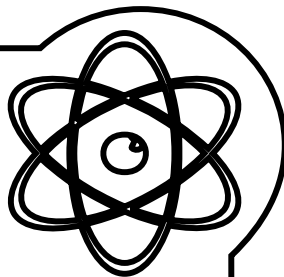


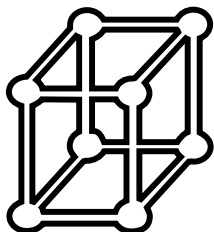
EESTI FÜÜSIKA SELTS



**EESTI
FÜÜSIKA SELTSI
AASTARAAMAT**

2008

**XIX
aastakäik**



TARTU 2009

Toimetanud: Anna Aret, Helle Kaasik, Piret Kuusk

Kujundanud ja küljendanud: OÜ Intelligent Design / Atko Rimmel

Autoriõigus Eesti Füüsika Selts 2009

ISSN 1406-0574

SAATEKS

2008. aasta tõi kaasa rõõmustavalt palju väitekirjade kaitsmisi – Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi nõukogus oli neid koguni 11, lisaks veel 3 füüsika alal kaitsstud väitekirja Tallinna Tehnikaülikoolis. Ehk andis selleks oma panuse ka Euroopa Sotsiaalfondi toetusel aastail 2004–2008 toimunud TÜ materjaliteaduse ja materjalide tehnoloogia doktorikool, mille raames pakutud võimalusi sai kasutada 50 füüsika- ja keemiaosakonna tudengit. Jah, kui vaadata ajas tagasi, siis rohkem kaitsmisi oli siin vaid vabanemise aastal 1991, kui TÜ füüsikaosakonna vastloodud kolm doktorinõukogu (füüsika, geofüüsika ja astronoomia erialal) tunnistasid uue doktorikraadi (PhD) vääriliseks koguni 15 dissertanti.

Aastaraamatu avaartiklis räägivad Ilmar Ots ja Hannes Liivat 2008. a Nobeli füüsikapreemiast. Kuid laureaatide Yoichiro Nambu, Makoto Kobayashi ja Toshihide Maskawa tööde arusaadavaks esitamiseks on vaja rääkida ka elementaarosakeste Standardmudelist üldse ja eriti selle kujunemisest, sest premeeritud tööd on üsna vanad, publitseeritud 1960–70ndatel aastatel. Tegelikult on nad Standardmudeli eakaaslased ja nende autorid kuuluvad kindlasti Standardmudeli ehitajate hulka.

Veebruaris pühitses oma 80. sünnipäeva Eesti TA akadeemik prof Tšeslav Luštšik, kes on töötanud TÜ Füüsika Instituudis (ja selle eelkäijates) alates 1954. aastast kuni tänaseni. Tema elu ja tööd tutvustab Henn Käämbre.

Eesti XXXVIII füüsikapäevadel ja XXX füüsikaõpetajate päevadel 18.–19. märtsil 2008 Tartus esinenutest kirjutasid oma ettekanded artikliteks Hilja Iher (Eesti õhu kompleksuuringud Tahkuse õhuseirejaamas), Peeter Saari (Iseenesest kiirenevad laineimpulsid) ja Jaak Kikas (Tõrts torujuttu). Eesti XXXIX füüsikapäevadel 17.–18. märtsil 2009 tulevad ettekandmisele Marko Kaasiku artikkel „Keemilise ilma mudelid ja prognoos“ ning Svetlana Ganina ja Henn Voolaiu artikkel „Hajusandmetega ülesannete lahendamise mõju füüsikaõppe efektiivsusele“.

Aastaraamatu lõpetavad Eesti Füüsika Seltsi rubriik ja 2008. a füüsikakroonika.

Piret Kuusk,
toimetaja

SISUKORD

Ilmar Ots, Hannes Liivat	
Elementaarosakeste Standardmudeli ehitajad	6
Henn Käämbre	
Tšeslav Luštšik – 80	48
XXXVIII EESTI FÜÜSIKAPÄEVAD	51
Kava	52
Hilja Iher	
Õhu kompleksuuringud Tahkuse õhuseirejaamas	55
Peeter Saari	
Iseenesest kiirenevad laineimpulsid	67
Jaak Kikas	
Törts torujuttu	77
XXXIX EESTI FÜÜSIKAPÄEVAD	87
Kava	88
Marko Kaasik, Mikhail Sofiev, Marje Prank, Mirjam Paales	
Keemilise ilma mudelid ja prognoos	91
Svetlana Ganina, Henn Voolaid	
Hajusandmetega ülesannete lahendamise mõju füüsikaõppe efektiivsusele	108
Ettekannete sisukokkuvõtted	115
EESTI FÜÜSIKA SELTS 2008	131
EFS aastapreemia 2008	132
EFS auliikme tunnistus	132
EFS aukiri 2008	133
EFS õpilaspreeemia 2008	133
Tänukiri	133
Muudatused EFS põhikirjas	134
Eesti Füüsika Seltsi juhatuse 2008. aasta tegevusaruanne	134
Aasta pilt 2008	137
EFS laiendatud juhatuse 2008. aastal	139
EFS V füüsikaõpetajate suvekool	140

EFS täppisteaduste suvekool	141
EFS täppisteaduste sügiskool	142
FÜÜSIKAKROONIKA	143
Töökorraldus	144
Väitekirjade kaitsmine	146
Õppetöö	150
Teadusüritused Eestis	155
Teadustöö	160
Raamatud ja kogumikud	168
In memoriam	169
Füüsikahariduslik tegevus	172
 Raamatus kasutatud lühendid	 183
 SUMMARY	 184

ELEMENTAAROSAKESTE STANDARDMUDELI EHITAJAD

**2008. AASTA NOBELI FÜÜSIKAPREEMIA
ELEMENTAAROSAKESTE FÜÜSIKA TEOREETIKUTELE**

ILMAR OTS, HANNES LIIVAT
TÜ Füüsika Instituut

*Uurimistöö on näha,
mida enne on nähtud,
ja mõelda,
nagu enne pole mõeldud*

Albert Szent-Györgyi

SISSEJUHATUS

2008. a Nobeli füüsikapreemia anti jälle elementaarosakeste füüsika teoreetikutele, seekord kolmele jaapanlasele. Pool preemiast sai Jaapanis sündinud, kuid Ameerika Ühendriikidesse siirdunud ja selle maa kodakondsuse saanud Yoichiro Nambu, ülejäänud pool jagati võrdselt oma sünnimaal töötavate Makoto Kobayashi ja Toshihide Maskawa vahel. Lähiminevikus on elementaarosakeste teoreetikutest Nobeli preemia saanud David Gross, David Politzer ja Frank Wilczek (2004) ning Gerar-

dus t'Hooft ja Martinus Veltman (1999). Kõik need kolm preemiat määrati uurijatele nende oluliste panuste eest elementaarosakeste füüsika teoreetilise mudeli – Standardmudeli – loomisse. Et Standardmudel sai oma praeguse ni säilinud näo juba läinud sajandi seitsmekümnendate algaastatel, peame järjekordselt tõdema, et Nobeli füüsikapreemia antakse reeglina aastakümnete taguste tegemiste eest. Üheks põhjuseks on kahtlemata asjaolu, et tehtu tähtsust ei suudeta tema lähitulevikus õigesti hinnata. Panuse tähtsus selgub alles aastate möödudes. Meenub kuskilt loetu, kuidas keegi professor näitas, kas oma juhendatavale või kellelegi teisele noorteadlasele, äsja ajakirjas “Physical Review Letters” ilmunud šoti teadlase Peter Higgsi tööd – vaadaku, et kirjutatakse ka nii mõttetuid, mitte kusagil edaspidi vajalikke töid. Vähem kui kümne aasta pärast sai selles töös käsitletud osakestele masse tekitav, nüüd juba Higgsi nime kandev mehhanism üheks Standardmudeli nurgakiviks. Higgsi pole selle eest senini küll veel Nobeli loorberitega pärjatud, aga see võib veel sündida, kui senini palju tagasilööke saanud Suur Hadronite Põrguti (Large Hadron Collider) Euroopa elementaarosakeste uurimiskeskuses CERN-is korralikult tööle saadakse ja tema katsetes Higgsi mehhanismi asjaosaline – Higgsi boson – avastatakse. Muidugi on pikast viivitusest ka erandeid, kus teadlastele „tulemustasu“ kiiresti pihku pistetakse. Läinud sajandi viiekümnendate aastate keskpaiku näitasid Ühendriikide teooriafüüsikud Tsung Dao Lee ja Cheng Ning Yang, et üks ruumipeegeldusega seotud mikromaailma füüsikas defineeritud suurus – paarsus – ei ole nõrga vastastikmõju protsessides jääv suurus. Nende töö publitseeriti 1956. aastal ja juba järgmisel aastal said nad Nobeli preemia laureaatideks. Hiina rahvusest laureaadid olid tollal veel väga noored uurijad ja paistsid oma niigi nappidest aastatest veelgi noorematena. Kui ajakirjanik läks neist ühe juurde koju teda Nobeli preemia saamise puhul intervjuuerima ja värske laureaat ukse avas, küsis ajakirjanik: „Kas isa on kodus?“ Uksel seisev poisiohtu noormees ei saanud ju olla Nobeli preemia laureaat. Sama kiirelt suutis Rootsi Kuninglik Akadeemia hinnata ka eksperimentaalfüüsikute Carlo Rubbia ja Simon van der Meeri panuseid osakestefüüsikasse. Need teadlased avastasid 1983. aastal CERN-i prootoni-antiprootoni põrguti protsessides teoorias juba üle kümne aasta tagasi ennustatud nõrga jõu¹ kandjad W^\pm - ja Z -bosonid. Järgmisel aastal võisid nad juba Nobeli preemia rahasid kasutada. Aga see „kiirmeetod“ osakestefüüsikute pärgamisel on jäänud ka viimaseks. Pärast seda pole Nobeli preemiatele vastavaid

1 Kasutame lühikest terminit „jõud“ kvantteooriate termini „vastastikmõju“ tähenduses.

väärilisi töid määrajatel lähiminevikust võtta olnud ja paratamatult on neid otsitud kaugemast või isegi ülikaugest möödanikest. Miks see nii on olnud, selle üle diskuteerimine vajab omaette artiklit. Üht põhjustest tuleb aga kindlasti otsida asjaolust, et viimastel aegadel on eksperiment teooriale jalgu jäänud. Teoreetikud on tootnud hulgaliselt elementaarosakeste füüsika paljusid probleeme lahendada töotavaid mudeleid, kuid neid ei saa katses kontrollida. Senistel osakestepõrgutitel saavutatav energia ei ole selleks piisav. Teadlased loodavad, et asja lahendab eelpool mainitud Suur Hadronite Põrguti. Kui teoreetikute kontseptsioonid katselisi kinnitusi saavad, tulevad ka lähemas minevikus tehtu eest Nobeli preemiad. Aga praegu seisame fakti ees, et kõik 2008. aasta füüsikapreemia saajad on juba emeritprofessorid ja mõned nende olulised tulemused, mida premeerimisel arvesse võeti, ilmusid juba pool sajandit tagasi. Ja polnuks ime, kui mingi ajakirjanik oleks läinud üht värsket Nobeli laureaati tema kodus usutlema ja talle ukse avanud peagi 88-aastasest Yoichiro Nambut nähes küsinud: „Kas poeg on kodus?“

Räägime nüüd veidi täpsemalt ainevallast, mida tänased laureaadid uurisid, millesse oma panuse andsid ja mille eest Nobeli preemia said. Periood, mille jooksul kirjutati preemiat väärivad tööd, hõlmab ajavahemiku läinud sajandi viiekümnendate lõpuaastast kuni seitsmekümnendate algusaastateni. Vastupidiselt praegusele ajale ja eelnevale paarikümneaastasele lähiminevikule oli see aeg, kus eksperiment õitses. Ehitati ja pandi tööle üha kõrgema energiaga osakesi tootvaid kiirendeid. Uusi ja üllatavaid avastusi tuli ridamisi. Teoorial oli esialgu nende kohta vähe öelda. Osakesefüüsika aluseks olev kvantväljateooria, mis toetub kahele kahekümneenda sajandi suurteooriale – kvantmehhaanikale ja erirelatiivsusteooriale –, langes ebasoosingusse. Näis, et kahe suurteooria läbisaamine kvantväljateoorias ei võimalda eksperimentitulemusi hinnata. Hakati otsima pragmaatilisemaid teooriad. Elementaarosakeste vaheliste protsesside kirjeldamisel kasutatud suuruste funktsionaalne kuju, mida kvantväljateoorias arvutati, anti siin lihtsalt ette. Peamine nõue oli nende analüütilisus. Lisaks nõuti unitaarsust ja teatud sümmeetriaomadusi. Analüütilise teooria arendamine andis küll suure panuse analüütiliste funktsioonide kasutamisse füüsikas, kuid ei viinud edasi nende probleemide lahendamisel, millega kvantväljateooriad näisid olevat jänni jäänud.

Kuigi ühendriiklased Murray Gell-Mann ja George Zweig olid üksteisest sõltumatult püstitanud tugeva jõu osakeste, hadronite (prooton, neutron, piion, kaaon jt) kvarkmudeli [1,2], ei usutud, et kvargid on reaalsed.

sed. Sest kui hadronid tõesti koosneuks kvarkidest, saanuks viimaseid ka hadronitest välja lüüa, umbes nagu nukleone aatomituumadest. Aga hadronite pommitamine kõrge energiaga osakestega andis lõpptulemusena jälle vaid hadroneid. Tekkis teooria, kus hadroneid peeti tõeliselt elementaarseteks osakesteks, mis on üksteise seotud seisundid. See Saapaluku (*Bootstrap*) mudeliks nimetatud teooria oli omal ajal väga populaarne, sadade teaduspublikatsioonide sisuks. Aga teadust viis ta vähe edasi. Tuleb au anda nendele uurijatele, kes kvantväljateooriale tema rasketel aegadel truuks jäid. Nende hulgas olid ka tänased nobelistid. Just kvantväljateoreetiliste mudelite arendamine viis Standardmudelini, mis lepitas kvantmehhaanika ja relatiivsusteooria ning oli harmoonias katsega. Seda on ta ka praegu, ühe erandiga, mis seotud neutriino massiga.

KVANTELEKTRODÜNAAMIKA RENORMEERIMINE

Teeme nüüd väikese ekskursiooni elementaarosakeste füüsikasse, õigemini selle ajalukku. Näitame kvantteoorias ette tulevaid näivaid vastuolusid ja paradokse kõikide elementaarosakeste vaheliste jõudude – elektromagnetilise, nõrga ja tugeva jõu – kirjeldamisel ja nendest ülesaamisel. Kõik vastuolud ja paradoksid on just nimelt näivad. Nad sünnivad meie peades, kui kohtame meie senistele arusaamadele ja kogemustele võõraid, isegi veidraid nähtusi. Loodus ise on harmooniline, vastuoludeta. Alustame tuntuimast teoriast – kvantelektrodünaamikast. Relatiivsusteoorias on osakese energia tema seisenergia ja liikumisenergia summa. Energia on siin jääv suurus. Aga kvantteooria lubab lühikese aja jooksul energia fluktuereerimist. Selline luba relativistlikus teoorias tuleb määramatuse seosest energia ja aja vahel²

$$\Delta E \Delta t = \hbar, \quad (1)$$

mis täiendab mitterelativistliku kvantmehhaanika Heisenbergi määramatust asukoha ja impulsi vahel ($\Delta x \Delta p = \hbar$). Tänu sellele võivad laetud osakesed eirata lühikeseks ajaks energia jäävust ja „laenata“ vaakumile virtuaalseid osakesi, laengu jäävuse nõudest tingituna kas laenguta osakesi või osakeste-antiosakeste paare. „Laenu“ peab küll kiiresti tagasi võtma, aga et laenu andmise ja tagastamise aktid toimuvad pidevalt, te-

² Kasutame määramatuse seostes piirjuhte.

kib osakese ümber virtuaalosakeste pilv. Vaakum muutub dünaamiliseks, vastastikmõjustuvaks keskkonnaks. Kui nüüd arvutada, kuivõrd mõjutavad vastastikmõjud virtuaalosakestega reaalse osakeste ja nendevaheliste jõudude omadusi, selgub kurb tõsiasi: vastastikmõju virtuaalosakestega muudab osa suurusi hajuvateks, st lõpmatuse pürgivateks.

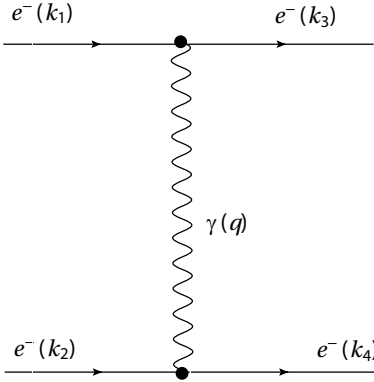
Selge, et katselist kontrolli lubav teooria peab lõpmatustest lahti saama või vähemalt kõrvaldama nende mõju katsetulemustele. Selgub, et kvantelektrodünaamikas on selline protseduur olemas. Seda kutsutakse renormeerimiseks. Renormeerimine on võimalik seetõttu, et lõpmatused on siin seotud vaid teooria nn vabade parameetritega, mille väärtused on võetud katsest – elektrilaenguga ja massiga. Kui arvutada virtuaalosakeste mõju laengule ja massile, saadakse nende jaoks formaalsed avaldised, mis sisaldavad ka lõpmatuid liikmeid. Nendele avaldistele seatakse vastavusse katsest saadud laengu ja massi lõplikud väärtused. Nimetatud suurused on sellise protseduuriga ümber normeeritud (sellest ka protseduuri nimi) ja sellega lõpmatused „kaotatud“.

Paljudele, isegi renormeerimisteooria ühele loojatest, Richard Feynmanile, ei pakkunud selline trikk täit rahuldust. Tõsi, see näib toa koristamisena tolmu ja prügi vaipade alla pühkimise teel. Aga ka see ju toimib: külalistele paistavad ruumid puhtad olevat. Nii toimib renormeerimine ka kvantelektrodünaamikas. Teooria on nüüd kooskõlas katsega. Kuigi lõpmatustest pole lahti saadud, ei takista nad saamast katsega kooskõlalisi tulemusi.

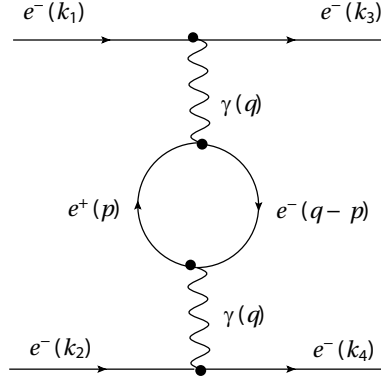
Nõudlikuma lugeja jaoks kasutame nüüd veidi matemaatikat, näitamaks natuke üksikasjalikumalt, kust lõpmatused tulevad ja kuidas neid “kaotatakse”. Vaatleme lihtsat protsessi – elektroni hajumist elektronilt:

$$e^-(k_1) + e^-(k_2) \rightarrow e^-(k_3) + e^-(k_4), \quad (2)$$

kus $k_i = (E_i, \vec{k}_i)$ on osakese neli-impulss. Protsessi tõenäosuse määrab tõenäosusamplituud, mis kvantväljateoorias reeglina pole täpselt arvutatav. Kasutatakse ligikaudset meetodit – häiritusarvutust, kus amplituud arendatakse ritta jõukonstandi astmete järgi. Et kvantelektrodünaamikas on jõukonstant – sisuliselt elektrilaengu ruut – ühest palju väiksem, piisab rahuldava tulemuse saamiseks vaid väikese arvu rea esimeste liikmete leidmisest. Häiritusarvutuse teeb mugavaks Feynmani diagrammide meetodi kasutamine. Esimeses lähendis kujutab protsessi joonisel 1 toodud Feynmani diagramm.



Joonis 1.



Joonis 2.

Vastavalt Feynmani reeglitele seatakse diagrammide igale elemendile (välisjoontele, virtuaalsete osakeste sisejoontele ja tippudele) vastavusse matemaatilised avaldised, mis kokkuvõttes annavad vastavat järku tõenäosusamplituudi avaldise. Vastastikmõju toimub siin vaid diagrammi tippudes elektroni ja footoni vahel: ülemises tipus elektron kiirgab virtuaalse footoni, andes talle energia ja impulsi (neli-impulsi), ja alumises tipus teine elektron neelab selle footoni, või vastupidi. Meie loo seisukohalt on siin oluline, et virtuaalsele footonile vastab amplituudi avaldises nn propagaator, mis sõltub elektronilt footonile üle antud neli-impulsi ruudust. Feynmani reeglite järgi tuleb amplituudi avaldises üle virtuaalsete vaheosakeste neli-impulsside integreerida. Siin on aga virtuaalse footoni neli-impulss määratud algelektroni $e^-(k_1)$ ja lõpp-elektroni $e^-(k_3)$ neli-impulsside vahega $q = k_1 - k_3$, mis on lõplik suurus³. Elektrilaeng tuleb amplituudi diagrammi tipufunktsioonide kaudu, mis teda sisaldavad. Laengu väärtus, nagu juba öeldud, on võetud katsest ja on samuti lõplik. Siit järeldub, et ligikaudse arvutuse esimese lähendi amplituud on lõplik. See peabki nii olema, sest siin ei võeta veel arvesse elektrone ümbritsevat virtuaalsete elektroni-positroni paaridest „kasu-

3 Feynmani diagrammidele vastavate amplituudide kirjutamisel loetakse virtuaalosakese kiirgamise protsessis energia ja impulss jäävateks, kuid ei kehti enam relatiivsusteoorias tuletatud seos energia, impulsi ja massi vahel ($E^2 = \vec{k}^2 + m^2$). Impulss võib omandada suvalisi väärtusi ja seepärast tulebki üle nende väärtuste integreerida. Selline käsitlus on võrdväärne käsitlusega, kus virtuaalprotsessis energia ja impulss ei ole jäävad, kuid on omavahel seotud.

kat“. Selle mõju hakatakse arvesse võtma alles alates teisest lähendist. Elektroni laengule avaldab „kasukas“ mõju Feynmani diagrammi kaudu, kus virtuaalsel footonjoonel on elektroni-positroni virtuaalpaari silmus, ehk teisisõnu, kus virtuaalne vahefooton elab lühikest aega virtuaalse elektroni-positroni paarina (joonis 2). Vahefootoni neli-impulss on ka siin elektronide neli-impulssidega k_1 ja k_3 määratud, aga virtuaalse e^+e^- -paari silmuses olev neli-impulss p ei ole millegagi piiratud. Üle selle integreerimine toobki tõenäosusamplituudi lõpmatu suuruse. Kui nüüd häiritusarvutuse esimesele liikmele liidame teist järku liikmest tuleva parandi (mis on lõpmata suur!), sõltub parandatud amplituud elektri-laengust (e) avaldisena, mida tähistame e_R -ga:

$$e_R = e \left(1 - \frac{e^2}{12\pi^2} \ln \left(\frac{M^2}{m^2} \right) \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Siin M^2 on nn löikeparameeter, mis asendab üle p integraali ülemist lõpmatut raja. Selline asendamine võimaldab teostada üle p integreerimist. Sisuliselt toob M^2 amplituudi lõpmatuse, sest $M^2 \rightarrow \infty$. Elektroni laengut on mõõdetud katsetes, kus teda kombatakse väikese energiaga, ehk teisisõnu öeldes, pikalainelise väljaga. Sellisele laengule vastab elektromagnetjõu konstant $\alpha = e^2/4\pi = 1/137$ (süsteemis, kus valguse kiirus c ja modifitseeritud Plancki konstant $\hbar = h/2\pi$ võrduvad ühega). Kui nüüd väita, et tegelikult mõõdetakse katses mitte laengut e , vaid laengut e_R , siis $\alpha = e_R^2/4\pi = 1/137$. Suurus e_R tähistab eespool kõne all olnud ümbornormeeritud laengut. Kui asendada amplituudis, mis on leitud kuni häiritusarvutuse teise liikmeni, laeng e renormeeritud laengu e_R kaudu, on amplituud laengu seisukohalt lõplik. Aga ta on lõplik ka kuitahes kõrgeid parandeid arvesse võttes, sest kõrgemat järku lähendites võetakse virtuaalpaaride mõju arvesse sama tüüpi diagrammidega, nagu joonisel 2 toodud, kus iga uue häiritusarvutuse järguga lisandub virtuaalfootoni joonele täiendav virtuaalpaari silmus. Kuid ka nende tekitatud lõpmatusi saab juba kirjeldatud viisil kõrvaldada.

