teadlaste Öö raamides Tartu Turuhoone ees oleva sea skulptuuri juures.
  - riikliku õppekava põhikooli loodusõpetuse ainekava töögrupi juht on Enn Pärtel.
- 6. ja 7. märtsil toimus Tartu Ülikoolis Eesti koolinoorte 57. 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 (11. kl, Hugo Treffneri Gümni); Madis Ollikainen (11. kl, Gustav Adolfi Gümni).
    - \* Põhikooli arvestuses: Sandra Schumann (9. kl, Tallinna Reaalkool); Jaan Toots (9. kl, Tallinna Tehnikagümni).
  - II Autasustada 2. järgu diplomiga
    - \* Gümnaasiumi arvestuses: Siim Liiser (11. kl, Tallinna Reaalkool), Kadi Liis Saar (11. kl, Tallinna Reaalkool), Andres Jaanson (11. kl, Pärnu Koidula Gümni), Gerli Viikmaa (12. kl, Pärnu Koidula Gümni), Sander Siim (11. kl, Vanalinna Hariduskolleegeium), Kert Pütsepp (11. kl, Tallinna Reaalkool), Ivar Kiitam (11. kl, Tallinna Reaalkool).
    - \* Põhikooli arvestuses: Kaur Aare Saar (9. kl, Tallinna Inglise Kõledž), Sille Habakukk (9. kl, C. R. Jakobsoni nim Gümni), Aleksandra Jartseva (9. kl, Tallinna Tõnismäe Reaalkool), Joonas Merisalu (9. kl, Tartu Veeriku Kool), Sander Udam (9. kl, Tallinna Reaalkool).

- III Autasustada 3. järgu diplomiga
  - \* Gümnaasiumi arvestuses: Roland Matt (12. kl, Hugo Treffneri Gümnn), Chris Reintal (12. kl, Tallinna Reaalkool), Eero Vaher (11. kl, Pärnu Koidula Gümnn), Erik Tamre (10. kl, Tallinna Reaalkool), Mario Reiman (12. kl, Nõo Reaalgümnn).
  - \* Põhikooli arvestuses: Kristo Ment (9. kl, Pärnu Koidula Gümnn), Eduard Harkov (9. kl, Tallinna Tõnismäe Reaalkool), Roman Kulašenkov (9. kl, Narva Pähklimäe Gümnn), Lona-Liisa Sutt (9. kl, Miina Härma Gümnn), Deniss Tšassovskihh (9. kl, Narva Humanitaargümnn), Uku-Kaspar Uustalu (8. kl, Tallinna Reaalkool).
- IV Autasustada järguta diplomiga
  - \* Gümnaasiumi arvestuses: Sergei Jakovlev (10. kl, Tartu Vene Lütseum), Siim-Erik Paju (11. kl, C. R. Jakobsoni nim Gümnn), Rauno Siinmaa (12. kl, Pärnu Koidula Gümnn), Erik Paemurru (12. kl, Tallinna Reaalkool), Ardo Kaurit (12. kl, Gustav Adolfi Gümnn), Helen Liis (11. kl, Tallinna Reaalkool), Kristian Kuppert (11. kl, Vanalinna Hariduskollegium), Tanel Kiis (10. kl, C. R. Jakobsoni nim Gümnn).
  - \* Põhikooli arvestuses: Priit Välja (9. kl, Tartu Karlova Gümnn), Karl Reinkubjas (9. kl, Sõmeru Põhikool), Jüri-Mikk Udam (9. kl, Tallinna Reaalkool), Rebeka Mändar (9. kl, Kärla Põhikool), Kirill Tammela (9. kl, Tallinna Inglise Kolledž), Kristjan-Martin Kirjanen (9. kl, Miina Härma Gümnn), Siim Sammül (8. kl, Nõo Põhikool), Heigo-Elmar Vahesaar (8. kl, Tartu Veeriku Kool).
- V Eriauhinnad toetajatelt:
  - \* Füüsika Instituudi eriauhind – Ants Remm (11. kl, Hugo Treffneri Gümnn);
  - \* Eesti Füüsika Seltsi eriauhind – Erik Tamre (10. kl, Tallinna Reaalkool);
  - \* Kirjastuse Avita stipendium – Madis Ollikainen (11. kl, Gustav Adolfi Gümnn), Sandra Schumann (9. kl, Tallinna Reaalkool), Jaan Toots (9. kl, Tallinna Tehnikagümnn);
  - \* Stipendium „Benoit Mandelbrot’i jälgedes“ – Siim Liiser (11. kl, Tallinna Reaalkool), Kadi Liis Saar (11. kl, Tallinna Reaalkool), Andres Jaanson (11. kl, Pärnu Koidula Gümnn), Gerli Viikmaa (12. kl, Pärnu Koidula Gümnn), Sander Siim (11. kl, Vanalinna Hariduskollegium), Kert Pütsepp (11. kl, Tallinna Reaalkool), Ivar Kiitam (11. kl, Tallinna Reaalkool), Erik Tamre (10. kl, Tal-