Et tõenäosusamplituud oleks lõplik, peab jagu saama ka „kasuka“ mõju poolt tekitatud massi lõpmatusest. Kui laengu lõpmatused tulid amplituudi vaid seda tüüpi diagrammidest, mis eespool vaadatud, siis massi omad tulevad teatud teist tüüpi diagrammidest. Nendele diagrammidele vastavad amplituudid saab samuti lõplikeks muuta, kui massid

ümber normeerida. Ruumipuudusel me seda siin ei näita. Mingeid teisi lõpmatusi peale laengutest ja massidest tulenevate ei siin toodud protsessis ega teistes elektromagnetjõu protsessides ei tule. Kvantelektrodünaamika on renormeeritav teooria.

Võtame kokku renormeerimise filosoofia elektrilaengu renormeerimise näitel. Mõõdetav laeng on summa puhtast, virtuaalosakeste paaridest sõltumatust laengust (häiritusarvutuse esimese järgu diagramm) ja kõigi kõrgemat järku diagrammide panustest laengusse. Puhta laengu suurus pole teada. Teda ei saa mõõta, kuna virtuaalosakeste „kasukata“ laengut looduses ei ole. Oletame, et puhas laeng on selline, et kogulaenguks tuleb katsest mõõdetud laengu väärtus. See tähendab, et oleme puhtale laengule andnud väärtuse, millel on ka lõpmatu osa, mis on suuruselt sama, aga teise märgiga kui kõrgemat järku paranditel. Tänu sellele summeeruvad panuste kogusummad lõplikuks suuruseks. Sama lugu on ka massiga.

Samalaadne, kuid ometi täiesti erinev „kasukaga“ ja puhta laengu mõõtmise probleem on tahkiseteoorias üldtuntud. Vaatleme positiivset laengut dielektrilises keskkonnas, näiteks vees. Laeng on vastastikmõjus teda ümbritsevate molekulide-dipoolidega. Positiivne laeng tõmbab dipoolide negatiivsed laengud enda poole ja need varjestavad tema laengu. Vees ei saa puhast laengut mõõta, mõõtetulemus on väiksem puhtast laengust ja avaldub seosega $e_{vees} = e/\epsilon$, kus ϵ on vee dielektriline konstant. Aga veest saab laengu välja (vaakumis) tõsta ja siis juba puhast laengut mõõta. Kuid nagu selgub, ei ole ka vaakumis olev laeng puhas laeng, aga teda pole ka enam vaakumist kuhugi „välja tõsta“. Ka pole teada puhta laengu suurus, mis võib olla lõpmatus (nagu renormeerimisteooria ütlebki). Kui tahkiseteoorias on nii puhas laeng kui laengu parandid dielektrilises keskkonnas lõplikud, siis kvantväljateoorias on mõlemad, nii puhas laeng kui vaakumparandid, lõpmatud. Kas selline lõpmatustest vabanemisviis, mida nimetatakse renormeerimiseks, ja selle õigustamiseks toodud filosoofia rahuldab, on iseküsimus. Paljusid rahuldab, paljusid mitte.

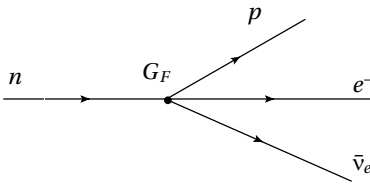
VARASED NÕRGA JÕU TEOORIAD

Mitte kõik teooriad ei ole renormeeritavad. Renormeeritavad on teooriad, kus lõpmatused on seotud vaid lõpliku arvu vabade parameetritega, mille väärtused võetakse eksperimentidest. Teooriaid, mis seda tingimust

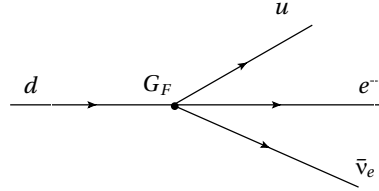
ei rahulda, ei saa renormeerida. Nendes toob amplituudi iga järgnev kõrgemat järku parand kaasa uusi uut tüüpi lõpmatusi, mida ei ole võimalik kõrvaldada. Renormeerimatud teooriad ei rahulda. Need võimaldavad arvutada vaid häiritusarvutuse esimese lähendi. Renormeerimatute teooriate hulka kuuluvad ka varased nõrga jõu teooriad. Esimese nõrga jõu teooria lõi Enrico Fermi 1934. aastal [3]. Itaalia füüsik Fermi oli viimane maailmakuulus osakeste füüsika teoreetik ja eksperimentaator ühes isikus. Kas pole edaspidi nii andekaid inimesi teadusesse tulnud või on osakeste füüsikas nii teooria kui eksperiment sedavõrd keerukaks läinud, et enam ühe teadlase pähe ei mahu. Fermi võttis nõrga jõu teooria loomisel eeskujuga selleks ajaks juba loodud elektromagnetjõu kvantteooriast – küll veel alles esimeses arengujärgus olevast kvantelektrodünaamikast. Kuid siiski on teooriatel palju erinevusi. Kvantelektrodünaamikas „kannab“ jõudu kahe laetud osakese vahel footon (vt joonis 1). Mingit nõrga jõu kandjat sel ajal ei teatud ega tulnud selle pealegi, et niisugust võiks üldse vaja minna. Et tuumades mängivad peale elektromagnetjõu tähtsat rolli veel kaks jõudu – tugev jõud, mis hoiab tuumi koos, ja nõrk jõud, mis tekitab tuumade β -lagunemisi, sellest rääkis Eugene Wigner just selleksa 1934. aastal, mil Fermi oma teooria lõi. Fermi teooria oligi tuumade β -lagunemise teooria. Muid nõrga jõu mõjul toimuvaid protsesse sel ajal veel ei teatud. Küll oli selleks ajaks teada, et tuumad on ehitatud prootonitest ja neutronitest, samuti Austria teoretiku Wolfgang Pauli neutriinohüpotees. Just Fermi hakkas hüpoteetilist osakest väikeseks neutroniks – neutriinoks – kutsuma. Nukleonide tasemel muutub β -lagunemisel üks tuuma neutronitest prootoniks ning tuumast kiiratakse välja elektron ja temale vastav antineutriino: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$. Viimase väitega oleme Fermi teooria loomise ajast üksjagu edasi jõudnud. Sel ajal räägiti vaid neutriinost, mitte veel antineutriinost ja just elektroni antineutriinost. Aga nüüdsete teadmiste järgi peab lõpposakeste hulgas just elektroni antineutriino olema.

Fermi järgi toimub vastastikmõju nelja fermioni (spinniga $\frac{1}{2}$ osake) vahel ühes punktis (joonis 3). Vastastikmõju intensiivsuse määrab Fermi nõrga jõu konstant. Erinevalt elektromagnetjõu konstandist, mis on dimensioonita, on Fermi konstant massi pöördruudu dimensiooniga.

Fermi teooria loomisest kvarkmudeli tekkimiseni jäi veel 30 aastat. Kvargitasandil vastab tuuma β -lagunemisele protsess, kus tuuma ühe neutroni d -kvark laguneb u -kvargiks ja tuumast kiiratakse välja elektron ja

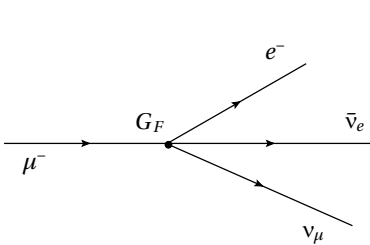


Joonis 3.

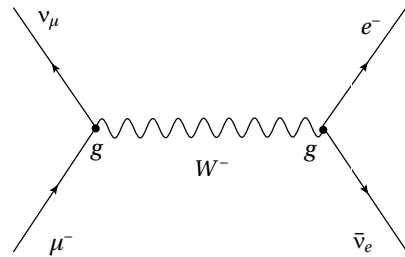


Joonis 4.

tema antineutriino: $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$ (joonis 4). Tuumade β -lagunemise tingib küll nõrk jõud, et aga protsess toimub tuuma tugeva jõu väljas, takistab viimane nõrga jõu uurimist puhtal kujul. Puhtalt nõrga jõu protsessideks on lagunemised, kus kõik protsessi osakesed on leptonid, millele tugev jõud ei mõju, näiteks müüoni lagunemine ($\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$) (joonis 5). Kuid selline protsess sai tuntuks alles mõned aastad hiljem, siis kui Seth Neddermeyer ja Carl Anderson müüoni avastasid [4]. Fermi teooria töötas hästi üle 30 aasta nii tuuma β -lagunemiste kui ka müüonite lagunemise kirjeldamisel, kuni juba kõne all olnud paarsuse rikkumise avastamiseni. Pärast seda tuli Fermi teooriat veidi kohendada, liites senisest teooriast tulenevale tõenäosusamplituudile paarsust rikkuva osa. Kohendatud Fermi teooria oli jälle töökõlbulik, andes katsega kooskõlalisi tulemusi. Oli aga juba ka selge, et Fermi teooria on rahuldav vaid tol ajal uuritavate madalal energial toimuvate lagunemisprotsesside kirjeldamisel. Kõrgematel energiatel toimuvate protsesside jaoks, nagu näiteks neutriino ja elektroni põrked, kus tuleb arvesse võtta lisaks häiritusarvutuse esimesele ka kõrgemaid lähendeid, teooria enam ei tööta. Ta ei ole renormeeritav. Püüdes nõrga jõu teooriat veelgi lähendada renormeeritavale kvantelektrodünaamikale, hakati ka seal arendama vaheosakestega teooriat. Selle järgi kirjeldab müüoni lagunemist joonise 5 asemel joonis 6.

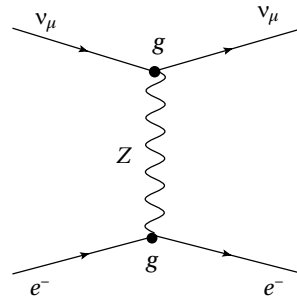


Joonis 5.



Joonis 6.

Nõrga jõu lagunemisprotsesside kirjeldamisel vahebosonite teooriaga on võrreldes kvantelektrodünaamikaga kaks olulist erinevust. Nõrgas lagunemisprotsessis muutub laguneva osakese laeng (siin muutub negatiivse elektrilaenguga müüon neutraalseks müüneutriinoks). See tähendab, et jõu kandja - vaheboson - peab kandma ka elektrilaengut, sedasama, mis tema kiirgaja ära andis. Teiseks, kvantelektrodünaamikas vahendab



Joonis 7.

jõudu massita footon, samas peab nõrga jõu kandjal olema väga suur mass. Lähtume faktist, et elektromagnetjõul on lõpmatu mõjuraadius, aga nõrk jõud mõjub 10^{-18} meetri kauguseni. Kuidas seda seletada? Võtame appi juba tuttava seose energia ja aja vahel ($\Delta E \Delta t = \hbar$). Mõistes ΔE all energia jäävuse võimaliku rikkumise suurus vaheosakese kiirgamisel ja Δt all vaheosakese eluiga, näeme, et vaheosake elab seda kauem, mida vähem tema kiirgamisega energia jäävust rikutakse. Kui vaheosake on massita osake - footon, võib tema kiirgaja sünnitada ta kuitahes väikese energia jäävuse rikkumisega ja sellest johtuvalt võib ta eluiga olla kuitahes pikk. Liikudes valguse kiirusega, jõuab vahendaja kuitahes kaugemale. Et nõrk jõud mõjub vaid tühise kauguseni, peab tema eluiga olema tühiselt väike ja energia jäävuse rikkumise alampiir vaheosakese tekitamisel peab olema väga suur. Selle alampiiri määrab vaheosakese mass (massi energia). Nõrga jõu pörkeprotsessides, näiteks müüneutriino pörkel elektroniga ($\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$), osakesed oma identiteeti ei kaota ja seetõttu peab jõu vahendajaks olema neutraalne vaheboson Z (joonis 7). Aga ka Z peab olema väga massiivne osake.

Vahebosoniga nõrga jõu teooria loomine oli samm edasi täiuslikuma teooria poole. Ta aitas mõista paremini ka Fermi nelja fermioni kontaktmõju teooriat. Kui seame joonisel 6 toodud Feynmani diagrammile vastavusse tõenäosusamplituudi, vastab seal vahebosoni joonele propagaator, mis on võrdeline $1/(M^2 - q^2)$, kus M on vahebosoni mass ja q vahebosonile üle antud neli-impulss. Et vahebosoni massiga võrreldes on müüoni mass väga väike, peab ka müüonilt vahebosonile antud neli-impulss olema tühine võrreldes vahebosoni massiga, seda võib protsessi arvutamisel mitte arvestada ja jätta propagaatorisse ainult massi ruut. Vaheboson liigub niivõrd lühikese maa, et vastastikmõju võib võtta ühes punktis toimuvaks.

Ainsad jäljed jätab vaheboson endast oma massi ruuduga tõenäosusamp-lituudi nimetajasse ja vastastikmõju intensiivsust näitavate dimensioonita konstantidega g diagrammi tippudesse, kuigi tipud langevad praktiliselt kokku.

Nii tuleb Fermi konstant vahebosoniga teooria suuruste kaudu madalatel energiatel toimuvatel protsessidel $G_F \sim g^2/M^2$, kus tema dimensioon on ilmsel kujul antud. Võib näidata, et dimensiooniga jõukonstant on üks Fermi teooria renormeerimatuse põhjustest. Vaatamata sellele, et vahebosoniga teoorias oli jõukonstant dimensioonita, jäi talle Fermi teooria "haigus" külge – ka tema on renormeerimatu.

JÕUDUDE KALIBRATSIOONITEOORIAD

Noetheri teoreem [5] ütleb, et teooria invariantisus mingi pideva globaal-se teisenduse suhtes toob kaasa jääva suuruse. Nii tuleneb energia jäävus invariantisusest ajanihete, impulsi jäävus ruuminihete ja pöördimpulsi jäävus ruumipöörete suhtes. Elektrilaengu jäävus tuleneb aga mitte invariantisusnõudest mingi teisenduse suhtes tavaruumis nagu eespool toodud näidetes, vaid teisenduse suhtes osakeste sisemises, abstrakt-ses matemaatilises laenguruumis. Teisenduseks on faasiteisendus $e^{iq\alpha}$ (q – laenguoperaator, α – teisendusparameeter), mida võib vaadata kui pööret selles abstraktses ruumis. Globaalseteks nimetatakse teisendusi, mis ei sõltu aja- ega ruumikoordinaatidest, ehk teisisõnu, kus teisendus-parameetrid on konstandid. Läänud sajandi 60-ndatest hakati intensiivsemalt arendama teooriaid, mis oleksid invariantised lokaalsete, ajast ja ruumist sõltuvate faasiteisenduste suhtes. Kui globaalsetest faasitei-sendustest osakeste sisemistes (laengu)ruumides tulenesid jäävussea-dused, siis nüüd selgus, et invariantisusnõue lokaalsete faasiteisenduste suhtes osakeste teatud kindlates sisemistes ruumides määrab olulises osas vastastikmõjude kujud ja vastastikmõjude kandjad.

Skeem on siin selline. Vabade väljade võrrandid ei ole invariantised laenguruumide lokaalsete faasiteisenduste suhtes: väljavõrrandite tu-letisliikmed, mõjudes teisendatud väljafunktsioonidele, lisavad vaba-dele võrranditele invariantisust rikkuvaid liikmeid. Neid liikmeid saab kõrvaldada, kui tuua võrrandisse täiendavaid välju. Need peavad olema massita vektorväljad – nende väljade kvandid peavad olema massitud spinniga 1 osakesed. Selliseid välju nimetatakse kalibratsiooniväljadeks,

mis äraseletatuna tähendab, et nad on määratud teatud lisaliikmete täpsusega. Kui nüüd võrrandis olevate mateeriväljade teisenedes faasiteisenduste järgi kaasneb teooriasse toodud kalibratsiooniväljade kalibratsiooniteisendus, võib viimaseid nii valida, et nende teisendusel tekitatud lisaliikmed koonduvad vaba välja võrrandite faasiteisendustest tulnud invariantsust rikkuvate liikmetega. Võrrandisse lisatud kalibratsiooniväljadega ei kirjelda võrrand enam vabu välju, sest seal on nüüd mateeriväljade ja kalibratsiooniväljade vastastikmõju liikmed. Kui võrrandisse lisada veel vaba kalibratsioonivälja liige (kineetilise energia liige), ongi teooria valmis: seal on vaba mateerivälja ja vaba kalibratsioonivälja liikmed ja ka nende väljade vastastikmõju kirjeldav liige.

KVANTELEKTRODÜNAAMIKA KUI KALIBRATSIOONITEOORIA

Läheme nüüd veidi konkreetsemaks ja näitame, kuidas kalibratsiooniprintsibist (nii eespoolkirjeldatud protseduuri nimetatakse) tuletatakse vastastikmõju kvantelektrodünaamikas. Kõigepealt toome sisse konkreetse kalibratsioonivälja. Klassikalises elektrodünaamikas avaldatakse magnetväli \vec{B} ja elektriväli \vec{E} vektorpotentsiaali \vec{A} ja skalaarpotentsiaali V kaudu:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}, \quad \vec{E} = -\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \equiv \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right).$$

Võrrandid jäävad samaks, kui potentsiaalidega \vec{A} ja V teha teisendused:

$$\vec{A} \rightarrow \vec{A}' = \vec{A} + \vec{\nabla} \chi, \quad V \rightarrow V' = V - \frac{\partial}{\partial t} \chi, \quad (5)$$

kus χ võib olla suvaline ruumist ja ajast sõltuv diferentseeruv funktsioon. Toodu tähendab, et \vec{A} ja V võib ümber kalibreerida, ilma et \vec{B} ja \vec{E} muutuksid. Relativistlikus teoorias ühendatakse vektor- ja skalaarpotentsiaal üheks nelivektoriks, $A^\mu = (V, \vec{A})$. Sel juhul võtavad kalibratsiooniteisendused kuju

$$A^\mu \rightarrow A'^\mu = A^\mu - \partial^\mu \chi, \quad (6)$$

kus $\partial^\mu = \partial/\partial x_\mu$. Ühendatud tähistus ei ole väljateoorias kasutamiseks mitte ainult mugav, vaid näitab ka seda, et potentsiaalid \vec{A} ja V teisenevad üheaegselt.

Näitame nüüd kalibratsiooniprintsiibiga vastastikmõju sissetoomist kvantelektrodünaamikas. Lähtume laetud vaba osakest (välja) kirjeldavast Diraci võrrandist

$$(i\gamma_\mu \partial^\mu - m)\psi = 0. \quad (7)$$

Võrrand on invariantne globaalse faasiteisenduse suhtes, sest tuletis läheb konstantse teisendusparameetriga faasist lihtsalt „mööda”

$$\partial^\mu(e^{iq\alpha}\psi) = e^{iq\alpha}\partial^\mu\psi, \quad (8)$$

nii et väli ja tema tuletis teisenevad ühtemoodi. Lokaalse faasiteisenduse korral see enam nii ei ole, sest

$$\partial^\mu(e^{iq\alpha(x)}\psi) = e^{iq\alpha(x)}\partial^\mu\psi + iq e^{iq\alpha(x)}\psi \partial^\mu\alpha(x) \quad (9)$$

ja viimane liige rikub vaba Diraci võrrandi invarianttsust.

Toome võrrandisse (7) kalibratsioonivälja A^μ , asendades tuletise ∂^μ „pika tuletisega”

$$\partial^\mu \rightarrow D^\mu = \partial^\mu + iqA^\mu(x). \quad (10)$$

Kui faasiteisenduse $e^{iq\alpha(x)}$ mõjudes materiväljale kaasneb välja A^μ kalibratsiooniteisendus

$$A^\mu \rightarrow A^{\mu'} = A^\mu - \partial^\mu\alpha(x), \quad (11)$$

koonduvad kahe teisenduse tuletisliikmed ja pikk tuletis läheb siis lokaalsest faasist mööda, nagu tavatuletis globaalsest faasist. Võrrand

$$(i\gamma_\mu D^\mu - m)\psi = 0 \quad (12)$$

on invariantne lokaalse faasiteisenduse suhtes. Võrrand (12) pole enam vaba materivälja võrrand, sest pikas tuletises olev kalibratsiooniväli A^μ on vastastikmõjus materiväljaga (vastastikmõju liige $q\gamma_\mu A^\mu\psi$). Vör-

randisse lisatav vaba kalibratsioonivälja osa on $\partial_\mu F^{\mu\nu}$, kus $F^{\mu\nu}$ on väljatu-gevustensor $F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$.

ELEKTRONÕRGA JÕU KALIBRATSIOONITEOORIA

Võiks arvata, et väljavõrrandite invariantsusest nõrga ja tugeva laengu-ruumi pöörete suhtes tulenevad ka nõrga ja tugeva jõu kujud. Nii on see siiski vaid tugeva jõu korral. Nõrga jõu korral ei saa pelgalt nõrgast laengu-ruumist lähtuda: nõrga jõu vahendajatel on elektrilaeng, mistõttu ei saa kuidagi vältida elektromagnetvälja. Tuleb tunnistada, et eespool elektro-magnetjõudu käsitledes eirasime massiivsete elektrilaenguga nõrga jõu kandjate olemasolu. Vastasel juhul poleks me kvantelektrodünaamikas kõikidest hädadest lahti saanud. Nõrga ja elektromagnetjõu teooriaid tuleb käsitleda koos. Sihile jõudmiseks kasutatakse teatud kombineeritud sisemist ruumi, mille üks osa on kahedimensionaalne (nõrk isotoopiline ruum) ja teine ühedimensionaalne (nõrga hüperlaengu ruum). Invariantsusnõudest nendes ruumides tehtavate faasiteisenduste suhtes tulenevad kahe jõu kujud ja nendes olevate jõu vahendajate väljad.