- linna Reaalkool), Kaur Aare Saar (9. kl, Tallinna Inglise Kolledž), Uku-Kaspar Uustalu (8. kl, Tallinna Reaalkool);
- \* MTÜ Loodusajakiri eriauhind – Sandra Schumann (9. kl, Tallinna Reaalkool), Sille Habakukk (9. kl, C. R. Jakobsoni nim Gümnn);
  - \* Ajakirja Tarkade Klubi eriauhind – Kadi Liis Saar (11. kl, Tallinna Reaalkool).
- VI Žürii avaldab tänu õpetajatele õpilaste hea ettevalmistamise eest.
  - VII Vastavalt olümpiaadi statuudile arvata Eesti võistkonna liikmeks rahvusvahelisel füüsikaolümpiaadil Ants Remm (11. kl, Hugo Treffneri Gümnn).
  - VIII Nimetada rahvusvahelise füüsikaolümpiaadi Eesti võistkonna kandidaatideks Gerli Viikmaa (12. kl, Pärnu Koidula Gümnn), Roland Matt (12. kl, Hugo Treffneri Gümnn), Chris Reintal (12. kl, Tallinna Reaalkool), Mario Reiman (12. kl, Nõo Reaalgümnn), Rauno Siinmaa (12. kl, Pärnu Koidula Gümnn), Ardo Kaurit (12. kl, Gustav Adolfi Gümnn), Madis Ollikainen (11. kl, Gustav Adolfi Gümnn), Siim Liiser (11. kl, Tallinna Reaalkool), Kadi Liis Saar (11. kl, Tallinna Reaalkool), Andres Jaanson (11. kl, Pärnu Koidula Gümnn), Sander Siim (11. kl, Vanalinna Hariduskolleegium), Kert Pütsepp (11. kl, Tallinna Reaalkool), Ivar Kiitam (11. kl, Tallinna Reaalkool), Eero Vaher (11. kl, Pärnu Koidula Gümnn), Siim-Erik Paju (11. kl, C. R. Jakobsoni nim Gümnn), Kristian Kuppert (11. kl, Vanalinna Hariduskolleegium), Janno Jõulu (11. kl, Tallinna Reaalkool), Erik Tamre (10. kl, Tallinna Reaalkool), Sergei Jakovlev (10. kl, Tartu Vene Lütseum), Tanel Kiis (10. kl, C. R. Jakobsoni nim Gümnn), Sandra Schumann (9. kl, Tallinna Reaalkool), Jaan Toots (9. kl, Tallinna Tehnikagümnn).

Jaak Kikas, füüsikaolümpiaadi žürii esimees  
Tartus, 7. märtsil 2010. a.

- 7. märtsil toimus TÜ Teaduskoolis VI astronoomia lahtine võistlus, millest võttis osa 27 õpilast. Nooremas rühmas sai I koha Uku-Kaspar Uustalu, II koha Kaarel Allemann ja III koha Robin Reino (kõik kolm Tallinna Reaalkoolist). Vanemas rühmas sai I koha Jaan Toots (Tallinna Tehnikagümnn), II koha Eero Vaher (Pärnu Koidula Gümnn) ja III koha Kaur Aare Saar (Tallinna Inglise Kolledž).

- 18. märtsil näidati TÜ keemiaringis dokumentaal- ja väärtfilmiõhtute sarjas „OoofilmiõhtuooO“ filmi „Stephen Hawking and The Theory of Everything“ (2007). Filmiga seotud teemadel rääkis TÜ Füüsika Instituudi vanemteadur Laur Järv.
- 16. apr toimus TÜ füüsikahoones (Tähe 4) akadeemiline füüsikaolümpiaad 2010. Lahendati teoreetilist laadi ülesandeid ülikooli üldfüüsika programmi teemadel, osales 10 võistlejat. Parimateks osutusid Siim Ainsaar (36 punkti 88-st võimalikust), Andreas Valdmann (29 punkti) ja Kaarel Piip (20,5 punkti). Tubli esinemise eest tõstis žürii esile veel Taavi Pungast (15,5 punkti) ja Jakob Jõge (15 punkti).
- 7.-8. jaan toimus Tartu Kivilinna Gümnaasiumis ja Tallinna Reaalkoolis kolmas koolirobootika võistlus „RoboMiku“. Võistlust korraldavad MTÜ Robootika, Tallinna Reaalkool, Tartu Kivilinna Gümnaasium ning Pärnu Ühisgümnaasium. Konkursi käigus ehitasid kuni kaheliikmelised õpilasvõistkonnad LEGO NXT Mindstorms komplektide baasil roboti, seekord võistlesid robotid jalgpallimängus. Vt [www.robootika.ee](http://www.robootika.ee).
- 11.-17. apr toimus Rootsis, Göteborgis Euroopa Liidu loodusteaduste olümpiaad (EUSO) kuni 16 aastatele õpilastele. Seekord oli osalemas 21 Euroopa Liidu liikmesriigi õpilasi, igast riigist kaks 3-liikmelist võistkonda. Eesti A võistkond (Eva-Lotta Käsper Hugo Treffneri Gümnaasiumist, Erik Tamre Tallinna Reaalkoolist ja Rene Lomp Tallinna Liivalaia Gümnaasiumist) sai üldarvestuses 7. koha ja kuldmedalid. Eesti B võistkond (Anu Ainsaar, Ralf Ahi ja Taivo Pungas Tallinna Reaalkoolist) sai 10. koha ja hõbemedalid. Eesti võistkonna koordinaator oli TÜ lektor Karin Hellat. Eesti õpilaste osalemist rahvusvahelistel olümpiaadidel koordineerib TÜ Teaduskool ning finantseerib Haridus- ja Teadusministeerium.
- 16. apr algas Tallinna Reaalkoolis kahepäevane Õpilaste Teadusliku Ühingu 6. aastakonverents, mis tutvustas parimaid õpilaste kirjutatud uurimistöid ning viis teadushuvilised õpilased kokku tegevteadlastega. Konverentsile olid kutsutud kõik 2010. aasta õpilaste teadustööde riiklikul konkursil osalenud noored ja nende juhendajad, teadustööde konkursil osalenud õpilased tutvustasid oma uurimistöid. Laupäeval plenaarsessioonil esines füüsik Mait Müntel. Konverents lõppes 17. aprillil 2010. aasta õpilaste teadustööde riikliku konkursi parimate autasustamisega.
- 26.-28. apr toimus Tallinna Tehnikaülikoolis TÜ Teaduskooli korraldatud VIII Eesti-Soome maavõistlus füüsikas. Mõlema riigi parimaid

füüsikaülesannete lahendajaid oli kokku 32. Võitjaks tuli Ants Remm (Hugo Treffneri Gümnaasium, 11. kl), kes sai peaauhinna – Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi uurimisspendiumi. Lisaks temale sai I järgu diplomi Roland Matt (Hugo Treffneri Gümnaasium, 12. kl).