Et isotoopiline ruum on kahedimensionaalne, rikub faasiteisendus siin vaba võrrandit kolme lisaliikmega. Nende kõrvaldamiseks tuleb teooriasse tuua kolm kalibratsioonivälja. Ühedimensionaalse hüperlaengu ruumi teisendamine lisab ühe invariantsust rikkuva tuletisliikme, mille kaotamiseks on tarvis veel üht kalibratsioonivälja. Nende nelja kalibratsioonivälja teatud lineaarsed kombinatsioonid annavad õiged kalibratsiooniväljad ja nende kvandid – W^+ -, W^- - ja Z -bosonid ning fotonid. Kõigil neil neljal vaheosakesel ei tohi olla massi.

Nüüd veidi üksikasjalikumalt. Alustame kaugemalt. Praegu kalibratsiooniteooriates kasutatava isoruumi mõiste lõi tugeva jõu jaoks Werner Heisenberg. Üliväikest massierinevust arvestamata on prootonit ja neutronit iseloomustavad suurused kõik samad, välja arvatud üks: prootonil on elektrilaeng, neutronil mitte. Kuid tugev jõud ei sõltu elektrilaengust, tema „näeb“ prootonit ja neutronit identsetena. See 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 erinevad seisundid. Kui suund on „üles“, on nukleon prooton, kui „alla“, siis neutron. Kuid võimalikud on ka kõik vahepealsed olekud, kus nukleon ei ole ei prooton ega neutron,

Osakeste pered	esimene pere	teine pere	kolmas pere
leptonid	elektron elektron- neutriino	müüon müüneutriino	taupon tauneutriino
kvargid	<i>u</i> -kvark <i>d</i> -kvark	<i>c</i> -kvark <i>s</i> -kvark	<i>t</i> -kvark <i>b</i> -kvark

Tabel 1. Standardmudeli alusfermionide pered.

vaid nende kvantmehhaaniline segu. Katses avaldub nukleon ikkagi vaid prootoni või neutronina, mis on nukleoni omaolekud. Kõik see on tuttav spinn- $\frac{1}{2}$ teooriast. Sellest ka nimi – nukleoni isospinn. Kui eksisteerib prootoni-neutroni isodublett – nukleon

$$N = \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}, \quad (13)$$

võib seda faasiteisendustega pöörata:

$$N \rightarrow N' = \begin{pmatrix} p' \\ n' \end{pmatrix} = e^{i\frac{\vec{\alpha} \cdot \vec{\tau}}{2}} \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$\vec{\alpha} \cdot \vec{\tau} = \alpha_1 \tau_1 + \alpha_2 \tau_2 + \alpha_3 \tau_3,$$

kus α_i on teisenduse parameetrid ja τ_i on 2×2 maatriksid. See on rühmateooriast tuntud $SU(2)$ teisendus, kus Pauli maatriksitel $\vec{\sigma}$ on uues ruumis teine tähis – $\vec{\tau}$. $SU(2)$ on 2×2 unitaarsete ühikdeterminandiga maatriksite rühm, mis on ekvivalentne kolmruumi pöörete rühmaga $O(3)$. Tugeval isospinnil on praegu suures osas vaid ajalooline tähtsus. Hoopis tähtsam on, et sellest võeti malli nõrga isoruumi ja isospinni mõisteks. On ju ka Standardmudeli alusfermionid antud dublettidena (vt tabel 1).

Oletame, et eksisteerib nõrk isoruum

$$\psi = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \quad (15)$$

kus (a, b) on üks võimalikest dublettidest. Nõuame, et võrrand oleks invariantne lokaalse faasiteisenduse

$$\psi \rightarrow \psi' = e^{ig_2 \vec{\alpha}(x) \cdot \vec{\tau}/2} \psi \quad (16)$$

suhtes, kus g_2 määrab jõu intensiivsuse. Vaba dubletti kirjeldav väljavõrrand pole selle teisenduse suhtes invariantne. Invariantsust rikuvad kolm tuletisliiget – tuletised parameetritest $\alpha_1(x)$, $\alpha_2(x)$ ja $\alpha_3(x)$, mille kõrvaldamiseks läheb vaja kolme kalibratsioonivälja. Toome need sisse pika tuletisega

$$D^\mu = \partial^\mu + \frac{ig_2}{2} \vec{\tau} \cdot \vec{W}^\mu. \quad (17)$$

Kuidas peab nüüd teisenema kalibratsiooniväli \vec{W}^μ , et invariantnõue

$$D^\mu \psi' = e^{ig_2 \vec{\alpha}(x) \cdot \vec{\tau}/2} D^\mu \psi \quad (18)$$

oleks täidetud? Vastuseks vajalikke arvutusi on lihtsam teha, kui vaadata $\vec{\alpha}(x)$ asemel infinitesimaalset teisendust $\vec{\varepsilon}(x)$. See asja ei muuda, sest koguteisendus pidevatel teisendustel summeerub infinitesimaalsetest. Tulemus:

$$\vec{W}^\mu \rightarrow \vec{W}'^\mu = \vec{W}^\mu - \partial^\mu \vec{\varepsilon}(x) - g_2 \vec{\varepsilon}(x) \times \vec{W}^\mu. \quad (19)$$

Tuletisliige \vec{W}^μ kalibratsiooniteisenduses on meile juba tuntud footonvälja A^μ teisendusest, teine liige näitab, et \vec{W}^μ on tõepoolest nõrga isospinni vektor, sest see on tuntud vektorite teisenduseeskiri. Et teooria oleks täielik, tuleb avaldisse panna ka vaba kalibratsioonivälja ehk kineetilise energia liige. Kvantelektrodünaamika eeskujul valime kineetilise energia liikme, milles väljatugevustensoriks on

$$\vec{W}^{\mu\nu} = \partial^\mu \vec{W}^\nu - \partial^\nu \vec{W}^\mu. \quad (20)$$

Kuid siin on $\vec{W}^{\mu\nu}$ küll Lorentzi tensor, aga ta ei ole isoruumi vektor – ei teisene nii nagu valemi (19) viimane liige. Et $\vec{W}^{\mu\nu}$ oleks isoruumi vektor, tuleb valemi (20) paremale poolele lisada täiendav, kalibratsiooniväljade vastastikmõju – omamõju – liige:

$$\vec{W}^{\mu\nu} = \partial^\mu \vec{W}^\nu - \partial^\nu \vec{W}^\mu - g_2 \vec{W}^\mu \times \vec{W}^\nu. \quad (21)$$

Kalibratsioonibosonid kannavad ka ise laenguid, mistõttu vabu kalibratsioonivälju ei olegi.

Nii tuleb isoruumi teisenduste kaudu teooriasse kolm kalibratsoo-

nivälja, kolmele isoruumi komponendile $\vec{W}^\mu \equiv W_i^\mu$ vastavad väljad W_1^μ , W_2^μ ja W_3^μ . Neljas kalibratsiooniväli tuleb hüperlaengu ruumi pöörest. Nõrk hüperlaeng Y defineeritakse elektrilaengu ja isospinni kindla kombinatsioonina. Hüperlaengu ruumi lokaalsetest faasiteisendustest $e^{i g_1 \beta(x)/2}$ tingitud invariantisust rikkuva liikme kaotamiseks tuleb valemiga (17) toodud pikka tuletist veelgi pikendada:

$$D^\mu = \partial^\mu + i \frac{g_2}{2} \vec{\tau} \cdot \vec{W}^\mu + i \frac{g_1}{2} Y B^\mu. \quad (22)$$

Väli B^μ peab faasiteisendusega samal ajal tegema kalibratsiooniteisenduse

$$B^\mu \rightarrow B'^\mu = B^\mu - \partial^\mu \beta(x). \quad (23)$$

Et isoruum pole nõrga laengu ruum ja hüperlaengu ruum pole elektrilaengu ruum, ei ole kalibratsiooniväljad W_1^μ , W_2^μ ja W_3^μ nõrka jõudu vahendavateks väljadeks, samuti ei ole B^μ elektromagnetväli. Õiged kalibratsiooniväljad on nende lineaarsed kombinatsioonid:

$$W_\pm^\mu = \frac{1}{\sqrt{2}}(W_1^\mu \pm iW_2^\mu), \quad Z^\mu = \frac{-g_1 B^\mu + g_2 W_3^\mu}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}}, \quad A^\mu = \frac{g_1 W_3^\mu + g_2 B^\mu}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}}. \quad (24)$$

Päris korras kõik asjad siiski veel pole. Mõlemat siin tuletatud jõudu vahendavad osakesed – vahebosonid – on massita. Tegelikuses on vaid footon massita, nõrga jõu vahendajad seevastu vägagi massiivsed. Mida teha? Panna massiliikmed lihtsalt „käega“ võrrandisse? Kuid sellega rikume kalibratsiooniinvariantisust, mille abil vastastikmõju tuletasime. Ja tuleb karistus: „käega“ pandud massiliikmetega teooria ei ole renormeeritav. Elektronõrga jõu mudeli ehitajad ja paljud teised teadlased uskusid, et kui nõrga jõu vahendajate massid tekivad sümmeetria spontaansel rikkumisel, võib teooria olla renormeeritav. Kuidas selline massi genereerimine käib, sellele vastamise jätame veidi hiljemaks. Enne seda vaatame veel tugeva jõu avaldise tuletamist. Kuid selle peatüki lõpuks ütleme lugejale, et oleme toodud skeemides natuke üle nurga lasknud. Tõeliste dublettidena vaadeldakse mitte täpselt tabelis toodud osakeste paare, vaid nende üht osa, kus osakeste spinnid on valdavalt suunatud liikumisele vastassuunas, ja läheb vaja veel teisigi konstruktsioone. Kõigi peensuste arvesse võtmine

oleks olnud siin keeruline ja teinud ka jutu liiga pikaks. Usume, et tuletamise mõtted ja võtted oleme siiski ära toonud.

KALIBRATSIOONIPRINTSIIP JA KVANTKROMODÜNAAMIKA

Kvantkromodünaamika on tugeva jõu kvantteooria kvarkide tasemel. Sõna „kromo“ tuleneb kreeka sõnast *chrōma* = värv. Kust värv? Väljade ja nende kaudu jõu allikateks on laengud. Elektromagnetjõu allikaks on elektrilaeng, mida kannavad kõik kvargid ja pooled leptonitest. Antiosakestel – antikvarkidel ja antileptonitel – on antilaeng, mis erineb laengust märgi poolest. Tugeva jõu allikateks on kolm eri sorti tugevat laengut, mida iga kvark võib ühekaupa kanda ja protsessides vahetada. Et kolmest kvargist koosnevatel barüonidel (spinniga $\frac{1}{2}$ hadronid – prooton, neutron, Λ -hüperon jt) tugev laeng puudub, peavad kolme kvargi erisugused laengud üksteist nii kompenseerima, et kogulaeng on null. Teatavasti on võrdsetes kogustes punase, sinise ja roheline värvi segu värvitu. Kui ühel barüoni kvarkidest on punane, teisel sinine ja kolmandal roheline laeng, võib öelda, et nende kogumõju on värvitu. Sellisel segul puudub tugeva jõu (värv)laeng. Igal värvilaengul on ka antilaeng, vastavalt antipunane (taevassinine), antisinine (kollane) ja antiroheline (purpur) laeng. Need on antikvarkide laengud. Et mesonid (täisarvulise spinniga hadronid – piionid, kaaonid, B-mesonid jt) koosnevad kvargist ja antikvargist, peavad nende laengute värvid olema teineteise antivärvid. Loomulikult pole tugeva jõu laengutel midagi ühist värviga, kuid analoogia värviteooriaga teeb käsitluse mugavaks.

Tugeva jõu kuju saab tuletada, nõudes teooria invariantust lokaalsete faasiteisenduste suhtes isotoopilises kolmedimensionaalses värvilaengute ruumis. Matemaatikas teatakse neid teisendusi rühma $SU(3)$ teisendustena, mida värviruumile rakendades märgistatakse indeksiga c ($SU_c(3)$ teisendused). See on unitaarsete, ühikdeterminandiga 3 rea- ja veeruliste maatriksite rühm, millel on 8 generaatorit-maatriksit λ_j ($j = 1, \dots, 8$) ja seega ka 8 teisendusparameetrit $\beta_j(x)$ ($j = 1, \dots, 8$). Teisenduse võib kirja panna kui

$$\psi \rightarrow \psi' = \begin{pmatrix} q'_p \\ q'_s \\ q'_r \end{pmatrix} = e^{ig_t \lambda_j \beta_j(x)/2} \begin{pmatrix} q_p \\ q_s \\ q_r \end{pmatrix}, \quad (25)$$

kus indeksid kvarkide juures tähistavad värve, g_i on tugeva jõu konstant ja üle indeksi j on summeeritud. Et võrrandid jääksid faasiteisendustel invariantseks, peab pika tuletisega teooriasse lisama 8 vektorvälja b_i ,

$$\partial^\mu \rightarrow D^\mu = \partial^\mu + \frac{ig_t}{2}(\lambda_1 b_1^\mu + \dots + \lambda_8 b_8^\mu), \quad (26)$$

kompenseerimaks kaheksat faasiteisenduse tekitatud tuletisliiget.

Teooria jääb invariantseks faasiteisenduste suhtes, kui nendega kaasneb kalibratsiooniväljade b_j kalibratsiooniteisendus

$$b_j^\mu \rightarrow b_j'^\mu = b_j^\mu - \partial^\mu \beta_j(x) - g_t f_{jkl} \beta_k(x) b_l^\mu. \quad (27)$$

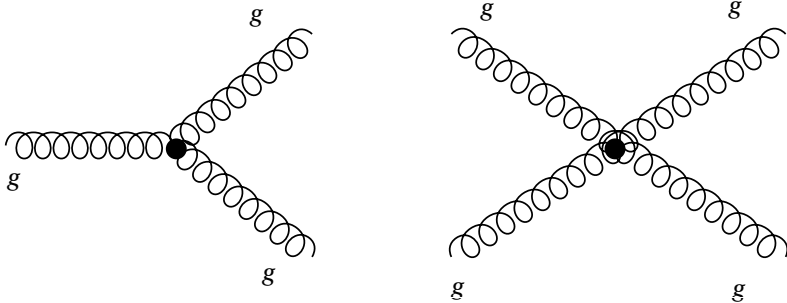
Selle teisenduse viimane liige, kus f_{jkl} tähistab nn struktuurikonstante, näitab, et väli teiseneb kui värviruumi oktet. Ka siin on õigete kalibratsiooniväljade saamiseks vaja võtta ülaltoodud väljade segud. Kalibratsiooniväljade kvante nimetatakse gluoniteks (*glue*, ingl k liim), nii et kalibratsioonivälju võib nimetada ka gluoniväljadeks. Gluonid kannavad ka värvilaenguid, nii nagu neid kiirgavad kvargidki. Igal gluonil on koguni 2 laengut, millest ühel on värv ja teisel anti-värv. Tänu värvilaengutele on ka gluonite vahel omamõju. Nii et võrrandile lisatud „vaba“ gluonväli, mis on määratud väljatugevustensoriga

$$G_j^{\mu\nu} = \partial^\mu b_j^\nu - \partial^\nu b_j^\mu + g_t f_{jkl} b_k^\mu b_l^\nu, \quad (28)$$

annab omainteraktsiooni liikmed, mis Feynmani diagrammides on kas kolmik- või neliktipud (joonis 8).

Siinkohal jääb vastamata paljudele küsimustele. Gluonid on mas-sita osakesed, aga miks ei ole tugev jõud lõpmata mõjuraadiusega, vaid ulatub ainult hadroni mõõtmeteni? Kas tugeva jõu korral saab üldse kasutada ligikaudset (häiritus)arvutust, kuna vastastikmõju konstant pole siin väiksem kui 1? Kuidas selgitada katsefakti, et tugev jõud kasvab värvilaengute vahel kauguse kasvades? Miks ei pääse kvargid hadronitest (barüonidest ja mesonitest) välja? Püüame edaspidi ka neile vastused leida.

Ja veel üks üldisem, kõiki vastastikmõjusid puudutav asi, mille kohta ei meil ega kellelgi teisel süvitsi minevat vastust pole: miks just selliselt



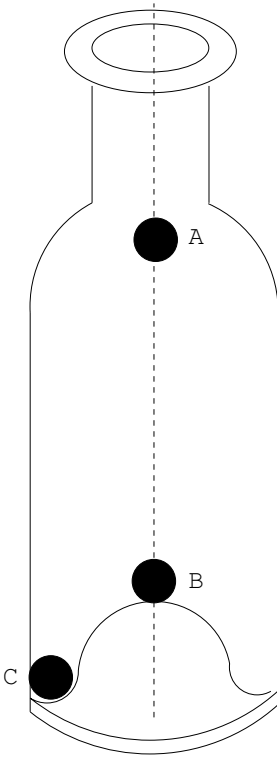
Joonis 8.

valitud sisemised ruumid iseloomustavad osakesi ja nende vastastikmõjusid, aga mitte mingid teised? Ruumid on valitud nii, et kõik „välja tuleks“.

SPONTAANSELT RIKUTUD (PEIDETUD) SÜMMEETRIAD

Osakestefüüsikas mängivad väga suurt rolli mitmesugused sümmeetriad. Aga olulisemad kui sümmeetriad võivad olla nende rikkumised. Ilma mõne sümmeetria rikkumisel temale tehtud „iluveata“ võib-olla ei olekski seda maailma, milles me elame, ega ka meid endid. Looduses võib sümmeetriat rikkuda kaheti: ilmselt, kui sümmeetriat rikkuv liige on nähtust kirjeldavas võrrandis, ja peidetult, kui võrrand on sümmeetriline, kuid tema mingi lahend enam mitte. Diferentsiaalvõrrandite lahendid sõltuvad algingimustest. Peidetud sümmeetriat võib hulganisti ka igapäevaelust leida. Kui keegi ei suuda kahest, pea võrdväärsest võimalusest ühte valida, öeldakse, et ta on nagu kits kahe heinakuhja vahel. Tõepoolest, kui kits on sattunud kahe heinakuhja vahele, on tal kaks võimalust, kas valida toidukorraks üks või teine kuhi. „Võrrand“ on täiesti sümmeetriline. „Lahendis“ – kits läheb ühe kuhja juurde – seda sümmeetriat rikutakse. Aga võib ka öelda, et sümmeetria on peidetud: kui kits jõuaks kuhjade vahele väga palju kordi, valiks ta mõlemaid neist ühepalju – sümmeetriliselt.

Näide klassikalisesest füüsikast. Joonisel 9 langeb kuulike punktist *A* piki kesktelge muhkpõhjaga pudelisse. Pilt on sümmeetriline pöörete suhtes



Joonis 9.

ümber kesktelje. Kui kuulike peatuks põhjakõrgendikul (punkt B), jääks sümmeetria kehtima. Tema asend pole aga seal stabiilne. Kuulike langeb põhjanõkku ja jääb seal täiesti juhuslikku kohta (punkt C) seisma. Pilt pole enam sümmeetriline, sümmeetria on spontaanselt rikutud. Võib ka jälle öelda, et sümmeetria on peidetud, sest ühest juhuslikust asendist saab kõikvõimalikud, veeretades kuulikest mööda põhjanõgu täisringi.

Liigume nüüd kvantfüüsika suunas. Vaatame kahte sümmeetria spontaanse rikkumise juhtu tahkisefüüsikas – ferromagneetikutes ja ülijuhtides. Need on olulised näited, kuna just nendest võtsid malli osakeste füüsikud, kui nad tõid sümmeetria spontaanse rikkumise kvantväljateooriasse. Ferromagneetikute teooria lõi Werner Heisenberg juba 80 aastat tagasi [6]. Ferromagneetikutes korreleeruvad naaberaatomite teatud elektronide spinnid. Et iga „spinniv“ elektron on väike magnet, on spinnide vahel vastastikmõju. See püüab keerata spinne paralleelseteks, sest siis on süsteemi vaba energia kõige väiksem. Spinn-spinn vastastikmõju kuju on invariantne ruumipöörete suhtes.

Kõrgematel temperatuuridel (energiatel) segab spinnide tegutsemist soojusliikumine, mistõttu spinnide suunad on ruumis ühtlaselt jaotunud. Temperatuuri langedes hakkab ilmne spinnide vastastikmõju. Alates teatud temperatuurist (Curie' temperatuurist) prevaleerib spinnide vastastikmõju ja süsteem jõuab varsti madalaima energiaga olekusse. Siin on spinnid valdavalt ühte suunda pööratud ja ferromagneetikul on makroskoopiline magnetmoment. Võimalikke madalaima energiaga olekuid on lõpmata palju, kõikvõimalike spinnide reastussuundadega: põhiolek on kōdunud. Väljavalitud spinnide suund on täiesti juhuslik. Aga selle ühe valikuga rikutakse esialgne sümmeetria – invariant sus ruumipöörete suhtes. Või teisisõnu, sümmeetria peidetakse. Kõikvõimalikud põhiolekud võib ühest neist saada pöörete tulemusena.

Toome välja tähtsad momendid sümmeetria spontaansel rikkumisel:

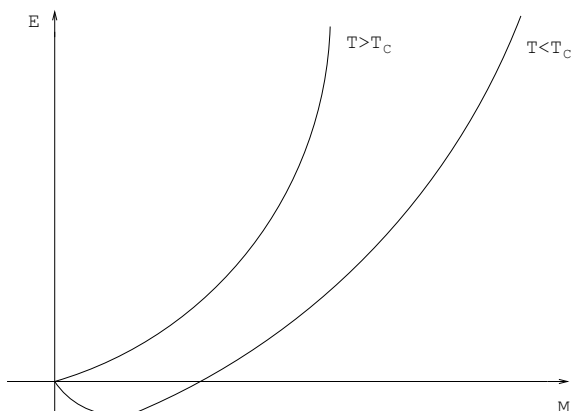
- süsteemi põhiolek on kõdunud (siin – lõpmata palju olekuid);
- mingil parameetril (temperatuuril T) on kriitiline väärtus (Curie' temperatuur T_c), mille ületamise korral sümmeetriline konfiguratsioon muutub ebastabiilseks (faasiüleminek!), alates millest toimub sümmeetria rikkumine;
- sümmeetria spontaansel rikkumise korral on põhiolekus väli (magneetuvus) nullist erinev.

Illustreerime öeldut ka veidi matemaatikat kasutades. Ferromagneti energia on antud kui

$$E = \alpha M^2 + \beta M^4, \quad (29)$$

kus M tähistab magneetuvust, koefitsient $\beta > 0$, aga $\alpha > 0$, kui $T > T_c$ ning $\alpha < 0$, kui $T < T_c$.