- 11. juunil toimus füüsika riigeksam. Füüsikaeksami olid valinud 717 õppurit, keskmine saadud punktide arv oli 63,9; 87 eksamitööd sai üle 90 punkti 100st.
- 28. juunist 2. juulini korraldas Tartu Ülikooli loodusteadusliku hariduse keskus kolmanda loodusteadusliku ja tehnoloogiaalase hariduse maailmakonverentsi *World Conference on Science and Technology Education*, kus osales ligi 200 valdkonna spetsialisti 40 riigist. Konverentsi peateemaks oli loodusteaduste- ja tehnoloogiaalane kirjaoskus. Kuulati enam kui kümnet rahvusvaheliselt tuntud teadlaste ja tippspetsialistide üldettekannet õpetamisest loodus- ja tehnoloogia valdkonnas. Lisaks oli kavas mitukümmend ettekannet temaatilistel sessioonidel ja toimusid töötoad õppetöö kaasajastamise ja õpilaste õpimotivatsiooni tõstmise võimaluste teemal. Konverentsi peakorraldajaks oli Tartu Ülikooli LOTE loodusteadusliku hariduse keskus koostöös Rahvusvahelise Loodusteadusliku Hariduse Assotsiatsioonide Liidu (ICASE), Tallinna Ülikooli, Tallinna Tehnikaülikooli ja Eesti loodusainete õpetajate liitudega. Lisainfo [icase2010.org](http://icase2010.org) ja [www.ut.ee/820267](http://www.ut.ee/820267).
- 28.–30. juunini toimus Tartus, Kohtla-Järvel ja Sillamäel füüsikaõpetajate suvekool 2010: „Füüsika seosed keemiaga – mõõtmised ja tehnoloogia“. Kolme päeva jooksul peeti 6 ettekannet ja osaleti laboratoorses töödes, külastati TTÜ Virumaa Kolledžit, Silmetit ja Sillamäe sadamat.
- 12.–18. juulini toimus Kloogarannal TÜ ja EFS korraldusel 6.–7. klasside õpilastele teaduslaager. Kavas olid töötoad füüsika, materjaliteaduse, robotika, keskkonna, raketiteaduse jt aladelt. Laagri vanem oli Kaido Reivelt.
- 17.–25. juulini toimus Horvaatias Zagrebis 41. rahvusvaheline füüsikaolümpiaad, kus osales 367 õpilast 79 riigist. Eesti meeskonda kuulusid õpilased Kert Pütsepp (Tallinna Reaalkool), Ants Remm (Hugo Treffneri Gümnaasium), Jaan Toots (Tallinna Tehnikagümnaasium), Roland Matt (Hugo Treffneri Gümnaasium), Erik Tamre (Tallinna Reaalkool) ning juhendajad Jaak Kikas (Tartu Ülikool) ja Jaan Kalda (Tallinna Tehnikaülikool). Eesti sai ühe hõbemedali (Ants Remm,

88. koht); kaks pronksmedalit (Jaan Toots, 149. koht; Erik Tamre 171. koht) ja kaks aukirja (Roland Matt, 199. koht; Kert Pütsepp, 214. koht).
- 11.–15. aug toimus Tihemetsas Eesti astronoomiahuviliste XV kokkutulek, mille juhtteemaks oli „Multiversumid“. Vt [www.astronoomia.ee/kokkutulekud](http://www.astronoomia.ee/kokkutulekud).
  - 24. sept korraldas Teaduskeskus AHHAА koos Eesti Teaduste Akadeemia ja Eesti Rahvusringhäälinguga järjekordse Teadlaste Öö (vt [www.ahhaa.ee/TeadlasteOo2010](http://www.ahhaa.ee/TeadlasteOo2010)). Tegemist oli üleeuroopalise projekti *Researchers' Night 2010* alamprojektiga, mida rahastas Euroopa Komisjon. Teadlaste Öö raames külastas Tartu Observatooriumi Tõraveres umbes 500 inimest, kes käisid vaatamas planeet Jupiteri ning teisi huvitavaid taevaseid objekte. Kasutuses oli neli teleskoopi: 1,5m suur teleskoop, MEADE teleskoop ja kaks Galileoskoopi. Vaatlusõhtu korraldati ka Tartus Toomemäel toomkiriku tornis. TÜ Pärnu Kolledžis pandi üles AHHAА-keskuse Starlab-planetaarium. Tallinnas korraldati AHHAА keskuses Päikesesüsteemi töötuba ja astronoomiateemaline orienteerumismäng vanalinnas.
  - 25.–26. sept toimus Tartus Tähe tänava füüsikahoones teadushariduslik kogupereüritus Tähe Perepäevad ehk TäPe 2010, seekord pühendatuna teadusteatrile. Esitati kõiki Teadusbussi repertuaaris olevaid kavasid ja teadusetendust „Down with Gravity“. Esinesid Koit Timpmann ja Henn Voolaid. TäPet korraldavad Tartu Ülikooli loodus- ja tehnoloogiateaduskonna tudengid.
  - 16.–24. okt toimus Krimmis, Sudaki linnas XV rahvusvaheline astronoomiaolümpiaad. Eesti võistkond osales kuuendat korda. Vanema vanuserühma hõbemedali võitis Jaan Toots Tallinna Reaalkoolist. Kolm meie õpilast said pronksmedalid: Kaur Aare Saar (Tallinna Inglise Kolledž), Eva-Lotta Käsper (Hugo Treffneri Gümni) ja Sandra Schumann (Tallinna Reaalkool). Võistkonda kuulus veel Raid Vellerind Tallinna Reaalkoolist. Võistkonna juhendajateks olid Jaak Jaaniste Maaülikoolist ja Tõnis Eenmäe Tartu Ülikoolist.
  - 2.–11. dets toimus Nigeerias, Abujas seitsmes rahvusvaheline noorte loodusteadlaste olümpiaad (IJSO), millest võtsid osa 35 riigi õpilased. Eesti võistkond naases kolme pronksmedaliga. Pronksmedalid pälvisid Mette Purde Tallinna Prantsuse Lütseumist, Uku-Kaspar Uustalu Tallinna Reaalkoolist ja Timothy Tamm Gustav Adolfi Gümnaasiumist. Juhendajatena olid õpilastega kaasas Ülle Kikas, Rudolf Bichele ja Karin Hellat.