Joonisel 10 on energia graafik sõltuvalt magneetuvusest erinevatel temperatuuridel ja näha on ka nullist erinev magneetuvus põhiolekus $T < T_c$ korral. Näidet lõpetades peame ütlema, et kõik selle juures toodu kehtib vaid juhul, kui ferromagneetikul on lõpmata suured mõõtmed. Erinevalt klassikalisest füüsikast pole üks juhuslikult valitud madalaima energiaga olek tõeline põhiolek. Kvantmehhaanikaga kirjeldatavates lõplikes süsteemides toimub tunneleerimine erinevate sama energiatega olekute vahel, mille tulemusena tekib tõeline põhiolek nende olekute mingi kindla lineaarse seguna. Lõpmatutes süsteemides nõuab tunneleerimine lõpmatut aega, mistõttu ülaltoodud käsitlus on võimalik.



Joonis 10.

Ülijuhtivuse probleemi lahendasid 1956. a John Bardeen, Leon Cooper ja Robert Schrieffer [7]. Sümmeetria spontaanne rikkumine ei ole siin nii piltlikult kirjeldatav kui ferromagneetikutes. Elektrit juhivad keskkonnad, kus on suhteliselt vabu elektrone. Temperatuuri alanedes teatud kriitilise väärtuseni muutub keskkonna sümmeetriline konfiguratsioon meile juba tuntud elektrilaengu ruumi pöörete suhtes ebastabiilseks ja sellest alates toimub sümmeetria rikkumine. Elektrivoolu tekitavad elektronid hakkavad foononitega vastastikmõjustudes moodustama nn Cooperi paare, mis statistiliselt käituvad bosonitena, mida mahub ühte kvantolekusse kuitahes palju. See muudab süsteemi olekufunktsiooni ϕ efektiivselt makroskoopiliseks ja $|\phi|^2$ näitab Cooperi paaride tihedust: $\phi^2 = n_c = n_i/2$, kus n_i on Cooperi paare moodustanud elektronide arv. Seetõttu on Cooperi paaride süsteemi energia väiksem kui üksikelektronide süsteemi energia. Põhiolekus on Cooperi paaride „väli“ nullist erinev ja paaride liigutamiseks põhiolekus enam jõudu vaja ei lähe, on tekkinud ülijuhtivus. Analüüs näitab, et ülijuhtivas keskkonnas (Cooperi väljas) saavad mõned vabas olekus massita osakesed efektiivse massi. Teatavasti indutseerib elektrilaengute liikumine (vool) magnetvälja, mis püüab voolu ennast tekitavat välja „kustutada“. Kui panna metallist juht välisesse välja ja muuta ta juhust ülijuhiks, tekib vool, mille magnetväli tõrjub välise välja ülijuhist pea täielikult välja. See väli jääb vaid väga õhukesse pinnakihti. Niivõrd tugev on Cooperi paaride liikumisest tulenev vool ja sellega kaasnev magnetväli. Kuna välise välja mõjuraadius ülijuhis on väga väike, peab jõu kandjal – footonil – olema Cooperi väljas efektiivne mass.

2008. a Nobeli füüsikapreemia üks saajatest, Nambu, uuris mitu aastat sümmeetria spontaanse rikkumist tahkistes, eriti just ülijuhis. Ta jõudis järeldusele, et elementaariosakeste kvantteoorias tuleb väljade vaakumolekut vaadata mitte kui välja puudumist (energiata tühjust), vaid kui madalaima energiaga paljude osakeste süsteemi (nagu tahkisefüüsikas) põhiolekut [8]. Sel juhul võivad teatud väljad sümmeetria spontaanse rikkumisega minna nullist erineva väärtusega vaakumolekusse ja taolise vaakumiga väljas liikudes võivad nullmassiga osakesed omandada massi. Sellega oli Nambu toonud sümmeetria spontaanse rikkumise elementaariosakeste teooriasse. Nambu ise ütleb, et ta muutis sümmeetria spontaanse rikkumise üldiseks printsiibiks. Hiljem näitas Peter Higgs [9], kuidas sümmeetria spontaanse rikkumisega tekitatud

(Higgsi) väljas võivad nullmassiga nõrga jõu kandjad omandada massi. Nambu, Higgsi ja ka teiste sellelaadseid töid arvesse võttes löid Sheldon Glashow, Steven Weinberg ja Abdus Salam elektronõrga vastastikmõju kalibratsiooniteooria [10,11,12].

HIGGSI MEHCHANISM

Vaatame siin, mis on Higgsi väli, milline on tema vaakum ja kuidas vastastikmõju Higgsi väljaga annab massita nõrga jõu kandjatele massid. Kõigepealt, Higgsi väli peab olema skalaarne väli, mis täidab kogu ruumi. Makroväljana eksisteerida võivad vektorvälja - elektromagnetvälja - tunnivad kõik. Vastastikmõju vektorväljaga sõltub tema (kvandi) spinnist - seega suunast. Kui Higgsi väli oleks ka vektorväli, sõltuks tema mõjul tekitatud osakeste mass välja suunast.

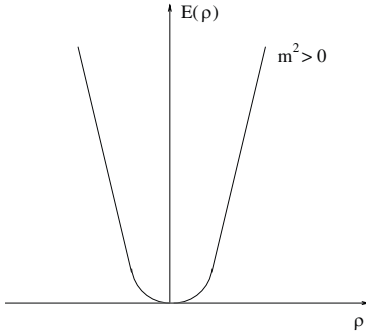
Olgu Higgsi väli (ϕ) kompleksne skalaarväli ($\phi = (\phi_1 + i\phi_2)/\sqrt{2}$). Oma pärast Higgsi välja on kergem analüüsida lagranžiaani, mitte temast tulenevate võrrandite kaudu. Alustamegi lagranžiaanist

$$\mathcal{L} = (\partial_\mu \phi)^* (\partial^\mu \phi) - m^2 \phi^* \phi - \lambda (\phi^* \phi)^2, \quad (30)$$

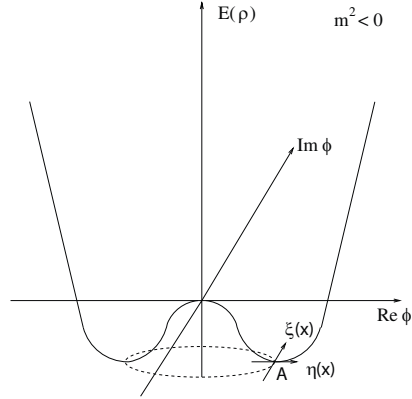
mis, nagu kergesti näha, on invariantne üheparameetrilise globaalse faa-siteisenduse $\phi \rightarrow \phi' = e^{i\alpha} \phi$ suhtes. Igal väljal on energia, mis lisandub kõikidele teistele energiatele maailmaruumis. Maailmaruum püüdleb madalaima energia suunas ja ühes temaga temas olevad väljad. Energia kahanedes lähevad väljad madalaima energiaga seisundisse, mida võib nimetada vaakumolekuks. Tavaliste kvantväljade vaakumolekus väli puudub. Milline on Higgsi väli minimaalse energia korral? Kas ka siin väli kaob, või on tegemist vaakumiga, kus väli on olemas? Välja energia summeerub kineetilisest ja potentsiaalsest energiast. Lagranžiaani esimene liige on kineetilise energia liige. Sellest näeme, et kineetiline energia on minimaalne (null), kui väli on konstantne. Milline see konstant on, selgub potentsiaalse energia

$$E = m^2 \phi^* \phi + \lambda (\phi^* \phi)^2 \quad (31)$$

miinimumist. Tavaväljade korral on parameetriga λ liige siin omamõju liige ja parameetriga m^2 liige massiliige. Higgsi väljade korral võib para-



Joonis 11.



Joonis 12.

meeter m^2 olla ka negatiivne. Kuna E sõltub vaid kombinatsioonist $\phi^* \phi$, tähistame analüüsi hõlbustamiseks $\phi^* \phi = \rho$, siis

$$E(\rho) = m^2 \rho + \lambda \rho^2. \quad (32)$$

Et potentsiaalsel energial oleks üldse miinimum, peab $\lambda > 0$, mida eeldatakse. Edasi on võimalikud kaks juhtu, $m^2 > 0$ või $m^2 < 0$.

Esimesel juhul on E miinimum koordinaatide alguspunktis (joonis 11), kus $\phi = 0$ ja m^2 -liige on kvantväljade korral massiliige. Juhul $m^2 < 0$ (joonis 12) annab rehendus kaks ekstreemumkohta. Kohal $\rho = 0$ on lokaalne maksimum, mis pole tasakaaluline. Teine koht tähendab, et mingi komplekstasandil oleva raadiusega $|\phi| = \sqrt{-m^2/2\lambda} \equiv v$ ringjoone kõikides punktides on potentsiaalse energia miinimum (lõpmatult kõdunud vaakumolek). Sealjuures on vaakumolekus väli nullist erinev. Kuid selle, nullist erineva välja korral on energia väiksem kui välja puudumisel. Millise punkti väli vaakumiks valib, seda käsitletav mudel ei ütle. Juhuslik punkti valik, milleks võtame ringjoone punkti reaaltelje all (punkt A), rikub teooria sümmeetriat globaalse faasiteisenduse suhtes. Häiritusarvutusel põhinevaid kvantteooriaid arendatakse nii, et vaadatakse väikeste häiritusi vaakumi ümber ja interpreteeritakse neid väljadena. Mitetasakaalulises ekstreemumpunktis ei saa häiritusarvutuslikku teooriat arendada. Seda tuleb teha ühe (väljavalitud) vaakumpunkti ümber. Selleks läheb vaja uut kompleksset välja, mis on ϕ suhtes nihkes:

$$\eta(x) + i\xi(x) = \phi - v. \quad (33)$$

Nihutame ka energia nullpunkti uude vaakumisse. Uus väli koosneb kahete liiki häiritustest – radiaalsetest $\eta(x)$ ja tangentsiaalsetest $\xi(x)$. Asendades lagranžiaanis ϕ valemis (33) antuga selgub, et radiaalsed häiritused $\eta(x)$ on reaalse massiga ($m_\eta = \sqrt{-2m^2} = \sqrt{2\lambda v^2}$), tangentsiaalsed häiritused $\xi(x)$ aga massita. See on ka arusaadav, sest radiaalse häirituse puhul eksisteerib tasakaaluasendisse tagasitõmbav jõud, vaakumite ringjoone sihis aga, kus energia on kõikjal ühesugune, tagasitõmbavat jõudu ei ole. Rõhutame viimast tulemust Goldstone'i teoreemi [13] kaudu, mis ütleb, et teooria invariantsuse rikkumine globaalsete faasiteisenduste suhtes tekitab alati massita skalaarse osakese. Seda osakest on hakatud nimetama Goldstone'i bosoniks. Olgu nüüd Higgsi välja lagranžiaan invariantne lokaalse üheparameetrilise faasiteisenduse $\phi \rightarrow \phi' = e^{iq\alpha(x)}\phi$ suhtes. Nägime varem, et sellise invariantsuse tagamiseks tuleb teooriasse (siin lagranžiaani) tuua massita kalibratsioonivälja liikmed – pika tuletisega lisanduvad lagranžiaani Higgsi välja ja kalibratsioonivälja C^μ vastastikmõju liikmed, sellele lisandub vaba kalibratsioonivälja kirjeldav liige. Nüüd kirjeldab Higgsi ja kalibratsioonivälja ning nende vahekorda lagranžiaan

$$\mathcal{L} = (D^\mu\phi)^*(D_\mu\phi) - m^2\phi^*\phi - \lambda(\phi^*\phi)^2 - \frac{1}{4}C_{\mu\nu}C^{\mu\nu}, \quad (34)$$

kus $D_\mu = \partial_\mu + iqC_\mu$ ja $C_{\mu\nu} = \partial_\mu C_\nu - \partial_\nu C_\mu$. Higgsi välja konkreetse vaakumoleku valik rikub lokaalset sümmeetriat. Kui panna lisaliikmetega lagranžiaani jälle valemiga (33) antud ϕ , selgub, et seal olev kalibratsiooniväli C_μ muutub massiivseks (massiga väljakandidid). Samal ajal on sealt kadunud Goldstone'i boson $\xi(x)$. Öeldakse, et massita, valguse kiirusega liikuv kalibratsiooniboson neelas Goldstone'i bosoni ja muutus sellega massiivseks. Asja võib seletada nii. Massita kalibratsiooniboson on vektorboson, millel on 2 vabadusastet – spinn liikumise suunas (+1) ja vastassuunas (-1). Massiga kalibratsiooniboson liigub valgusest väiksema kiirusega ja tal on 3 vabadusastet: eeltoodutele lisandub spinni kolmas, 0-komponent. Spinnita Goldstone'i bosonil on üks vabadusaste ja võib näidata, et sellest saabki massiivseks muutunud kalibratsioonibosoni vajalik spinni kolmas komponent. Lagranžiaani jäävad niisiis kaks välja: massiga Higgsi väli $\eta(x)$ ja massiivne kalibratsiooniväli. Tõepoolest, katse ei kinnita Goldstone'i bosoni eksisteerimist.

Mõnede uurijate arvates sõltub Higgsi teoorias m^2 väärtus keskkonna, maailmaruumi energiast (temperatuurist). Kõrgetel energiatel on m^2 posi-

tiivne, energia vähenedes m^2 väheneb ja mingi energia juures tuleb kriitiline punkt $m^2 = 0$, kust edaspidi muutub m^2 väärtus negatiivseks. Enne nullpunkti Higgsi väli vaakumolekus puudub, m^2 negatiivsete väärtuste korral on väli vaakumolekus nullist erinev. Negatiivsed m^2 väärtused viivad nullist erineva väljaga kõdnud vaakumile, millest ühe konkreetse oleku valimine rikub spontaanselt teooria sümmeetriat lokaalsete faasiteisenduste suhtes. Ühele konkreetsele vaakumolekule häiritusarvutuslikku kvantväljateooriat ehitades selgub, et Higgsi väljast säilib vaid reaalne skalaarväli $\eta(x)$, erinedes normaalsest selle poolest, et tema vastastikmõju tavaväljadega sõltub viimaste massidest. Aga normaalne on väli $\eta(x)$ seetõttu, et tema kvantidel on reaalsed (mitteimaginaarsed) massid. Higgsi bosoni massi suurust teooria ei anna, sest mass sõltub mittemõõdetavast parameetrist λ . Higgsi bosoni massi peab määrama eksperiment. Niisugune on Higgsi mehhanism.

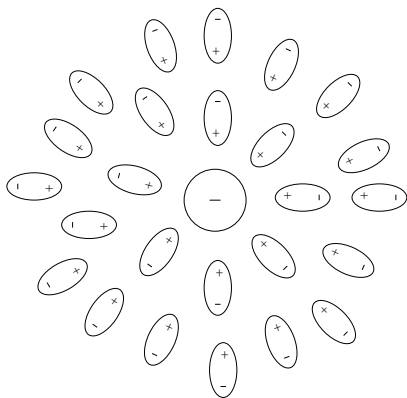
Toodud üheparameetrilisele faasiteisendusele toetuvat teooriat tutvustasime eesmärgiga näidata kalibratsiooniosakestele Higgsi väljaga massi tekitamise võimalikkust. Massi tekitamine elektronõrga vastastikmõju kalibratsioonibosonitele nõuab üksjagu keerulisemat, Higgsi väljade isodublettidele ja mitmeparameetrilistele faasiteisendustele toetuvat teooriat ja selle selgitamine ületaks käesoleva kirjutise mahu ning ka plaanitud keerukuse taseme. Seepärast kinnitame siin vaid, et elektronõrga jõu kalibratsioonibosoneid on Higgsi mehhanismiga võimalik massiivseiks muuta. Seejuures nii, et foton jääb massita ja massi saavad W^\pm ja Z bosonid. Elektronõrga vastastikmõju teooria loojad olid ettenägelikult tegelikeks elektronõrka jõudu vahendavateks väljadeks valinud teoriast tulenevate esialgsete kalibratsiooniväljade õiged kombinatsioonid. Teadlased oskavad näidata, et ka teised alusosakesed – leptonid ja kvargid – võivad massi saada vastastikmõjust Higgsi väljaga, kuigi teistmoodi vastastikmõjust kui kalibratsioonibosonid.

Huvitav paralleel. Vastastikmõju gravitatsiooniväljaga annab kehadele kaalu, vastastikmõju Higgsi väljaga – massi.

Ja lõpuks, 1971. a näitas siis veel väga noor teadlane Gerardus t’Hooft [14], et vahebosonite masside genereerimisel sümmeetria spontaanse rikkumisega saadud elektronõrk teooria on renormeeritav. Selle näitamine ei olnud kerge ülesanne. Higgsi välja sissetoomisega lisanduvad „käega“ sisse pandud massidega teooria lõpmatuste reale veel analoogiline rida Higgsi väljadega seotud lõpmatustest. Keerukat arvutiprogrammi kasutades õnnestus näidata, et kahe lõpmatuste rea liikmed on samad, kuid erinevate märkidega, mistõttu nad summeeruvad nulliks.

TAVAPÄRATU TUGEV JÕUD

Püüame nüüd vastata tugeva jõu kalibratsiooniteooriat käsitledes esitatud küsimustele. Tugeva jõu tavapäratuse väljatoomiseks võrdleme teda tavapärasema, elektromagnetjõuga. Naaseme elektrilaengu vaakumis ümbritseva „virtuaalkasuka“ juurde. Laeng kiirgab ja neelab pidevalt virtuaalseid footoneid, mis vahepeal võivad muutuda virtuaalsete elektroni-positroni paarideks. Virtuaalpaarid on dipoolid, mille ühes otsas on positiivne, teises negatiivne laeng. Kui footonite kiirgajaks on elektron, tõmbab tema negatiivne laeng dipooli positiivset laengut enda poole ja tõukab negatiivset eemale. Elektronile lähemal olevad positiivsed laengud varjestavad emaelektroni laengut, nii et see paistab võrreldes „palja“ olekuga pisemana. Mida lähemalt elektroni vaadata, seda väiksem on varjestus (joonis 13) ja seda suuremana paistab tema laeng. Kui kaks „kasukaga“ laengut on teineteisele lähedal, on „kasukas“ nende vahel õhuke ja nad mõjuvad efektiivselt suurematena. Laengute kaugenemisel nende efektiivne suurus väheneb. Laengu mõõtmiseks „kombatakse“ teda teise laengu – proovilaengu – väljaga. Proovilaengu jõudmisel mõõdetava laengu lähedale tugevneb nendevaheline väli. Nii mõõdavad laengut lähedalt suure energiaga footonid, mis „näevad“ teda efektiivselt suuremana kui kaugelt „kompavad“ vähema energiaga footonid. Ülalöeldust selgub, et laengute vahelise kauguse asemel võib kasutada energiat ja väita, et elektromagnetjõu konstant on energia funktsioon ($\alpha = \alpha(E)$). See „konstant“ kasvab energia kasvades. Tema väärtus ($1/137$) on väärtus kohal $\alpha(0)$, mis tä-



Joonis 13.

hendab, et laengut on mõõdetud nullilähedaste energiatega footonitega. Energiarohkemate footonitega kompamine annab konstandile suurema väärtuse. See on katsega kindlaks tehtud fakt. Relativistlikus teoorias ei anta α sõltuvust mitte energia kaudu, mis pole kovariantne suurus, vaid neli-impulsi ruudu kaudu ($\alpha = \alpha(q^2)$). Asja see ei muuda, sest energia ja neli-impulsi ruut kasvavad ja kahanevad korraga.

Kuidas esitatud pilt matemaatika keelde panna? Feynmani diagrammi-keeles muudavad jõukonstandi energiast sõltuvaks meile juba tuttavad diagrammid, millel on elektroni-positroni silmustega virtuaalsed footonjooned. Jõukonstandi funktsionaalse sõltuvuse saamiseks tuleb kõiki seda tüüpi diagramme arvesse võtta. Arvutused annavad tulemuseks

$$\alpha(q^2) = \frac{\alpha(\mu^2)}{1 - \frac{\alpha(\mu^2)}{3\pi} \ln \frac{q^2}{\mu^2}}, \quad (35)$$

kus μ^2 on neli-impulsi ruut, mis on väiksem kui q^2 . Näeme, et q^2 kasvades muutub seose (35) parema poole nimetaja väiksemaks, mis tähendabki α kasvamist q^2 suurenemisel.

Milline pilt vastab ülaltoodule tugeva jõu teoorias? Siin kiirgavad ja neelavad värvilaenguga kvargid gluuoneid, mis sarnaselt virtuaalsete footonite muutumisega elektroni-positroni paarideks võivad vahepeal „elada“ kvargi-antikvargi paarina. Et aga ka gluuonitel on värvilaengud, on nende vahel omamõju, mistõttu virtuaalsed gluuonid võivad vastavalt joonisel 8 toodud vastastikmõjudele muutuda kas gluuoni-antigluuoni paarideks või kolmikuteks. Need kolm laetud gluuoni vahepealset eluvormi määravad värvilaengute varjestuse iseloomu ja sellega nende efektiivsed suurused.

Läinud sajandi 60-ndate teisel poolel tehtud katsed andsid arusaamatule tulemuse: kvarkide vaheline tugev jõud on väike kvarkide üksteisele lähedal olles ja kasvab kvarkide kaugenedes. See pani teadlased kukalt kratsima. Osa neist kahtles katseandmete õigsuses, teine osa süüdistas teooriat, mis ei suutnud katseandmeid põhjendada. Kuid peatselt tekkis siiski veendumus, et teooria tegemisel tuleb siin katseandmetest lähtuda. Lähtume ka meie. Kuidas seletada katsest saadut? Spekulatsioone on. Vaatame mõnda neist. Et gluuonitel on värvilaengud, siis neid välja kiirgav kvark peab muutma oma värvilaengu värvi. Kuigi kvark neelab gluuoneid tagasi, jääb pideva kiirgamise ja neelamise protsessis osa tema värvilaengust teda ümbritsevasse värvipilve. Kvargi esialgse vär-

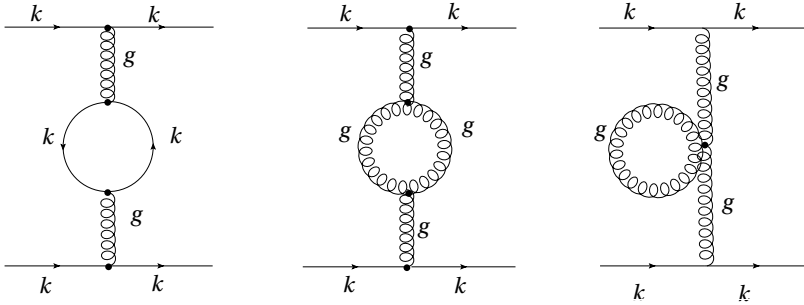
vilaengu värv on jagatud kvargi ja tema ümber oleva värvipilve vahel. Et tunda kogu kvargi värvilaengu mõju, peab kvargist kaugemale minema. Kvargile lähemale tulles jääb osa värvipilvest „selja taha“, jättes toimima vaid eespool oleva värvipilve osa, mistõttu kvargi värv kahvatub – tema efektiivne laeng kahaneb. Värvilaeng „jookseb“ elektrilaenguga vastupidi – suureneb kvarkide kaugenedes ja väheneb lähenedes.