- 3.–4. dets toimus TTÜ Spordihoones traditsiooniline robotivõistlus Robotex, ka sel aastal võistlesid robotid jalgpallis. Esikoha sai põhi-grupis „Pro“ Eesti Infotehnoloogia Kolledži võistkonna robot Neve, avatud grupis Tartu Ülikooli/Tallinna Tehnikakõrgkooli võistkonna robot Goblin. Koos robotivõistlusega toimusid ka tehnikamess, töötoad, joonistuskonkurss ja näitused.
- 22. dets andsid ehitajad Tartu Ülikoolile üle vastremonditud Tähetorni võtmed. Päev oli sümboolne, kuna täpselt 200 aastat tagasi toimus samasugune võtmete üleandmine.
- Detsembris ilmusid Tähetorni Kalender 2011 (87. aastakäik) ja Tähis-taeva Kalender 2011.
- Tähetorni ringi koosolekud toimusid iga kuu (v.a suvekuud) esime-sel, kolmandal ja viiendal teisipäeval kell 17:30 Toomemäel TÜ Ajaloo Muuseumi konverentsisaalis.
- Tartu Observatooriumi külastas aasta jooksul 257 ekskursioonigruppi rohkem kui 6300 huviliselega.
- Avalikke vaatlusõhtuid korraldati kogu aasta vältel nii Tõraveres kui ka Tartus Toomemäel TÜ Ajaloo Muuseumi (Toomkiriku) tornis.
- Eelmisel, rahvusvahelisel astronoomia aastal komplekteeritud astro-noomialaste piltide näitust ning kooliõpilaste arvutijoonistuste võist-luse „Uudista universumit“ parimaid pilte eksponeeriti aasta jooksul paljudes kohtades üle vabariigi.
- Astronoomia populariseerimise alal tegutses aktiivselt portaal www.astronoomia.ee, mille raames jätkas ilmumist ka traditsiooniline vee-biajakiri „Vaatleja“.
- Energia avastuskeskus Tallinnas korraldas kevadise koolivaheaja pere-nädala ja uue maja arhitektuurivõistluse, toimusid interaktiivsed näi-tused, planetaariumi ja teadusteatri etendused. Vt energiakeskus.ee.
- Eesti Füüsika Seltsi, TÜ loodus- ja tehnoloogiateaduskonna ja TÜ Teaduskooli koostöös käivitus õpikodade programm, kus pakutakse füüsika, keemia ja bioloogia lisaõpet andekatele ja/või motiveeritud põhikooli- ja gümnaasiumiõpilastele ja kus rõhk on eelkõige eksper-iimentidel ja laboratoorsetel töödel. Õpikojad toimuvad regulaarselt, üks kord kuus à 4 tundi rühmadena õpikodade programmi tugikooli-des üle kogu Eesti. Projekti juhib Kaido Reivelt (TÜ FI).
- EFS-i teadusbussi „Suur Vanker“ reisirid toimusid 2010 aastal ligikau-du 70-sse üldhariduskooli. Aasta alguses lisandusid kaks uut tea-dusteatri kava: kosmose- ja tuleetendus. Lisaks osales teadusbuss

mitmetel haridusalastel messidel: Intellektika, Suunaja, Tiigrihüppe ideelaat, Teeviit jt. Sügissemestril viidi läbi Taavi Adambergi eestvedamisel teaduse populariseerimisse sissejuhatav seminar ([www.teadusbuss.ee/seminar](http://www.teadusbuss.ee/seminar)), mille tulemusena EFS-i tegemistega liitus ca 25 uut tudengit. Teadusbussi tegevus jätkub 2011. aastal taaskord kahe uue kavaga. Teadusbussi tegevust tutvustati ka Rootsi kolleegidele ettekandega *Fysikdagarna 2010* konverentsil Karlstadis. Teadusbuss on nähtav veebis [www.teadusbuss.ee](http://www.teadusbuss.ee) ja suhtlusportaalis Facebook: [www.facebook.com/teadusbuss](http://www.facebook.com/teadusbuss).

- Tarkade Klubi teaduskohvikus vesteldi füüsikaga seotud teemadel:
  - jaanuaris – „Tuleviku tähelaevad“,
  - märtsis – „Mis selle kliimaga siis on?“,
  - aprillis – „Maaväline elu ja SETI programm“,
  - septembris – „Millest teadlased unistavad?“Teaduskohvikute ettekandeid ja arutelusid saab järelkuulata veebilehel [www.t-klubi.ee](http://www.t-klubi.ee).

Kroonika koostasid Helle Kaasik (TÜ FI), Anna Aret (TO) ja Piret Kuusk (TÜ FI). Andmeid andsid Kersti Roosimäe (TÜ õppeosakond), Henn Voolaid (TÜ koolifüüsika keskus), Maarja Grossberg (TTÜ) ja Tõnu Laas (TLÜ). Andmed ETF uurimistoetuste kohta pärinevad ETISest ([www.etis.ee](http://www.etis.ee)). Andmed sihtfinantseeritavate teadusteemade kohta pärinevad ETISest ja Haridus- ja Teadusministeeriumi koduleheküljelt [www.hm.ee](http://www.hm.ee). Kasutatud on ka veebilehti [www.ahhaa.ee](http://www.ahhaa.ee), [www.akadeemia.ee](http://www.akadeemia.ee), [www.archimedes.ee](http://www.archimedes.ee), [www.energiakeskus.ee](http://www.energiakeskus.ee), [www.fyysika.ee](http://www.fyysika.ee), [www.astronoomia.ee](http://www.astronoomia.ee), [www.robotex.ee](http://www.robotex.ee), [www.ttkool.ut.ee](http://www.ttkool.ut.ee), [www.ut.ee](http://www.ut.ee) jt. Kroonikat täiendasid Vambola Kisand, Andi Hektor, Peeter Saari, Jüri Engelbrecht, Kaido Reivelt, Tarmo Soomere, Indrek Jõgi, Aarne Kasikov, Riina Murulaid, Aile Tamm, Piia Post, Heli Lukner, Taavi Adamberg ja Urmas Hörrak.