Teine, veidi konkreetsem põhjendus. Gluonite omamõju tõmbab gluuonvälja kvarkide vahel kokku. Kvarkide kaugenedes muutub gluuonväli nende vahel järjest kitsamaks, kuni temast saab „pael“. „Paela“ potentsiaalne energia on võrdeline „paela“ pikkusega. Niisugusele potentsiaalsele energiale vastav jõud ei kahane kauguse kasvuga, vaid jääb konstantseks. Konstantne jõud ei lase kvarke vabaks: ükskõik kui kaugemale kvargid üksteisest tõrjutakse, jääb alati nende vahele konstantne jõud⁴. Sellepärast ei pääsegi kvargid hadronitest välja, millist nähtust nimetatakse kvarkvangistuseks. Valime hadroniks mesoni – kvargi ja antikvargi seotud seisundi. Kui mesonit väga kõrge energiaga osakesega pommitada, annab see ühele tema kvarkidest „põraka“ ja too hakkab liikuma mesoni „ääre“ poole. Ääreni jõudes on gluuonvälja pael tema ja teise kvargi vahel veninud niivõrd pikaks, et tema energiast piisab uue kvargi-antikvargi paari tekitamiseks. Nüüd ühineb ääreni jõudnud kvark uuest kvargipaarist tema suhtes antikvargiga ja pääseb niisuguse hadroniseerumisprotsessi tulemusena värvitu mesoni koostisosana esialgsest hadronist välja. Kui „põrakas“ oli väga suur, jätkab järelejäänud kvark loodud paarist ääre poole liikumist ja gluuonvälja „pael“ pikenemist, kuni toimub jälle hadroniseerumisprotsess ja teine hadron väljub esialgsest ja nii edasi. Protsessi tulemusena tekivad hadronite joad. Nende avastamine katses kinnitas spekulatsiooniga ennustatud.

Värvilaengute väga väikeste vahemaade korral on laengute efektiivsed väärtused niivõrd pisikesed, et jõud nende vahel annab vähe tunda. Kvargid tunnevad end peaaegu vabadena. Sellist nähtust nimetatakse asümptootiliseks vabaduseks.

Kas toodud piltlikke spekulatsioone toetab ka täpne matemaatiline käsitlus? Loomulikult ei saa toodud igapäevapiltidele toetuvad spekulatsioonid vastata adekvaatselt kvantväljateoreetilistele käsitlustele. Kuid möödunud sajandi 70-ndate aastate alguses näitasid USA teadlased Gross, Wilczek ja Politzer [15,16], et tugev laeng „jookseb“ tõepoo-

4 Kaugused, millest jutt, on loomulikult mikromaailma kaugused, siin tugeva jõu ulatus.



Joonis 14.

lest vastupidi elektrilaenguga. Nad lähtusid kvargi- ja gluonisilmustega diagrammidest.

Joonisel 14 on ära toodud sellised diagrammid häiritisarvutuse teises järjus, kõrgemates järkudes silmuste arv gluonjoontel kasvab. Võttes kokku kõik silmustega diagrammid, jõudsid need teadlased valemile

$$\alpha_t(q^2) = \frac{\alpha_t(\mu^2)}{1 - \frac{\alpha_t(\mu^2)}{12\pi}(2n_k - 11n_v) \ln \frac{q^2}{\mu^2}}. \quad (36)$$

Otsustavat rolli mängib valemis tegur $2n_k - 11n_v$, kus n_k on erinevate kvarkide koguarv ja n_v värvilaengute arv. Mida rohkem on kvarke, seda enam on kvargisilmustega diagramme, mida suurem on värvilaengute arv, seda enam on gluonisilmustega diagramme.

Valem (36) näitab, et kvargipaari silmustega diagrammide efekt on siin sama, mis elektroni-positroni paari silmustega diagrammidel kvant-elektrodünaamikas: nende mõjul α_t suureneb q^2 kasvades ja väheneb q^2 kahanedes. Gluonisilmustega diagrammide mõju on vastupidine. Nende tõttu α_t väheneb q^2 kasvades ja suureneb q^2 kahanedes. Standardmudeli järgi on olemas 6 kvarki ja 3 värvilaengut, mis annab $2n_k - 11n_v = -21$. Järelikult prevaleerivad gluonisilmustega diagrammid, mistõttu tugeva jõu laengud ja nendest ehitatud konstant „jooksevad“ tagurpidi elektrilaengu ja elektromagnetjõu konstandiga. Sellest siis ka katsest leitud tavatu fakt tugeva jõu kasvust distantsi kasvamisega kvarkide vahel ja asümptootiline vabadus väikeste vahemaade korral.

Suurte q^2 väärtuste korral on α_t palju väiksem kui 1 ja kvantkromodünaamikas saab kasutada sarnaselt kvantelektrodünaamikale häiritus-

arvutust. Selles piirkonnas on kvantkromodünaamika soliidne teadus, mis võimaldab kuitahes täpselt protsesse arvutada. Neli-impulsi ruudu kahanedes kasvab α_s nii suureks, et edasi saab kasutada vaid mittehäirituslikke mudeleid. Ka nende arendamisel on saavutatud mõningat edu.

NÕRK JÕUD JA DISKREETSSED SÜMMEETRIAD

Siin vaatame Standardmudeli selle osa kujundamist, kuhu andsid oma panuse värsked nobelistid Kobayashi ja Maskawa. Nende teeneks on läinud sajandi 70-ndate alguses veel teadmata kvarkide ennustamine ja nende olemasolu baasil teooria loomine, mis selgitas katsest leitud ühe diskreetse sümmeetria rikkumist. Soodne pinnas nimetatud teooria arenemiseks valmistati ette juba mõnda aega enne nende vastava uurimistööga alustamist, pärast seda, kui loomulik arvamus, et kõigi nõrga jõu protsesside intensiivsuse määrab üks ja sama nõrga jõu konstant, sai katselise tagasilöögi. Katse näitas, et nõrga jõu lagunemisprotsessid, kus osalevad hadronid, toimuvad väiksema intensiivsusega kui vaid leptonite osalemisel toimuvad lagunemisprotsessid. Näitena võiks tuua vastavalt neutroni ja müüoni lagunemised. Sellest võis järeldada kahe nõrga jõu olemasolu. Itaalia teadlane Nicola Cabibbo näitas, et kui tuua teoriasse üks nurk (Cabibbo nurk!), saab piirduda vaid ühe nõrga jõu konstandiga. Cabibbo põhjendas oma nurgateooriat enne kvarkmodelite loomist. Nüüd on seda kvarkide tasemel kergem teha. Nagu tabelist 1 näha, jaotuvad alusosakesed perekondadesse ning iga perekond koosneb leptonipaarist ja kvargipaarist. Cabibbo teooriast tulenevalt pole ühes perekonnas toodud kvargid mitte puhtas olekus, vaid erinevates perekondades olevate kvarkide kvantmehhaanilised segud. Võib näidata, et teooria viib samale tulemusele, kui ainult alumise rea kvargid on üksteise segud.

Kui oleks kaks perekonda, nagu võis oletada 1970-ndate aastate alguses, mil olid leitud esimese perekonna kvargipaar ja teisest vaid s -kvark, aga c -kvark juba ennustatud, võib esimese perekonna d -kvargi asemel kirjutada

$$d' = d \cos \theta_c + s \sin \theta_c \quad (37)$$

ja teise perekonna s -kvargi asemel

$$s' = -d \sin \theta_c + s \cos \theta_c. \quad (38)$$

Kui nüüd u -kvark kiirgab W^- -bosoni, muutub ta $\cos \theta_C$ -ga määratud tõenäosusega d -kvargiks ja $\sin \theta_C$ -ga määratud tõenäosusega s -kvargiks. Esimesele juhule vastab kvarktasandil protsess $u \rightarrow d + e^+ + \nu_e$, teisele $u \rightarrow s + e^+ + \nu_e$. Vabas olekus poleks need protsessid energeetiliselt lubatud, seotud seisundites aga küll. Kuid kvargid ongi ju alati seotud. Cabibbo nurka saab katsest määrata, see on umbes 13° . Siit on näha, et esimene protsess toimub hoopis suurema tõenäosusega kui teine. Kuid analüüsist selgub, et kui esimese protsessi intensiivsusele lisada teise protsessi oma, annavad need kokku puhtalt leptonite protsessi intensiivsuse. Seda seetõttu, et eri perekondade leptonid ei segune ja nõrgad W^\pm vahetamisega protsessid toimuvad vaid ühe perekonna leptonite vahel.

Kahte toodud kvarkide segu võib kokku võtta kasutades unitaarset Cabibbo maatriksit U :

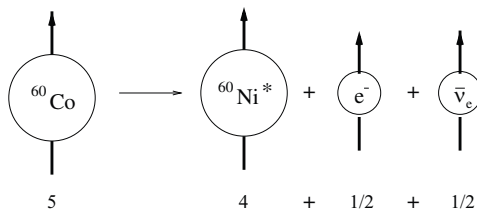
$$\begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}' = U \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}, \quad \text{kus } U = \begin{pmatrix} \cos \theta_C & \sin \theta_C \\ -\sin \theta_C & \cos \theta_C \end{pmatrix}. \quad (39)$$

Niipalju värskele nobelistidele ettevalmistatud pinnasest.

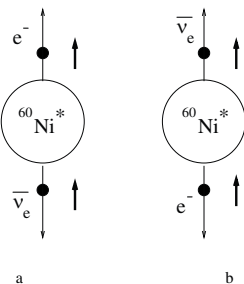
Nüüd diskreetsetest sümmeetriatest. Diskreetsed teisendused erinevad pidevatest selle poolest, et neid ei saavutata kaduvväikeste muudatuste summeerimisel, vaid ühekorraga. Tähtsad diskreetsed teisendused on paarsus-, laengu- ja ajateisendused, inglisekeelsete sõnade esitähete järgi vastavalt P-, C- ja T-teisendused. Meie loo seisukohalt on olulised P-, C- ja kombineeritud CP-teisendused. Tugev ja elektromagnetjõud on nende teisenduste suhtes sümmeetrilised, aga nagu selgub, rikutakse kõikides nõrga jõu protsessides P-sümmeetriat, ja mõnedes ka CP-sümmeetriat. Paarsusteisendust kutsutakse tihti ka ruumipeegelduseks, kuid tegelikult ei ole need teisendused identsed, vaid ekvivalentsed P-sümmeetria uurimise seisukohalt. Ruumipeegeldus peegeldab ruumi vaid ühes tasapinnas, paarsusteisenduses muudavad märki kõik kolm ruumikoordinaati, millele vastab peegeldus kolmes omavahel ristivas tasandis. Võib aga näidata, et kui üks ruumipeegeldus on tehtud, saab kaks ülejäänut ruumipöörete abil. Et kõik protsessid on sümmeetrilised ruumipöörete suhtes, võibki ruumi peegelduse ühes tasapinnas võtta paarsusteisendusega ekvivalentseks. Kui mingite esemete või protsesside peegelpildid kujutavad ka võimalikke esemeid või protsesse looduses, siis on tegu P-sümmeetria säilimisega. Nii muutub peegeldusel parema vindiga kruvi vasakvindiliseks, kuid ka neid saab valmistada ja

valmistataksegi. Kui slaide näidates vahetame kogemata nende vasaku ja parema poole, näitab slaid seal olevat inimrida vasakult paremale luges teises järjekorras, kui nad foto tegemisel olid. Aga ka selline rida on võimalik. Kui keegi liigub peegli poole, tuleb peegeldus talle vastu. Kuid ka selles suunas võib liikuda.

Vaatame nüüd mõnede suuruste suhet peegeldusega. Vektoreid on kahte sorti: ühed, tavavektorid ehk lihtsalt vektorid, muudavad peegeldamisel märki, teised, aksiaal- ehk pseudovektorid ei muuda. Pseudovektor on näiteks pöördimpulss $\vec{l} = \vec{r} \times \vec{p}$. Ka spinn on pseudovektor. Kaheks jaotuvad ka skalaarsed suurused: skalaar ei muutu peegeldusel, pseudoskalaar muudab märki. Mikromaailmas kirjeldab osakest lainefunktsioon, mis sõltub kas kooha- või impulsivektori koordinaatidest, mis muudavad peegeldusel märki. Kui P-teisendusel lainefunktsioon jääb muutumatuks, on talle vastava osakese paarsus +1, kui muudab märki, siis -1. Paarsussümmeetria muutus aktuaalseks 1950-ndatel aastatel, kui uuriti nn veidrate osakeste lagunemisprotsesse. Veidrus on mõnede hadronite kvantarv (laeng), mis on jääv tugeva ja elektromagnetjõu mõjul toimuvates protsessides, kuid mille jäävust rikutakse nõrkades lagunemistes. Kahel mesonil, mida kutsuti τ - ja θ -osakesteks, olid ühed ja samad omadused. Oli ainult üks suur erinevus: τ -osake lagunes kolmeks, θ -osake aga kaheks π -mesoniks (piioniks). Protsess on invariantne P-teisenduse suhtes, kui algosakese paarsus on sama mis lõpposakeste kogupaarsus. Mitme osakese paarsus saadakse üksikosakeste paarsuste korrutamisel. Selleks ajaks oli teada, et piionid on pseudoskalaarid, seega negatiivse paarsusega. Siit järeldus, et kolme piioniga lõppoleku paarsus on -1 ja kahe piioniga lõppoleku paarsus +1 ning τ ja θ peavad olema eri osakesed, esimene negatiivse, teine positiivse paarsusega. Teist võimalust, et τ ja θ on üks ja sama osake, kuid protsessis rikutakse paarsust, esialgu ei arutatudki. Praegu teame, et τ ja θ näol on tegemist ühe osakesega - nüüdse nime järgi laetud K-mesoni ehk kaaoniga. Tol ajal hakkas see teatavaks saama siis, kui kaks USA-s Columbia Ülikoolis töötavat noort hiina füüsikut Lee ja Yang hakkasid uurima, kas nõrga jõu teoorias on üldse paarsuse jäävust kontrollitud. Nad pöördusid sama ülikooli hiinlannast eksperimentaatori Wu poole, kellel oli täielik komplekt kõigist seni tehtud nõrga lagunemisprotsessi eksperimentidest. Uurinud komplekti, jõudsid Lee ja Yang hämmastava tulemuseni: paarsuse sümmeetriat pole seni tehtud katsetega uuritud ega saadudki uurida. Nad kirjutasid sellest ajakirja „Physical Review“



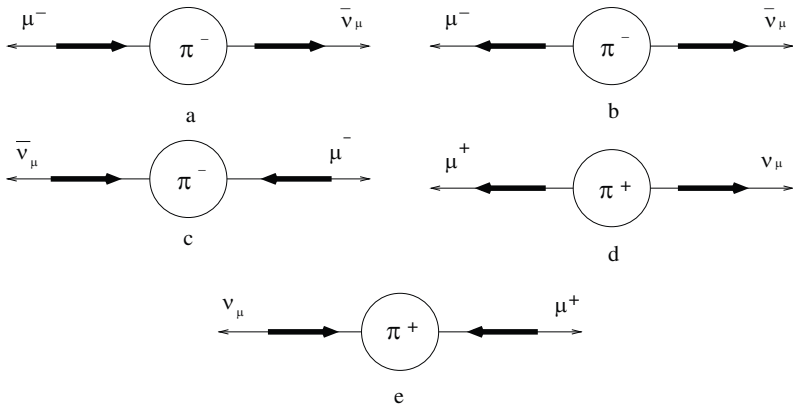
Joonis 15.



Joonis 16.

artikli [17], milles näitasid ka, milliste eksperimentidega saab paarsuse rikkumist nõrga jõu protsessides kindlaks teha. Veel enne, kui artikkel 1956. aastal ajakirja suunati, hakkas Wu eksperimentidega peale. Katseks läks vaja β -lagunevat spinniga tuuma (valis ^{60}Co) ja selle spinnid tuli polariseerida – valdavalt ühte suunda pöörata. Nii tehtud, näeb koobalti lagunemispilt välja, nagu joonisel 15 toodud. Osakesi kujutavate ringide all on nende spinnide suurused ja noolega on märgitud spinnide suunad, mille korral on spinnid protsessis nõutavalt jäävad. Täpne nikli tuuma juures tähendab ergastatud seisundit. Koobalti lagunemisel on tuumast väljuvate osakeste impulsid valdavalt paralleelsed koobalti spinniga. Seetõttu on pärast ematuuma lagunemist osakestepilt selline, nagu toodud joonisel 16. Keskel on protsessis praktiliselt liikumatuks jäänud nikli tuum, elektronid ja antineutriinod liiguvad üks üles ja teine alla. Liikumissuunad (impulsid) on toodud peenikeste nooltega, spinni suunad paksude nooltega. Wu uuris elektronide väljumissuundi ja tuvastas, et neid väljub koobalti spinniga vastassuunas rohkem kui spinni suunas. See tähendab, et protsessis osaleb elektron, mille spinn on tema liikumisele valdavalt vastassuunas. Kui teeme peegelduse osakeste liikumissihiga risti oleva tasandi suhtes, muutub elektroni impulsi suund, kuid säilib spinni suund. Peegelpildis väljuvad elektronid valdavalt koobalti spinni suunas ja nende spinnid on päripidi impulsi suunaga. Paarsus oleks jääv, kui elektrone spinniga impulsi suunas oleks sama palju kui elektrone spinniga impulsi vastassuunas. Aga katse näitab, et nii see ei ole – protsessis on rikutud paarsust.

Hiljem selgus, et nõrgas lagunemises tekkinud osakestel (e^- , ν_e , μ^- , ν_μ jt) on spinn valdavalt impulsile vastassuunas, antiosakestel (e^+ , $\bar{\nu}_e$, μ^+ , $\bar{\nu}_\mu$ jt) pärisuunas. Mõlemal juhul on polarisatsiooniaste võrdne v/c , kus v on osakese ja c valguse kiirus. Nii on massita, valguse kiirusega liiku-



Joonis 17.

vatel neutriinodel spinn alati impulsiga vastas- ja antineutriinodel pärisuunas. Nüüd on paarsuse rikkumine ilmne: liikumisele ristasandis peegeldamine annab impulsiga pärisuunas spinniga neutriino ja vastassuunalise spinniga antineutriino, mida looduses ei ole. Massiga osakestel ja antiosakestel võib spinn ka „vales“ suunas olla: osakestel impulsiga päri-, antiosakestel vastassuunas. Vahel ei saagi „õige“ spinniga osake protsessides tekkida: spinni jäävus keelab ära. Vaatame piioni lagunemist $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$. Spinnita piioni paigal olles lendavad μ^- ja $\bar{\nu}_\mu$ vastassuundades. Antineutriino spinn on alati impulsi suunas. Kui müüoni spinn oleks „õige“ suunaga, kujutaks protsessi joonisel 17a toodud pilt, kus peenemalt on antud impulsside ja paksemalt spinnide suunad. Kuid spinni jäävus keelab sellise protsessi, kus algosakese spinn on 0 ja lõpposakeste koguspinn 1. Protsess saab toimuda vaid siis, kui müüoni spinn on „vales“, impulsiga samas suunas (joonis 17b). Seda lubab müüoni mass. Aga joonisel 17b kujutatud protsessis rikutakse paarsust, sest selle peegelpildile (peegel risti liikumissihile) vastavat protsessi (joonis 17c) ei ole: massita $\bar{\nu}_\mu$ -l võib spinn olla vaid impulsisuunaline.

Pöördume tagasi Wu katse juurde. Kuigi see näitas paarsuse jäävuse rikkumist, kahtles Wu katsetulemustes. Kerkis ka küsimus, kas rikkumine on ainult tuumade β -lagunemistes või ka teistes nõrga jõu protsessides. Nende küsimuste arutamisel Columbia Ülikooli teadlaste vahel tuli siis veel noor teadlane, hilisem Nobeli preemia laureaat Leon Lederman mõttele uurida paarsuse jäävust just ülal analüüsitud piioni lagunemisel.

Tol ajal kõike ülaltoodud veel ei teatud, küll aga saadi aru, et polariseeritud, valdavalt ühesuunaliste spinnidega müüonite tekkimine protsessis tähendab paarsuse rikkumist. Columbia Ülikooli kiirendi produtseeris piisavalt piioneid ja ainult mõne päeva töö tulemusena (*sic!*) oli tulek käes – müüonid osutusid polariseerituiks, protsessis rikuti paarsuse jäävust. Nüüd oli asi kindel ja kaks gruppi avaldasid oma töö tulemused kirjadena ühes ja samas Physical Review numbris [18,19].

Kui ei kehti P-sümmeetria, ei kehti ka sümmeetria laenguteisenduse ehk teaduskeeles laengulise konjugeerimise C suhtes. Laenguteisendus muudab kõik osakese laengutüüpi suurused (elektri- ja värvilaengud, lepton- ja barüonarvud, veidrus jpt) vastasmärgiliseks, konjugeerimata jääb vaid spinn. Selline teisendus muudab osakese tema suhtes anti-osakeseks. Rakendame nüüd protsessile joonisel 17b laenguteisendust. Selle tulemusena saame protsessi joonisel 17d, mis pole lubatud, sest impulsisuunalise spinniga v_μ ei eksisteeri. Protsessis rikutakse C-sümmeetriat. Teadlaste jaoks olid sellised sümmeetria rikkumised nõrkades protsessides harjumatud, sest elektromagnetjõu ja tugeva jõu protsessid säilitasid need sümmeetriad. Tolleaegne tuntud nõukogude teooriafüüsik Lev Landau arutles järgmiselt. Tugev ja elektromagnetiline jõud säilitavad nii P- kui C-sümmeetria. Olgu nii, et nõrk jõud rikub neid sümmeetriaid eraldi, kuid säilitab kombineeritud sümmeetria CP, kus paarsuse- ja laenguteisenduse operaatorid rakendatakse üksteise järel.

Nii see paistabki olevat. Rakendame protsessile joonisel 17d, mis oli tekitatud C rakendamisega joonisel 17b olevale protsessile, P-teisendus. Kuna kombineeritud teisendused ei sõltu üksikteisenduste järjestusest, oleme sellega viimatimainitud protsessile rakendanud CP teisendus. P-teisenduse rakendamine muudab joonisel 17d oleva protsessi joonisel 17e antud protsessiks, mis on lubatud ja mille tõenäosus on võrdne joonisel 17b toodud protsessi omaga.

Tollal võis näidata, et kõik seni hästi uuritud nõrga jõu protsessid säilitavad CP-sümmeetria. Kuid sellest ajast algas huvi ka CP-sümmeetria võimaliku rikkumise vastu mõnedes veel uurimata protsessides. Kummalised olid neutraalsed K^0 -mesonid (neutraalsed kaonid) ja nende antiosakesed \bar{K}^0 . Need lagunesid kord kaheks, kord kolmeks piioniks, kusjuures kaheks piioniks umbes 1000 korda kiiremini kui kolmeks. See viis arvamusele, et K^0 ja \bar{K}^0 pole muud kui kaks erinevat kvantmehaanilist segu K_S^0 - ja K_L^0 -osakestest, millest esimese eluiga on lühike ja teisel palju pikem:

$$K^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (K_S^0 + K_L^0), \quad \bar{K}^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (K_S^0 - K_L^0). \quad (40)$$

Kuid siis on võimalikud ka vastupidised segud:

$$K_S^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 + \bar{K}^0), \quad K_L^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 - \bar{K}^0). \quad (41)$$

Nagu nägime, võisid osakesed olla P-paarsed või P-paaritud (vastavalt $P = 1$ või $P = -1$), sõltuvalt sellest, kas P-teisendus muutis osakese lainefunktsiooni märki või mitte. Analoogiliselt võivad osakesed olla ka kas CP paarsed või paaritud, sõltuvalt sellest, kas CP-teisendus muudab või ei muuda lainefunktsiooni märki. Aga erinevalt P-sümmeetriast pole enamikul osakestest ja osakeste süsteemidest CP-paarsus üldse määratud. Ka K^0 ja \bar{K}^0 on kindla CP-paarsuseta: CP-teisendus muudab K^0 -mesoni tema antimesoniks \bar{K}^0 ja vastupidi. Valemist (41) on näha, et K_S^0 ja K_L^0 on kindla CP-paarsusega. Esimesel on see $+1$, teisel -1 . Kuidas avastada CP-rikkumist kaaonite lagunemisel? Tuleb tekitada kas K^0 - või \bar{K}^0 -mesoneid ja uurida nende lagunemisprodukte. Et teatud kaugusel kaaonite tekkekohast jõuab K^0 -i segus (40) olev lühiealine komponent täielikult laguneda, jääb järele ainult pikaealine komponent, mistõttu kaugemal ei saa K^0 enam kaheks piioniks laguneda. 1964. aastal ilmus ajakirjas „Physical Review Letters“ artikkel, mille autorid Cronin, Fitch jt [20] esitasid ootamatuid katseandmeid pikaealise komponendi K_L^0 lagunemisest kaheks piioniks. Kuigi efekt oli vaevumärgatav – vaid umbes kaks tuhandikku kõigist Brookhaveni kiirendil tekkinud ja identifitseeritud K_L^0 -osakestest lagunesid kaheks piioniks. Väga väike rikkumine, kuid siiski olemas.

Oli teada, et peale ainult piioniteks lagunemise laguneb K_L^0 umbes sama tõenäosusega ka piioniks ja leptonpaariks

$$\begin{aligned} K_L^0 &\rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e, \\ K_L^0 &\rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e, \end{aligned} \quad (42)$$

pluss analoogsed lagunemised, kus e^\pm asemel on μ^\pm ning $\bar{\nu}_e$ ja ν_e asemel $\bar{\nu}_\mu$ ja ν_μ . 1967. aastal avastati, et ka nendes protsessides rikutakse CP-sümmeetriat. CP-teisendus viib ülemise protsessi alumiseks. CP-sümmeetria kehtimiseks peaksid mõlemad protsessid toimuma võrdse tõenäosusega. Katse näitas, et K_L^0 laguneb positroniks sagedamini kui elektroniks,

kuigi tõenäosused erinevad vaid mõne tuhandiku võrra. Toodud protsessid annavad konventsioonivaba definitsiooni negatiivsele ja positiivsele elektrilaengule. Negatiivne on laeng, mida kannavad K_L^0 lagunemisel vähem tekitatud leptonid, ja positiivne, mida kannavad enam tekitatud leptonid. See viib ka absoluutsele aine ja antiaine eristamisele. Fakt, et CP rikkumine lubab osakeste ja antiosakeste ebasümmeetrilist käsitlust, toetab mõtet, et CP-rikkumise taga võibki olla aine domineerimine Universumis. Nii, nagu eespool mainitud, võis ühe diskreetse sümmeetria rikkumine luua Universumi, mille ühe planeedi peal võis miljardeid aastaid hiljem tekkida ja elada inimene.

Kuidas CP-rikkumist teooriaga seletada? Segud peavad veidi-veidi erinevama segudest (41). Et aga kaaonite segud on seotud kaaonite koostisosakeste – kvarkide – segudega, tuleks lahendust otsida Cabibbo segunemismaatriksist (39).

Kobayashi ja Maskawa uurisid probleemi ning tegid kindlaks, et CP rikkumiseks peab segunemismaatriksis olema elemente siduv kompleksne faas [21]. Matemaatika ütleb, et kahedimensionaalses Cabibbo segunemismaatriksis seda olla ei saa, see võib olla vaid kolmedimensionaalses segunemismaatriksis, mis eeldab kolme kvargipere olemasolu. Kobayashi ja Maskawa kolme kvargipere segusid määrav, peagi Cabibbo-Kobayashi-Maskawa nime saanud CKM maatriks sisaldab 3 segunemismurka ja neid siduva, CP-rikkumist põhjustava kompleksse faasi $e^{i\delta}$:

$$U_{CKM} = \begin{pmatrix} c_1 & -s_1 c_3 & -s_1 s_3 \\ s_1 c_2 & c_1 c_2 c_3 - s_2 s_3 e^{i\delta} & c_1 c_2 s_3 + s_2 c_3 e^{i\delta} \\ s_1 s_2 & c_1 s_2 c_3 + c_2 s_3 e^{i\delta} & c_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 e^{i\delta} \end{pmatrix}, \quad (43)$$

kus $s_1 = \sin\theta_1$, $c_1 = \cos\theta_1$ jne. Kompleksse faasi päritolu – mis jõud teda tekitab, on siiani teadmata.

Kobayashi ja Maskawa ennustatud kvargid avastataksegi, teine neist, top-kvark 20 aasta pärast. Tema leidmisega jäi Standardmudeli „loomaaia“ puudu vaid Higgsi boson. Teadlased loodavad, et Suur Hadronite Põrguti ka selle kinni püüab. Aga kui ei püüa? Siis jääb Higgsi teooria ka edasi hüpoteesiks, kuid üsna lahjaks hüpoteesiks, mis ei pruugi õige olla. Teadlased on juba ammu hakanud arendama ka „higgsivabu“ teooriaid.

2008. aasta Nobeli füüsikapreemia laureaatide koosseis on teadlaste-ringkondades põhjustanud vastakaid arvamusi. Nördinud on itaallased: miks ei saanud preemiat nurgaidee isa Nicola Cabibbo, vaid ainult tema avastuse edasiarendajad? Seda enam, et kuigi 2007. a füüsikapreemia läks eksperimentaatoritele, arvati preemia väljakuulutamise eel, et selle võiks saada teoreetikud – eelkõige Cabibbo, aga lisaks võiksid seda jagada veel Kobayashi ja Maskawa. Veelgi enam, nimetatud kolmikus Cabibbot „asendanud“ Nambu preemiat väärivatest artiklitest on oluline osa kirjutatud kahasse itaalia teadlase Giovanni Jona-Lasinioga [22], kellele samuti loorbereid ei ulatatud. Tõesti, itaalia teadlaste nõrdimus on põhjendatud. Võib arvata, et ka Cabibbo ise on sügavalt kibestunud, kuigi ta pole ühtki kommentaari andnud. Kuid mis parata, Rootsi Kuningliku Akadeemia otsus oli seekord niisugune.

Autorid tänavad Teet Ördi ja Piret Kuuske kasulike nõuannete eest.

KIRJANDUS

- [1] M. Gell-Mann, *Phys. Letters* 8 (1964), 214.
- [2] G. Zweig, *CERN Report* 8419/Th.412 (1964).
- [3] E. Fermi, *Nuovo Cim.* 11 (1934), 1.
- [4] S.H. Neddermeyer, C.D. Anderson, *Phys. Rev.* 51 (1937), 884.
- [5] E. Noether, *Nachr. d. König. Gesellsch. d. Wiss. zu Göttingen, Math-Phys.* (Klasse 1918), 235.
- [6] W. Heisenberg, *Zeitschrift für Phys.* 49 (1928), 619.
- [7] J. Bardeen, L.N. Cooper, J.R. Schrieffer, *Phys. Rev.* 108 (1957), 1175.
- [8] Y. Nambu, *Phys. Rev.* 117 (1960), 648.
- [9] P. Higgs, *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964), 508.
- [10] S. Glashow, *Nucl. Phys.* 22 (1961), 579.
- [11] S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.* 19 (1967), 1264.
- [12] A. Salam, *Weak and Electromagnetic Interactions*, in N. Svartholm: *Elementary Particle Theory, Proceedings of the Nobel Symposium Held 1968 at Lerum, Sweden* (1968) 367–377.
- [13] J. Goldstone, *Nuovo Cim.* 19 (1961), 154.
- [14] G. t’Hooft, *Nucl. Phys.* B35 (1971), 167.
- [15] D.J. Gross, F. Wilczek, *Phys. Rev. Letters* 30 (1973), 1343.
- [16] H.D. Politzer, *Phys. Rev. Letters* 30 (1973), 1346.
- [17] T.D. Lee, C.N. Yang, *Phys. Rev.* 104 (1956), 254.
- [18] C.S. Wu, E. Ambler, R.W. Hayward, D.D. Hoppes, R.P. Hudson, *Phys. Rev.* 105 (1957), 1413.
- [19] R.L. Garwin, L.M. Lederman, M. Weinrich, *Phys. Rev.* 105 (1957), 1415.
- [20] J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch, R. Turlay, *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964), 138.
- [21] M. Kobayashi, T. Maskawa, *Progr. Theor. Phys.* 49 (1973), 652.
- [22] Y. Nambu, G. Jona-Lasinio, *Phys. Rev.* 122 (1961), 345; *Phys. Rev.* 124 (1961), 246.

TŠESLAV LUŠTŠIK – 80

HENN KÄÄMBRE

TÜ Füüsika Instituut

14. veebruaril 2008 tähistas Tartu teadusüldsus Eesti TA akadeemiku prof Tšeslav Luštšiku 80ndat juubelit.

Tšeslav Luštšik on professor, Eesti elutööpreemia laureaat, Valgetähe ordeni kavaler.

Ta on sündinud 15. veebruaril 1928 Peterburis, tollases Leningradis, inseneri peres. Nooruki koolipõli ja tudengiiga möödus raskel ajal: sõda, Leningradi blokaad, evakuatsioon. Tal tuli mõnda aega töötada tehases. Leningradi ülikoolis füüsikat õppides ihkas ta spetsialiseeruda tuumafüüsikasse, kuid seda talle ei võimaldatud: päritolu polnud tollaste mõõdupuude järgi küllalt sobiv. Siis otsustas ta pühenduda luminesentsiuuringutele, temast sai hilisema Tartu Ülikooli rektori Feodor Klementi silmapaistvaim õpilane. Koos F. Klementiga siirdus ta Tartusse, mis jäigi tema kodulinnaks ja tööpaigaks.

Ta on viljakas teadlane, 3 monograafia autor või kaasautor, tema



Tšeslav Luštšik

pagasis on 365 teadusartiklit, ca 150 esinemist rahvusvahelistel või omaaegsetel üleliidulistel teadusnõupidamistel.

Ühtlasi on ta olnud usin uute füüsikateadlaste kasvataja-õpetaja: tema juhendamisel on kaitstud 50 kandidaadi-väitekirja, 20 dissertantidest on jõudnud ka füüsika-matemaatika doktori kraadini. Tartu Ülikoolis on ta aastaid pidanud erikursuste loenguid, nendega on ta esinenud ka Läti Ülikoolis ja Alma-Atõ Pedagoogikainstituudis.

Palju aastaid juhtis ta iganädalast FI/TÜ tahkisefüüsika seminari. Korraldas koos oma õpilase, kadunud prof Ilmars Vitolsiga iga-aastaseid 3–4-päevaseid Baltimaade kristallifüüsika ühisseminare, mis toimusid 1967–1990 vaheldumisi Eestis ja Lätis ja kus räägiti selgeks paljud jooksvad uurimisprobleemid.

Tšeslav Luštšik põlvneb Poola väikeaadlist (šlahtast). Vaarisa Feliksi saatsid tsaarivõimud osaluse eest Poola ülestõususes 1863 aastakümneiks asumisele Siberisse. Vanaisa Adami küüditasid 1941. aastal Siberisse omakorda nõukogude võimurid, kus ta peagi hukkus. Tema isa oli tuntud insener-arhitekt, elektrijaamade rajaja.

Füüsikud on ka juubilari abikaasa Natalja ja poeg Aleksandr, nüüdne TÜ professor ja FI laborijuhataja.

Juubilari põhilised uurimisvaldkonnad on olnud ionkristallide füüsika ja tahkiste kiiritusfüüsika. Praegu, juba kõrges eas, töötab ta koos



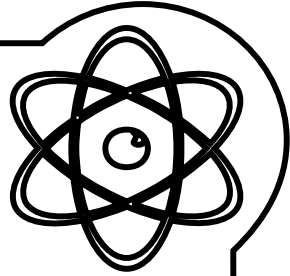
Feodor Klement ja Tšeslav Luštšik luminesentsilaboris end Struve majas (1954). Seinal F. Klementi õpetaja Aleksandr Terenini pilt.



Füüsikute perekond, paremalt Tšeslav Luštšik, abikaasa Natalia Luštšik, poeg Aleksandr Luštšik.

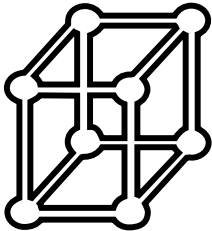
uurimiskaaslastega agaralt termotuumajõujaamades hädavajalike kiirituskindlate materjalide täiustamise/ arendamise kallal. Tema tarm ja mõtteselgus on imetletavad.

Tšeslav Luštšiku andam füüsikateaduse ja selle rakenduste arengusse Eestimaal on hindamatu.



**XXXVIII
EESTI FÜÜSIKAPÄEVAD**

**18. JA 19. MÄRTS 2008
TARTUS**



18.–19. MÄRTS 2008. A
TARTU ÜLIKOOLI FÜÜSIKAHOONE
SUUR AUDITOORIUM
TÄHE 4, TARTU

TEISIPÄEV, 18. MÄRTS

Avasõna	10:00
EFS preemiade üleandmine, aastapremia laureaadi ettekanne	
Enn Erme (Laser Diagnostics Instruments)	
Kõrgtehnoloogiliste laserseadmete arendamine ja tootmine. . .	10:10
Henn Käämbre, Raivo Jaaniso (TÜ)	
Elektroonikast spinntroonikasse	10:50
Jaak Aaviksoo (TÜ)	
Missugust kompetentsi vajab Eesti oma kaitsevõime	
tugevdamiseks	11:25
<i>Kohvipaus</i>	12:00
Arvo Kikas, Ergo Nõmmiste, Marco Kirm (TÜ)	
Uued suured uurimiskeskused Euroopas	12:15
Madis Kiisk (TÜ)	
ITER: arengud 2006-2007	13:20
Enn Realo (TÜ)	
Tuumaenergia taassünd: probleemid ja väljakutsed	13:40
<i>Kohvipaus</i>	
Kaido Reivelt	
Sessiooni avasõnad.	14:15
Alar Ainla (TÜ, Chalmers)	
Eesti füüsikamaastik Rootsist vaadatuna.	14:20
Missugust rolli peaks kandma Eesti füüsika ja füüsik Eestis?	
Sõnavõttud Tartu Ülikooli, Tallinna Tehnikaülikooli ja	
Tallinna Ülikooli esindajatelt	
Diskussioon.	15:05
Transport Rehe hotelli	16:00
Eesti Füüsika Seltsi üldkogu	16:30
Eesti Füüsika Seltsi seltsiõhtu Rehe hotellis	18:00

KOLMAPÄEV, 19. MÄRTS

Akadeemilise füüsikaolümpiaadi võitjate autasustamine

**U. Hörrak, H. Iher, K. Komsaare, A. Mirme, A. Pugatšova,
J. Salm, E. Tamm, H. Tammet, M. Vana (TÜ)**

Eesti õhu kompleksuuringud Tahkuse õhuseirejaamas 10:15

PARALLEELSESSIOON**Alexey Romanov (TÜ, Ioffe Physico-Technical Institute)**

Physics and Mechanics of Disclinations and Solids 10:40

Matti Selg (TÜ)Supersümmeetrilise kvantmehaanika rakendusvõimalusi
pöörleva ostsillaatori energia omaväärtusprobleemi näitel 11:10**PARALLEELSESSIOON: MIDA ÕPETAJAD TAHAVAD**

Sissejuhatus 10:40

Ülle Kikas (HTM)

Ühest füüsika katsevahendite täiendamise initsiatiivist 10:45

Diskussioon 11:00

Stendisessioon, kohvipaus 11:45**ÜLDSESSIOON****Marko Reedik (REKK)**

Riigieksamist 12:15

Svetlana Ganina (KVÜÕA), Henn Voolaid (TÜ)

Füüsikaõppe efektiivsuse mõõtmine 12:35

Kaido Reivelt (TÜ, EFS)

Füüsika õpetamise virtuaalkeskonnad; LEGO NXT ja füüsika . 12:55

Piret Pohla-Asikainen, Ave Lauringson

(Tartu Kivilinna Gümnaasium, Tiigrihüppe SA)

Tänapäevane digitaalne andmehõive füüsikatunnis 13:15

*Lõunapaus***Peeter Saari (TÜ)**Iseenesest kiirenevad lainepaketid -
uudiseid laineoptikast 2007 14:15**Mart Noorma (TÜ)**

Kosmoseaasta 2007 14:40

Jaak Kikas (TÜ)

Törts torujuttu	15:20
Füüsikapäevade lõppsõna	15:45

STENDIETTEKANDED

Toomas Kübarsepp, Viktor Vabson (AS Metrosert)

FP7 projekt qu-Candela

Toomas Kübarsepp, Priit Jaanson, Riho Vendt, Viktor Vabson (AS Metrosert), Mart Noorma (TÜ)

Kiirgustermomeetria toatemperatuuril

R. Pärna¹, V. Kisand¹, E. Nõmmiste¹, A. Kikas¹, M. Valden², M. Hirsimäki² ja M. Lampimäki² (¹ TÜ FI, Surface Science Laboratory, ² Tampere University of Technology)

Investigation of oxidation of austenitic stainless steel

Jaan Salm (TÜ)

Aerosooli nukleatsioonipuhangu modelleerimine

Aleksandr Lissovski, Aleksei Treštšalov (TÜ FI)

Spatial-time modulations in VUV-VIS emission of high pressure pulsed volume discharge in argon

Kaupo Komsaare, Urmas Hõrrak, Hannes Tammet, Devandraa Siingh, Aadu Mirme (TÜ)

Nukleatsioonipuhangute klassifikatsioonist aeroioonide liikuvusjao- tuse mõõtmistulemuste alusel Tahkuse õhuseirejaamas

Andre Lipand, Mart Noorma (TÜ)

Õpilaste kaasamine klikkerite abil

Alo Peets, Mart Noorma, Silver Lätt, Alvo Aabloo, Kaupo Voormansik (TÜ)

Reaalaja tagasiside süsteemi väljaarendamine õppeprotsesside kvaliteedi tõstmiseks

Kristi Valdmets^{1,2}, Ilmar Ansko^{1,2}, Anu Reinart² (¹TÜ, ²TO)

Effect of calibration uncertainty and spectral band location to modeled remote sensing reflectance

ÕHU KOMPLEKSUURINGUD TAHKUSE ÕHUSEIREJAAMAS

HILJA IHER

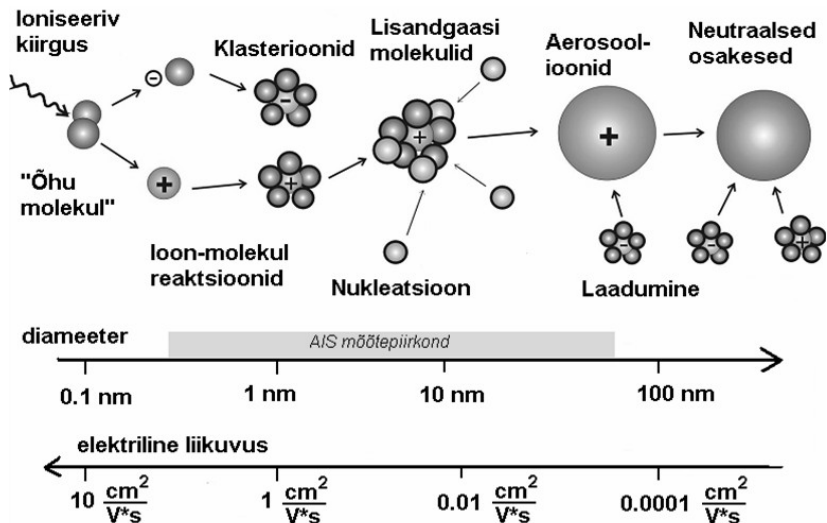
TÜ Füüsika Instituut

Õhuta pole elu!

SISSEJUHATUSEKS

Looduslik õhk iga ruumipunkti ümbruses on väga keeruline avatud süsteem, kus kokkupõrkuvate osakeste vahel toimuvad pidevalt mitmesugused füüsilised ja keemilised protsessid. Meid ümbritseva õhu kvaliteedi eest vastutavad väikese kontsentratsiooniga, aga keemiliselt aktiivsed liisandgaasid ja õhus pidevas arenemises olevad mitmesugused molekulidest suuremad osakesed: väikesed (läbimõõt $d < 1,5$ nm) elektrilaenguga osakesed – kerged e. klaster(aero)ioonid – ja suuremad aatomite-molekulide kogumid – aerosooliosakesed, mis võivad ka laetud olla, moodustades keskmisi ($d = 1,5 - 7$ nm) ja raskeid ($d > 7$ nm) aeroioone.

Aeroioonide ja aerosooliosakeste uurimisega Tartu Ülikoolis alustati XX sajandi kolmekümnendatel aastatel (Anatoli Miti magistritöö). Hiljem võimaldas Jaan Reineti organiseerimisanne õhuelektri alaste uurimiste juurde kaasa tõmmata andekaid noori, mistõttu 1964. aastal õnnestus luua Aeroionisatsiooni ja Elektroaerosoolide Probleemlaboratoorium (AEL). 1983. aastal asus laborit juhutama Hannes Tammet ja labori nimeks sai Aeroelektrilabor (AEL). Tol ajal oli labori töö põhisuunaks aeroioonide ja aerosoolide mõõtmisaparatuuri arendamine ja loodud aparatuuri kasutamine lühiajalistel mõõtmistel, enamasti laboritingimustes, ning aparatuuri valmistamine tellijatele.