## SUMMARY

The XXI Annual of the Estonian Physical Society (EFS) begins with a review of the problem of mass in the physics of elementary particles by Ilmar Ots, Stefan Groote and Rein Saar.

The second part of the Annual contains the programme of the 40th Estonian Days of Physics (Tartu, March 22–23, 2010) and the report of the laureate of the EFS Annual Prize 2010 Dr. Toomas Rõõm on investigations using THz spectrometry in the National Institute of Chemical and Biological Physics.

In the third part of the Annual, the programme of the 41<sup>st</sup> Estonian Days of Physics, to be held on 22<sup>nd</sup> and 23<sup>rd</sup> March 2011, is published, together with two reports: a review of work on econophysics in Estonia by Marco Patriarca, Els Heinsalu, Robert Kitt, and Jaan Kalda, and a proposal to derive the Big Bang cosmology from a mathematical model of chaotic strings by Stefan Groote.

In the Estonian Physical Society's section, official documents of the Society are presented. The EFS Annual Prize and the Medal of the Society 2010 were given to Dr. Toomas Rõõm and the working group of THz and low temperature physics of the National Institute of Chemical and Biological Physics. The Student Prize 2009 was granted to Martin Timusk. The Honorary Citations winners were Jaak Jõgi, Kalev Tarkpea and Riina Leet. The High School Student Award was granted to the student of the Rakvere Gymnasium (Rakvere Realgümnaasium) Agne Jõgis, whose work was completed under supervision of her teacher Kadri-Ly Trahv. The Society section includes also the Annual Report for the year 2010, and the list of Board members and new members of the Society. At the end of the section, the programmes of the Young Physicists' Summer School and of the Autumn School, and Summer Workshop of Physics Teachers for the year 2010 can be found.

The last section of the Annual contains the physics chronicle of 2010.

## RAAMATUS KASUTATUD LÜHENDID

AÜ	Avatud Ülikool
CERN	Euroopa tuumauuringute keskus ( <i>Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire</i> )
STACC	Tarkvara Tehnoloogia Arenduskeskus ( <i>Software Technology and Applications Competence Centre</i> )
EMÜ	Eesti Maaülikool
ESA	Euroopa Kosmoseagentuur ( <i>European Space Agency</i> )
ETF	Eesti Teadusfond
ETIS	Eesti Teadusinfosüsteem
FMTDK	TÜ ja TTÜ doktorikool „Funktsionaalsed materjalid ja tehnoloogiad“
HTM	Haridus- ja Teadusministeerium
IAEA	Rahvusvaheline Aatomienergiaagentuur ( <i>International Atomic Energy Agency</i> )
KBFI	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut
MSU	Montana Riiklik Ülikool ( <i>Montana State University</i> )
TLÜ	Tallinna Ülikool
TLÜ MLI	TLÜ Matemaatika ja Loodusteaduste Instituut
TO	Tartu Observatoorium
TTÜ	Tallinna Tehnikaülikool
TTÜ Kübi	TTÜ Küberneetika Instituut
TÜ	Tartu Ülikool
TÜ FI	TÜ Füüsika Instituut
TÜ KI	TÜ Keemia Instituut
TÜ LOTE	TÜ loodus- ja tehnoloogiateaduskond
TÜ MRI	TÜ Molekulaar- ja Rakubioloogia Instituut
TÜ ÖMI	TÜ Ökoloogia ja Maateaduste Instituut