Joonis 1. Ioonide evolutsioon atmosfääris (AIS – aeroioonide spektromeeter).

1984. aastal toimusid esimesed aeroioonide liikuvusspektri mõõtmised Sepa talus Tahkuse (praeguse nimega Tohera) külas Pärnumaal. Neile järgnenud kahe tosina aasta jooksul on vastavalt võimalustele kogu laboripere entusiastlikul kaasalöömisel arendatud mõõtmiskompleks, mis on õhuelektri uurijate hulgas hästi tuntud kui Tahkuse õhuseirejaam. Pidevate mõõtmiste algusest Tahkusel möödus 2008. aasta suvel 20 aastat. Sellega seoses tutvustatakse käesolevas kirjutises väga põgusalt Tahkuse õhuseirejaama loomist, arendamist ja rolli õhu kvaliteeti oluliselt mõjutavate osakeste uurimisel Tartu Ülikoolis ning tuuakse üksikud viited hõlbustamaks lähemat tutvumist antud teemaga. Ligi veerand sajandit kestnud väga paljude inimeste ühistööd Tahkuse õhuseirejaama arendamisel, mis baseerub õhuelektri umbes kolmveerand sajandit kestnud uuringutele Tartu Ülikoolis, ei ole võimalik ammendavalt kirjeldada üheski kirjatükis.

MIKS JA MIDA UURITAKSE

Õhk ja selles leiduv määrab suuresti inimeste elukvaliteedi Maal.

Normaaltingimustes sisaldab 1 m³ õhku merepinna tasemel ligi 1300 g põhigaase (N₂, O₂, Ar), vett pikaajalise globaalse keskmisena 10 g, teisi gaa-

silisi lisandeid 0,5 g ja aerosooliosakesi ligikaudu 50 mg, sealhulgas osakesi, mille diameeter on väiksem kui 10 μm , ligikaudu 100 μg . Sellel tühisel masiosal (lisandgaasid ja aerosooliosakesed) on aga oluline roll atmosfääris toimuvates füüsikalistes ja keemilistes, ent ka bioloogilistes protsessides.

Et otsustada, kui võrd inimeste tiheasustus muudab õhu kvaliteeti ja kui võrd ning kuidas seda parandada saab ja mis üldse õhus toimub, on tarvis tundma õppida õhus toimuvaid protsesse ja teada lisandite olemasolevat fooni. Loodusliku fooni all mõistetakse õhulisandite kontsentratsiooni inimtegevusest ja looduskatastroofidest mõjustamata aladel ja ajal. Tänapäeval saab (tinglikku) fooni mõõta vaid inimtegevusest vähe mõjustatud aladel. Viimasega, eriti aeroioonide ja aerosooliosakeste fooni mõõtmise- ga, on Tahkuse õhuseirejaamas juba kaks tosinat aastat tegeldud.

Õhus hõljuvad aerosooliosakesed

- 1) mõjutavad otseselt sissehingatava õhu kvaliteeti (ilmekas näide on sudu),
- 2) mõjutavad ilma, sest nad on kondensatsioonitsentriteks udu- ja pilvetilkadele, seega osalevad ka sademete tekkimisel (sageli jälgitav näide on lennukijälgede tekkimine),
- 3) mõjutavad kliimat, sest neil endil ja nende poolt tekitatud pilvedel on väga suur osa selles, kui palju päikesekiirgusest neeldub ja hajib atmosfääris, s.t aerosooliosakestel on suur roll kliima kujundajatenä kasvuhoonegaaside kõrval.

Ilma ja kliimat mõjutavad põhiliselt lisandgaasidest nukleatsiooni- protsessides tekkivad sekundaarsed aerosooliosakesed, millede arengus on oluline roll klasterioonidel. Nukleatsiooniprotsesside uurimisel on AEL teadlaste panus väga suur ja sellele on mõõtmised Tahkusel tublisti kaasa aidanud.

ARENDAJAD

Et töö Tahkuse õhuseirejaamas on toimunud ja arenenud, on oma osakogu AEL perel läbi aegade (labori ametlikust nimest sõltumata).

Hannes Tammet, Eduard Tamm ja Jaan Salm kui labori pere staažikaimad liikmed on alusepanijad tõsiasjale, et atmosfäärielektri ja atmosfääriaerosooli uurimine Tartu Ülikoolis on jõudnud praegusele, selle ala uurijate hulgas autoriteeti omavale tasemele maailmas. Neil kõikidel on väga suur panus ka Tahkuse mõõtmiskompleksi arendamisel ja saadud

mõõtmistulemuste tõlgendamisel, mis kajastub paljudes teadusartiklites. Idee alustada Tahkusel mõõtmisi 1984. aastaks kujunenud oludes on pärit Hannes Tammetilt, kelle panus Tahkuse mõõtekompleksi arendamise ja mõõtmistulemuste tõlgendamisse on olnud läbi aja määrama tähtsusega. See idee avardas omakorda AEL uurimistöö temaatikat – AEL-s loodud ja üle maailma atmosfäärielektri uurijate seas hinnatud aparatuuri hakati kasutama pidevatel foonimõõtmistel Eestis ja neid mõõtmistulemusi ka analüüsima. Saadud teadmisi sai arvestada edasises aparatuuri arendustöös (praeguseks ajaks on Tartus loodud aparatuuri kasutust leidnud juba pea kõikidel kontinentidel ja lennukilgi).

Esimestel aastatel tegeles Tahkuse mõõtmiskompleksi arendamisel tekkinud probleemidega teistest intensiivsemalt Jaan Salm. Seejärel oli Urmas Hörraku kanda süsteemi pideva töölerakendamise, arendamise ja käiguhoidmise põhiraskus. Viimastel aastatel on mõõtesüsteemi arendamise ideid ellu viinud põhiliselt Kaupo Komsaare ja oluliselt on suurenenud Eduard Tamme abi Tahkuse mõõtmiskompleksi käiguhoidmisel ning Tahkusel aerosoolimõõtmiste arendamisel ja mõõtmistulemuste analüüsimisel.

Aadu Mirmel on eriti suur panus kogu AEL-i, sealhulgas ka Tahkusel kasutatava aparatuuri arendamisel ja mõõtmiste automatiseerimisel.

Viimastel aastatel on aparatuuri käiguhoidmise probleemide lahendamisel väga suurt abi andnud Jaan Maasepp.

Käesoleva kirjutise autor on põhiliselt pühendunud sellele, et mõõtekompleks Tahkuse õhuseirejaamas saaks töötada, töötaks ja areneks. Aja jooksul on edenenud koostöö Eesti Keskkonnaministeeriumiga (õhuseire), mis on avardanud pilti Eesti õhus toimuvast, teinud osa Tahkuse õhuseirejaama mõõtmistulemusi Eesti Keskkonnaministeeriumi seireveebi kaudu kõikidele soovijatele kättesaadavaks ja seejuures aidanud leevendada Tahkuse õhuseirejaama majandamise muresid.

ASUKOHT

Tahkuse õhuseirejaam asub Pärnumaal Tori vallas (58°31,47' N; 24°55,55' E) Pärnu jõe vasakul kaldal. Soomaa rahvuspargini on vähim kaugus ligi 5 km kagu suunas. Soomaa Rahvuspargi lähedusel oli oluline osa, et Eesti Keskkonnaministeerium hakkas majanduslikult keerulistel aegadel tööd Tahkusel toetama ja toetus majanduskulude katteks jätkub praegugi.

ESIMESED MÕÕTMISED TAHKUSEL

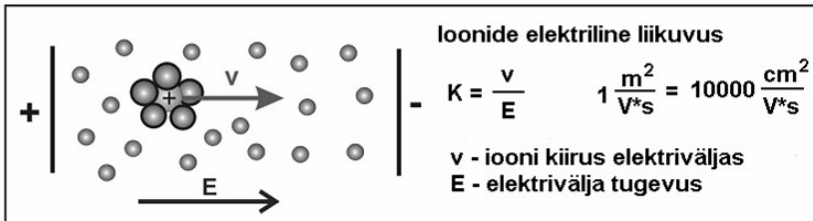
Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi keskkonnafüüsika laboratooriumis kasutatav aeroioonide ja aerosooli mõõtmismetoodika põhineb osakeste separeerimisel analüüsitavast õhust elektrivälja abil. Kasutatakse tõsiasi, et erinevate masside ja mõõtmega elektrilaenguga osakesi iseloomustab liikumisel elektriväljas gaasilises keskkonnas erinev liikuvus.

Esimesed mõõtmised Tahkusel toimusid 1984. aasta suvel. Mõõdeti looduslikus õhus koroonalahendusega tekitatud ühe sekundi vanuste ioonide liikuvusspektreid, s.o ioonide jaotusi liikuvuse järgi. Kasutati AEL-s loodud ja selleks puhuks arvutijuhtimisele edasi arendatud ioonide liikuvusspektromeetrit, mis tuli tollastes tingimustes paigutada mõõtmiseks sauna pööningule. Hoolimata kasinatest mõõtmistingimustest saadi huvitavaid tulemusi ja väärtuslikke kogemusi tulevasteks mõõtmisteks.

Kõikide järgmiste mõõtmiste puhul sai kasutada juba elamut. Mõõteaparatuuri ja andureid hakati paigutama elamu pööningule, elamusse ja selle ümbrusse. Maja asend ilmakaarte suhtes (edel-kirre) ja valdavad tuulesuunad on sobivad selleks, et kohalik kütmine ja majandamine mõõtmistulemusi oluliselt ei mõjutaks. Et vajadusel kohaliku kütmise võimalikku mõju arvesse võtta, registreeritakse teiste parameetrite kõrval ka temperatuuri korstnas termotakisti abil.

Esimese pikema mõõtmisperioodi algas 1985. aasta juunis ja kestis ligi aasta. Mõõdeti kergete ja keskmiste aeroioonide liikuvusspektreid 6-kanalilise, senistest parema lahutusvõimega liikuvusspektromeetriga.

Saadi tol ajal maailmas üks pikemaid, suure mõõtmisagedusega mõõtmistulemuste aegrida. Tulemuste põhjal avastati **keskmiste aero-**



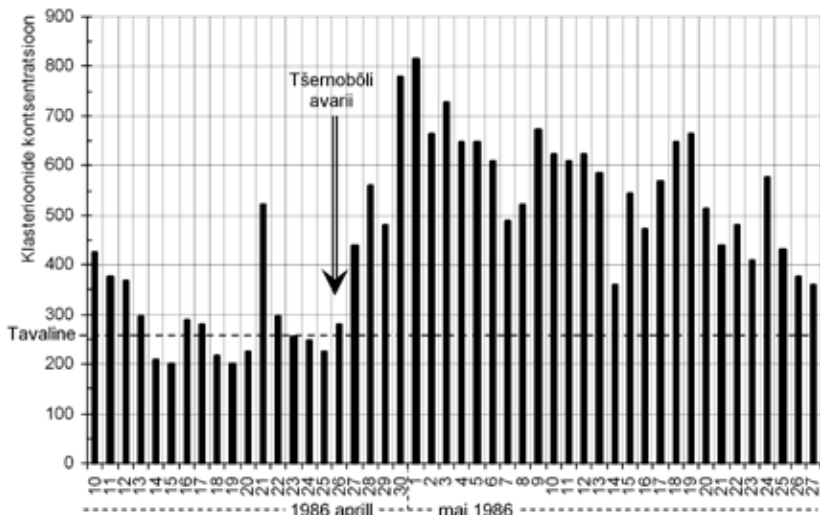
Joonis 2. Elektrilaengut omava osakese liikumist gaasilises keskkonnas elektriväljas iseloomustab elektriline liikuvus.

ioonide puhangud [1], mis on praegu looduslike aeroioonide ja eriti aerosooli arengu uurimisel „kuum“ teema. Tavaliselt oli liikuvusspektrites näha vaid kergeid ioone, keskmisi ioone tundus õhus mitte olevat. Tänu pikale mõõtmisperioodile selgus, et see pole kogu tõde. Umbes 4% spektritest olid teistsugused, kus esines märgataval hulgal ka keskmisi ioone. Selliseid juhtusid oli kolme tüüpi:

- 1) kas oli tekkinud ainult positiivseid keskmisi ioone,
- 2) kas oli tekkinud ainult negatiivseid keskmisi ioone või
- 3) samaaegselt oli tekkinud nii positiivseid kui ka negatiivseid keskmisi ioone.

Seega avaldus juba siis laengu asümmeetria keskmiste ionide tekkel, mis samuti on nüüdseks muutunud oluliseks uurimisteemaks.

Lisaks võimaldasid selle perioodi mõõtmistulemused jälgida **Tšernobõli aatomielektrijaama avarii** mõju klasterioonide keskmiste kontsentratsioonidele Tahkusel. Katastroofi järel esimestel päevadel puhusid Tahkusel lõunakaarte tuuled, ent kergete ionide kontsentratsioon suurenes hüppeliselt just siis, kui mõni päev pärast avariid hakkas sadama vihma põhja suunast saabunud pilvedest. Soome raadio vahendas seejuures eelnevatel päevadel ärevaid uudiseid radioaktiivse kiirguse



Joonis 3. 26. aprillil 1986. a toimunud Tšernobõli aatomielektrijaama avarii mõju klasterioonide keskmisele kontsentratsioonile Tahkusel.

taseme tõusust eriti Rootsi ja Soome tundraladel. Umbes kuu möödumisel pärast katastroofi hakkas klasterioonide kontsentratsioon Tahkusel lähenema pikemaajalisele keskmisele.

PIDEVATE MÕÕTMISTE ALGUS 1988 JA MÕÕTEKOMPLEKSI ARENDAMINE

Pidevad aeroioonide liikuvusspektrite mõõtmised kahe liikuvusspektromeetri abil juba laiemas liikuvusvahemikus algasid Tahkusel juulis 1988. Liikuvusspektromeetrid paigutati spetsiaalselt Tahkuse mõõtmissüsteemi jaoks Olev Laugi poolt konstrueeritud ja ehitatud boksi maja pönnin-gul.

Vastavalt võimalustele arendati ja täiendati järgnevatel aastatel mõõtekompleksi kõikide selliste mõõteriistadega, mis olid laborile kättesaadavad ja võisid anda informatsiooni aeroioonide ja aerosooliosakeste arengu mõjutajate kohta. Raha, eriti välisvaluutat, oli alati vähe, seetõttu on väga palju tehtud valmis AEL töötajate endi kätega.

1990. aasta lõpul kinkisid füüsikud Turu Ülikoolist Tahkuse mõõtmiste tarvis NO₂ detektori. Et see oli Eestis esimene NO₂ detektor, mis võimaldas automaatselt suure sagedusega (iga 5 minuti järel) mõõta NO₂ fooni, siis majanduslikult keerulistel aegadel soostus Eesti Keskkonnaministeerium mõõtmisi Tahkusel toetama.

1998. aastast on Tahkusel mõõdetud lühemate ja pikemate perioodide vältel radooni sisaldust õhus FI-st laenatud radoonimonitoriga. 2007. aastal õnnestus Tahkuse mõõtmiste tarbeks hankida radoonimõõtur AlfaGuard.

Alates 2003. aastast hakati aerosooliosakeste jaotust mõõtmete järgi (mõõtmespektrit) mõõtma pidevalt (varem aeg-ajalt) meie laboris loodud paljukanalilise, paralleelse mõõteprintsibiiga elektri-



Joonis 4. Boks aparatuuriga, vasakul selle ees aerosoolispektromeeter EAS.

lise aerosoolispektromeetriga (EAS). Samal aastal realiseerus ka Kaupo Komsaare arendatud aeroioonide mõõtmise uus andmehõivesüsteem.

KOGUNEV ANDMEBAAS

Viimastel aastatel Tahkusel kogutud andmebaasis on esindatud:

- **aeroioonide** ($d = 0,34 - 80$ nm) spektrid liikuvuse järgi,
- **aerosooliosakeste** jaotus suuruse järgi ($d = 3$ nm - 10 μ m),
- **NO₂** ja **Rn** kontsentratsioonid,
- **osoonikihi** paksus päikesepaistega päevadel,
- meteo- ja kiirgusandmed (õhu **temperatuur**, **rõhk**, **niiskus**; **tuule** suund ja kiirus; **päikese** summaarne kiirgus),
- **sademete hulk** ööpäevas. Kuu sademetes **lisandid** määratakse Tartu KKU OÜ-s Eesti KKM seireprogrammi „Sademete keemia Lõuna-Eestis“ järgi (Tahkuse on üks seitsmest jaamast Lõuna-Eestis).

Ööpäevas sadanud sademekogused mõõdetakse käsitsi kord päevas. 2008. aasta suvel rakendati tööle ka automaatne sademeteindikaator, mille abil minutilise sagedusega salvestatakse sademete olemasolu ja intensiivsus, sest sademetel on oluline mõju kõige olulisematele mõõdetavatele suurustele Tahkusel (ioonispektrid, aerosoolispektrid, NO₂ foon).

Mõõtmistulemused Tahkusel on jooksvalt jälgitavad arvutiekraanidel, mis annab võimaluse kohapeal mõõtmistulemuste üle kaasa mõtlemiseks, rikete puhul reagerimiseks ja operatiivselt kolleegide informeerimiseks, kui selleks põhjust näib olevat.

Aja jooksul on nende mõõtmiste tulemusena Tahkusel kogunenud aeroioonide liikuvusspektri ajaliselt maailmas kõige pikem ja pikka aega kõige parema lahutusvõimega ning laiema liikuvusvahemikuga aegrida koos mitmesuguste meteoroloogiliste ja muude parameetritega. Nende andmete korrastamisel andmebaasisse DataDiurna ja FINESTION 2003–2006 on suure töö ära teinud prof Hannes Tammet.

Kuna selliseid mõõtmisi on hakatud atmosfääri elektrinähtuste ja atmosfääriaerosooli uurimisel tähtsaks pidama, siis nüüdseks on sarnaseid pidevalt töötavaid mõõtejaamu loodud ka mujal, seejuures märgatavalt tugevama finantseerimisega. Üks selliseid mõõtmisbaase asub Soomes Hyytiäläs, kuhu suhteliselt lühikese ajaga on hangitud

palju parima tasemega aparatuuri. Selle labori uurimistöös osalevad ka TÜ töötajad oma teadmiste ja Tartu Ülikoolis valmistatud aparatuuriga.

TEADUSTULEMUSED

Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi keskkonnafüüsika labori Tahkuse õhuseirejaama mõõtmistulemuste põhjal on ilmunud üle viiekümne teadusartikli. 17 artiklit on avaldatud ISI-indekseeritud ajakirjades, nende hulgas on teaduskirjanduses sagedamini viidatud artiklitele [2–6].

Kaitstud on 2 doktoritööd (Urmas Hõrrak, Marko Vana) ning 5 teadusmagistritööd (Urmas Hõrrak, Hilja Iher, Kaupo Komsaare, Anna Pugatšova, Marko Vana) ja valmimas on 2 doktoritööd (Anna Pugatšova, Kaupo Komsaare).

Mõõtmistest Tahkusel on esitatud ettekandeid paljudel aeroelektri ja atmosfääriaerosooli alastel konverentsidel, mistõttu Tahkuse õhuseirejaama nimi on hästi tuntud aeroioone ja aerosooliosakesi uurivate teadlaste hulgas üle maailma.

Tahkusel mõõdetud andmete analüüsil saadud teadustulemustest toome siinkohal mõned olulisemad.

- Keskmiste aeroioonide (laetud nanoosakeste) puhangulise tekke (nukleatsioonipuhangute) avastamine [1, 3, 8]. Nukleatsioonipuhangute uurimisega tegelevad nüüd suuremal või vähemal määral enam teadustöötajatest meie laboris ja paljud atmosfääriaerosooli uurijad mujal maailmas. Hannes Tammeti sõnastuses: „Nukleatsioonipuhangute uurimine on kliimategurite uurimise võti“.
- Aeroioonide füüsikaliselt põhjendatud klassifikatsiooni väljatöötamine [4, 8].
- Aeroioonide erinevate liikuvusklasside (kerged, keskmised ja raske ionid) fenomenoloogilis-statistilise mudeli koostamine (variatiivsuste ja liikuvusjaotuste/ suurusjaotuste arengu seaduspärasuste selgitamine) [4, 5, 8].
- Aerosooliosakeste (suurustega 3–80 nm) laengujaotuse selgitamine atmosfääris. Keskmiste ionide (suurusega 1,5–7 nm) laenguasümmeetria avastamine nukleatsioonipuhangute korral, millest oli ka ülal põgusalt juttu [1,8].

- Aerosooliosakeste ühes mõõtepunktis saadud mõõtmistulemuste representatiivsuse ala mõõtmete hindamise meetodika väljatöötamine [6, 9] – s.o erinevates mõõtmiskohtades samal ajal mõõdetud aerosoolispektrite abil hinnatakse, kuivõrd mõõtmistulemused mingis kohas kirjeldavad olukorda kaugemal.
- Atmosfääriaerosooli osakeste mõõtmespektri modaalkonstrukturi määramine sõltuvalt õhumassi päritolust Eesti tingimustes ([10], A. Pugatšova valmiv doktoridissertatsioon).
- Rn-222 osa klasterioonide tekitajana (K. Komsaare magistritöö).
- Nukleatsioonipuhangute klassifitseerimine liikuvusspektrite arengute alusel (K. Komsaare valmimisjärgus doktoridissertatsioon).

Informatsiooni siin puudutatud teemade kohta võib mõningal määral leida Keskkonnafüüsika laboratooriumi kodulehelt meteo.physic.ut.ee

Lisaväärtuseks põhiuurimustele atmosfäärielektri vallas on aja jooksul välja kujunenud hea koostöö õhuseire vallas Eesti Keskkonnaministeeriumi ja Tartu Ülikooli vahel Tahkuse õhuseirejaama baasil, mis leiab kajastamist Eesti KKM Seireveebis mitmel viisil.

- Iga-aastased aruanded õhuseirest Tahkusel, kus on kättesaadav ka suur hulk Tahkusel mõõdetud suuruste päevakeskmisi (NO_2 kontsentratsioonid, temperatuur, sademed jm).
- Katsed uurida saaste kauglevi juhtudel, kui mõõtmiskohta saabub keskmisest enam saastunud õhk, millega võivad kaasneda ka sademed.
- Programmi „Sademete keemia Lõuna-Eestis“ jaoks sademete kogumine Tahkusel ja selle programmi aastakokkuvõtete tegemine alates 1999. aastast seitsme erineva looduskaitsealaga seotud Lõuna-Eesti paiga kohta. Selle programmi järgi ette nähtud kohtades iga kuu jooksul kogutud sademetes määratakse OÜ Tartu Keskkonnauuringud keemikute poolt K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , raskmetallide (Cu, Pb, Cd, Zn, Hg) sisaldused ning sademete elektrijuhtivus ja pH. Selle programmi eesmärk on saada suhteliselt tagasihoidlike vahenditega mingeid teadmisi õhusaaste kaugkande kohta. Samaladilist programmi Põhja-Eesti sademete uurimisel viib läbi Eesti Keskkonnauuringute Keskus. Nende programmide tulemused on samuti saadavad Eesti Keskkonnaministeeriumi seireveebist (vt www.keskkonnainfo.ee).

TÄNUAVALDUSED

Antud ülevaates oli võimalik kajastada põgusalt vaid väikese osa labori töötajate tegemisi, tänu kellele töö Tahkuse õhuseirejaamas on seni toimunud ja arenenud. Oma abi ja tuge on andnud veel väga paljud endised ja praegused töökaaslased, sugulased, sõbrad ja tuttavad, kes pole kunagi keeldunud abistamast, et töö Tahkuse õhuseirejaamas võimalikult hästi laabuks.

Suure töö, praktiliselt vaid entusiasmist, tegi Tahkuse õhuseirejaama käivitamisel, mõõtmistingimuste loomisel ja arendamisel, aparatuuri töölerakendamisel ja arvutiprogrammide koostamisel Tahkuse õhuseirejaama arendamise esimesel kümnel aastal Rein Sepp. Lisaks õnnestus tänu tema ettevõtlikkusele leida sponsorid: Avatud Eesti Fondi toetus 1993. aastal arvuti ostmiseks ja Norra saatkonna toetus 1994. aastal UPSi ja printeri ostuks andsid võimaluse kohapeal andmeid töödelda, vajalikke arvutiprogramme luua, aruandeid kirjutada jpm. Ilma nende toetusteta oleks tollastes tingimustes töö Tahkusel olnud tunduvalt vähemefektiivne või tõenäoliselt koguni hääbunud.

Kirjeldataud töid Tahkuse õhuseirejaamas on aidanud finantseerida Eesti Keskkonnaministeerium. Senini toimub koostöö Osauhinguga Tartu Keskkonnauuringud. Töö algusaastatel aitas probleeme lahendada ka kohalik ühismajand.

Aitäh kõikidele aitajatele ja toetajatele, mõõtmiskompleksi arendajatele.

Abi eest 2008. aasta füüsikapäevade ettekande ja käesoleva artikli koostamisel ning vastava illustreeriva materjali eest suur tänu Eduard Tammele, Hannes Tammetile, Kaupo Komsaarele, Urmas Hörrakule ja Jaan Salmile. Abi eest info kogumisel Tahkusega seotud teaduskirjanduse kohta tänan Karin Tuvikest.

KIRJANDUS

- [1] Tammet, H., Salm, J. and Iher, H. (1988). Observation of condensation on small air ions in the atmosphere. *Lecture Notes in Physics*, 309, pp. 239–240.
- [2] Hörrak, U., Iher, H., Luts, A., Salm, J. and Tammet, H. (1994) Mobility spectrum of air ions at Tahkuse Observatory. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 99, 10697–10700.

- [3] Hõrrak, U., Salm, J. and Tammet, H. (1998). Bursts of intermediate ions in atmospheric air. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 103, 13909–13915.
- [4] Hõrrak, U., Salm, J. and Tammet, H. (2000). Statistical characterization of air ion mobility spectra at Tahkuse Observatory: Classification of air ions. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 105, 9291–9302.
- [5] Hõrrak, U., Salm, J. and Tammet, H. (2003). Diurnal variation in the concentration of air ions of different mobility classes at a rural area. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 108(D20), 4653, doi:10.1029/2002JD003240
- [6] Tamm, E. and Vana, M. (1996). Experimental study of the particulate pollution propagation and of the area of representativity of the atmospheric aerosol spectrum measurements. *J. Aerosol Sci.* 27, S87–S88.
- [7] Vana, M., Kulmala, M., Dal Maso, M., Hõrrak, U. and Tamm, E. (2004). Comparative study of nucleation mode aerosol particles and intermediate air ions formation events at three sites. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 109, D17201.
- [8] Hõrrak, U. (2001). Air ion mobility spectrum at a rural area. *Dissertationes Geophysicales Universitatis Tartuensis* 15. Tartu University Press, Tartu, 157 pp.
- [9] Vana, M. (2002). Formation and evolution of atmospheric aerosol size spectrum by the occurrence of nucleation burst events in the atmospheric boundary layer; transport of the climatically active particulate air pollution. *Dissertationes Geophysicales Universitatis Tartuensis* 16. Tartu University Press, Tartu, 105 pp.
- [10] Pugatšova, A., Iher, H. and Tamm, E. (2007). Modal structure of the atmospheric aerosol particle size spectrum for nucleation burst days (in Estonia). *Boreal Environment Research*, 12(3), 361–373.

ISEENESEST KIIRENEVAD LAINEIMPULSID

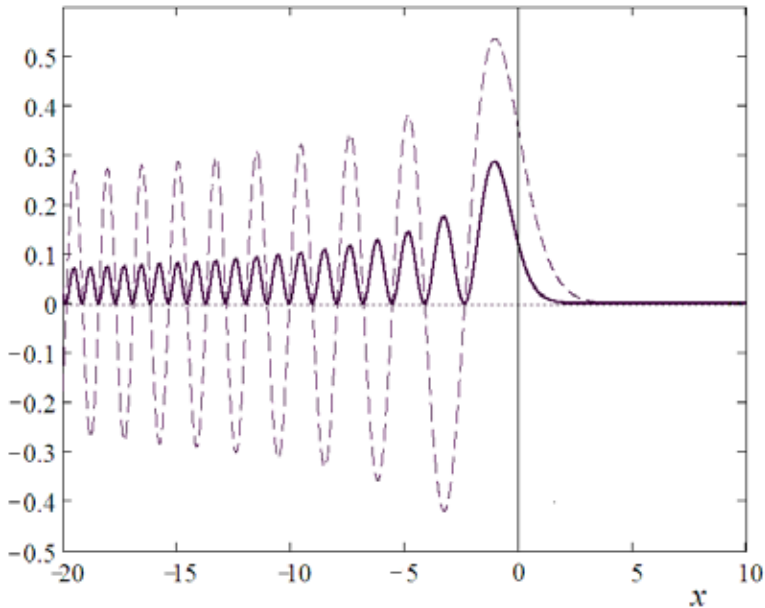
PEETER SAARI
TÜ Füüsika Instituut

1. SISSEJUHATUS

Hiljuti avastati uus „difraktsioonivaba“ nn Airy valguskimp, mis nagu juba varem tuntud Besseli jt kimbud levivad ilma et nende ristlõikes intensiivsuse perioodiline profiil muutuks, st justkui eirates kõigile lainetele omast difraktsiooni. Airy kimbul, mida on ka eksperimentaalselt tekitatud, on see profiil ühes või kahes lateraal(külg-)suunas antud Airy funktsiooniga [1-3].

See avastus põhineb kahe matemaatilise füüsika võrrandi ekvivalent-susel – skalaarne paraksiaalne lainevõrrand muutujates x, z langeb kokku Schrödingeri võrrandiga muutujates x, t ning avastuse ajendiks oli üsna ammune, kuid intrigeeriv Michael Berry ja Nandor Balazs'i artikkel [4]. Nemad nimelt ennustasid, et kui kvantosakese lainefunktsioon on antud Airy funktsiooniga (joon. 1), siis selle mooduli ruut (osakese leidmise tõenäosus) levib tühjas ruumis ilma igasuguse muundumiseta ja – veelgi enam – ilmutab konstantset kiirendust vaatamata igasuguse jõu puudumisele. Ühtlasi lahendasid nad siin ilmneva paradoksi tähelepanujuh-timisega, et kuna Airy funktsioon ei ole ruutintegreeruv, siis lainepaketi raskuskese ehk osakese koordinaadi x keskvääratus pole määratav.

Aga paradoks ei anna nii lihtsalt alla – teoreetilises artiklis [1] on lei-tud uus, ruutintegreeruv Airy lahend paraksiaalsele lainevõrrandile, milles, nagu autorid kirjutavad, „...the Airy wave packet still exhibits its



Joonis 1. Funktsiooni $Ai(x)$ graafik (katkendjoonega) ja selle ruudu $Ai^2(x)$ graafik (pidevjoonega).

most exotic feature, i. e., its trend to freely *accelerate*. This characteristic is rather peculiar given the fact that it may occur in free space, e. g., in the absence of any index gradients...“.

Tegelikult on termin „kiirenev“ antud kontekstis mõnevõrra eksitav kirjeldamiseks Airy kimbu kõrvalekaldumist otsesest ettepoole levisuunast, sest artiklites [1-3] käsitletav laineväli on monokromaatne, st tema intensiivsuse jaotus ruumis on statsionaarne ja selles midagi ei liigu.

Käesoleva töö motivatsiooniks on uurida Airy kimbu *impulss*-versioone, mis peaksid otseselt esile tooma lendavate ülilühikeste valgusimpulsside külgsuunalise kiirenduse sõltumata sellest, kas see on näiv või tegelik.

Sisuliselt saab Airy impulsist uus liige nn lokaliseeritud lainete perekonnas, millesse kuuluvad laiaribalised laialivalgumatud lainepaketid kui täpse lainevõrrandi lahendid ja kui üldistused (kvaasi)monokromaatsetele „difraktsioonivabadele“ kimpudele. Lokaliseeritud lained on saanud viimase kümnendiga väljakujunenud uurimisalaks (vt [5-6] ning sajad vii-

ted seal), kusjuures on tulnud luua füüsikaline selgus nende lainete palju hämmastavamates iseärasustes, kui seda on Airy kimbu näiv refraktsioon vaakumis. Tundub, et juhendumine reeglist – paradoksi lahendamiseks tuleb nähtust põhjalikult analüüsida – on asjakohane ka antud juhul.

2. KOLME TÜÜPI AIRY IMPULSID

Ruumis levivate laineimpulsside sünteesimisel on määravalt oluline, kas ja kuidas sõltuvad impulssvälja monokromaatsete koostisosade ehk Fourier' komponentide ruumilist kuju määravad parameetrid sagedusest (või lainearvust). Nii näiteks käitub ülilühike femtosekundlaseri impulss fokuseerituna Gaussi kimbuks ühtemoodi juhul, kui fokuseerimine toimub viisil, mis tagab kõigi monokromaatsete komponent-kimpude taljele ühesuguse läbimõõdu, ja hoopis teistmoodi, kui see tingimus pole täidetud. Kui talje läbimõõt ei sõltu komponendi sagedusest, siis on impulsi spekter ka kimbu ristlõike ulatuses ühesugune, mis ajalise esituse keeles tähendab, et impulss ei muuda oma kuju levi suunas ja läbib taljepiirkonna nagu lapiti lendav pannkook, millel vaid diameeter tõmbub fookuses kokku. Teistsugustel fokuseerimise tingimustel aga toimub lisaks rohkem või vähem keeruline impulsi pikiprofiili muundumine – piltlikult öeldes pannkook muundub pirukaks ja vastupidi. See-eest võib aga kuju muutuval impulsil olla rühmakiirus talje piirkonnas veidi suurem kui c (faasikiirus lainevälja fookuses on alati superluminaalne tänu Gouy efektile).

Üldine avaldis vaid kahes dimensioonis muutuva optilise impulsi lainefunktsiooni jaoks, mis omab Airy profiili piki ühte levisuunaga (z) risti olevat telge (x), esitub superpositsioonina monokromaatsetest komponentidest lainearvu k üle spektri $S(k)$:

$$\Psi(x, z, t) = \int_0^{\infty} dk S(k) \Phi(x, z, k) \exp[ik(z - ct)], \quad (1)$$

kus eksponent-tegur kirjeldab komponent-tasalainet ja Φ on lõpliku energiaga Airy kimbu skalaarse välja¹ kujufunktsioon [1-3]:

1 Nagu teada klassikalisest elektrodünaamikast, optiliste sageduste ja eriti just kitsaste paraksiaalsete lainekimpude puhul pole tarvidust käsitleda elektri- ja magnetvälja vektorväljana, ka näiteks lineaarselt polariseeritud välja puhul võib skalaarvälja võtta kui vektorvälja ainsat Cartesiuse komponenti.

$$\Phi(x, z, k) = \text{Ai} \left[\frac{x}{x_0} - \left(\frac{z}{2z_0} \right)^2 + ia \frac{z}{z_0} \right] \exp \left[a \frac{x}{x_0} - \frac{a}{2} \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 + i\phi(x, z, k) \right],$$

$$\phi(x, z, k) = \frac{x}{2x_0} \frac{z}{z_0} - \frac{1}{12} \left(\frac{z}{z_0} \right)^3 + \frac{a^2}{2} \frac{z}{z_0}. \quad (2)$$

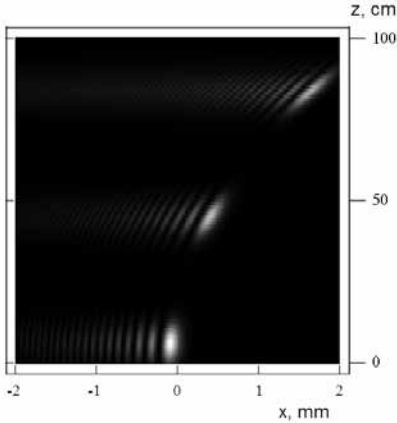
Siin $\text{Ai}(\dots)$ on Airy funktsioon, apertuuri piirav parameeter a on väike positiivne arv, mis tagab Airy funktsiooni ja eksponentteguri korrutise järsu kustumise risti kimpu, kui $x \rightarrow -\infty$. Üldiselt lainearvust sõltuvad parameetrid x_0 ja z_0 on karakteristikud pikkused vastavalt rist- ja pikisuunas. Φ moodul omab peegelsümmeetriat tasandi $z = 0$ suhtes.

Määrava tähtsusega on asjaolu, et parameetrid x_0 ja z_0 (pikkusskaalade ühikud) ei ole suvalised, paraksiaalne lainevõrrand paneb nad omavahelisse sõltuvusse kujul $z_0 = k x_0^2$, mis on ekvivalentne seosega tavalise Gaussi kimbu konfokaalse parameetri (kahekordne Rayleigh' ulatus) ja kimbu talje raadiuse vahel. See seos toob k -sõltuvuse funktsiooni $\Phi(\dots)$. Valemi (1) rakendamiseks pole piisav spetsifitseerida ainuüksi spekter $S(k)$, vaid tuleb ette anda ka sõltuvus lainearvust k ühele kahest parameetritest x_0 või z_0 nagu ka Gaussi kimbu puhul [7-10].

Vastavuses kolme võimaliku tüüpilise eksperimendisituatsiooniga on Sheppard [11] eristanud kolme erinevat k -sõltuvuse juhtu igasuguse lainekimbu kuju parameetrites. Tüüpi I impulsside kimbuks nimetab ta juhtu, kus spekter ja järelkult ka impulsi ajaline käitumine on ühesugune kõikides punktides talje ristlõiketasandis, sel juhul parameeter z_0 peab olema võrdeline lainearvuga.

Tüüpi II on impulsside kimp, kui spekter ja järelkult ka impulsi ajaline käitumine on ühesugune kõikides punktides üle fokuseeriva optika, st kaugväljas, ja siis $z_0 \propto 1/k$. Lõpuks, tüüp III käib vahepealse olukorra kohta, kui konfokaalne parameeter on ühesugune kõikide spektraalkomponentide jaoks, mis leiab näiteks aset siis, kui impulsside kimp genereeritakse lahtise resonatoriga ja moodihaagitud laseriga.

Eksperimentaalset teostatavust silmas pidades valisime numbrilisteks simulatsioonideks järgmised arväärtused parameetritele valemeis (1)-(2). Ohjeparameeter $a = 0,025$ sai valitud nii väike, et impulsi monokromaatsete väljakomponentide ristsuunaline käitumine praktiliselt ei erine sellest, mis ta on „ideaalses“ (mitte-ruutintegreeruv ja seega lõpmatu



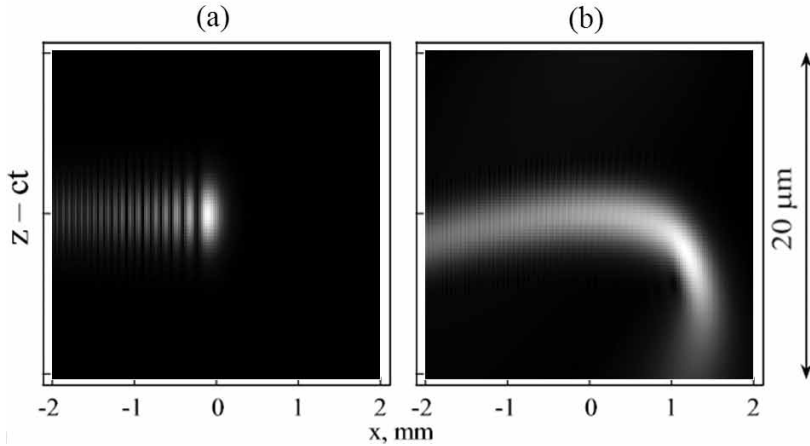
Joonis 2. Esimest tüüpi kitsaribalise Airy impulsi intensiivsuse profiilid kui valemitega (1), (2) antud lainefunktsiooni mooduli ruudud, arvatud ajahetkedel $ct = 6$ cm, $ct = 45$ cm ja $ct = 84$ cm. Joonisel kujutatut saab samuti vaadelda kui momentvõtet kolmest järjestikku levivast impulsist, mis on eraldatud üksteisest intervalliga $ct = 39$ cm. Spektri täislaius nivool $1/e$ on 2×10^5 korda väiksem kui kandesagedus $k_0 = 10^5$ cm⁻¹. Vastavalt on impulsi kestus (intensiivsuse FWHM) $1/3$ ns. Teised parameetrid on toodud tekstis. Hallskaala - mustast (nullnivoo) kuni valgeni (tippintensiivsus).

energiaga) Airy kimbus. Ristskaalaparameeter väärtusega $x_0 = 0,1$ mm impulsi keskmise (kande-)sagedusega komponendi jaoks on ligikaudu esimese Airy piigi poollaius (HWHM) lähte- ehk fokaal-risttasandis $z = 0$. Impulsi gaussiaani-kujulise spektri keskväärtuseks sai võetud $k_0 = 10^5$ cm⁻¹, st vastav lainepikkus $0,628$ μm langeb punasesse spektripiirkonda. Sellise kandesageduse juures saame seosest $z_0 = k x_0^2$, et $z_0(k_0) = 0,1$ m.

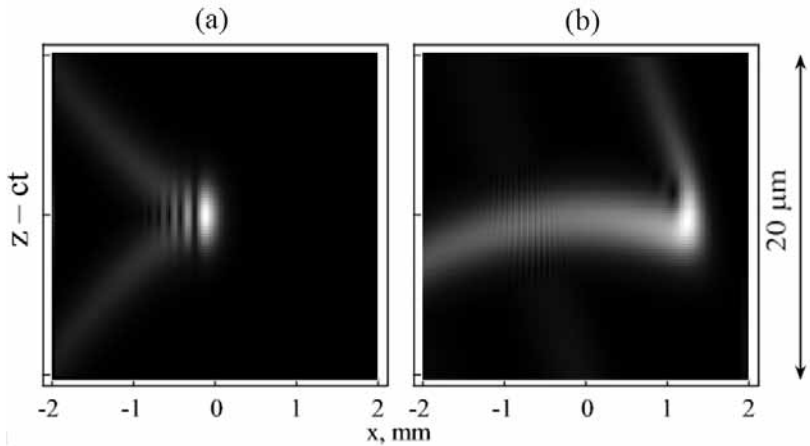
Tüüpi I Airy impulss on lihtsaim selles mõttes, et kuna ristskaalaparameeter x_0 on üks ja seesama kõigi sageduskomponentide jaoks, peab impulsi ristsuunaline profiil lähtetasandis $z = 0$ langema kokku monokromaatses Airy kimbu profiiliga (vt [3], joon. 1).

Tõepoolest, simulatsioonid joonisel 2 ja joonisel 3 on vastavuses sellise oletusega. Airy impulss käitub nii, nagu lendaks ta ümber nurga - ta kaldub kõrvale sirgjoonelisest levisuunast, ehkki tühjas ruumis pole midagi, mis põhjustaks sellise ristsuunalise kiirenduse.

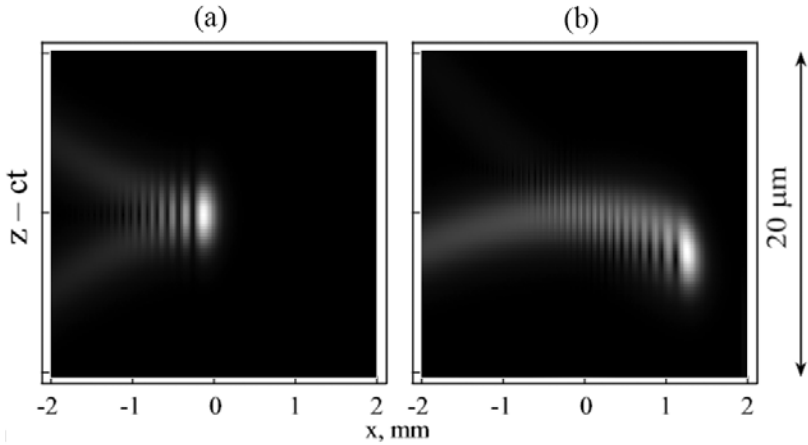
Kitsaribaline impulss (joon. 2) säilitab oma lateraalse Airy profiili levi käigus, samas kui laiaribaline impulss muudab levides oma kuju oluliselt (joon. 3). Üldiselt saavad erinevused tüüpide I, II ja III vahel märkimisväärseks juhtudel, kui impulss koosneb vaid mõnest kandelaine võnkest, st kui impulsi spektraalne laius saab suurusjärgult võrreldavaks kandesagedusega. Seepärast sai joonise 3 ja edasiste simulatsioonide jaoks spektri täislaius nivoo $1/e$ kõrgusel valitud 20% kandesagedusest $k_0 = 10^5$ cm⁻¹. Selline laiaribaline impulss on sedavõrd lühike, et näitamaks tema lainefunktsiooni mooduli käitumist kasutasime jooniste ordinaatidel impulsiiga kaasaliikuvat „akent“



Joonis 3. Esimest tüüpi laiaribalise (impulsi kestus 8 fs) Airy impulsi lainefunktsiooni moodul ajahetkedel (a) $ct = 0$ ja (b) $ct = 75$ cm. Vaatamata sellele, et impulsi monokromaatsete komponentide lainepikkused varieeruvad laias vahemikus, ei ole Airy funktsioonile iseloomulikud ostsillatsioonid tasandis $z = 0$ laiali määratud, sest külgsuunaline skaalaparaameeter x_0 on ühe ja sellesama väärtusega kõigi laine paketi komponentide jaoks tüüpi I impulsi puhul.



Joonis 4. Tüüpi II laiaribalise Airy impulsi lainefunktsiooni moodul ajahetkedel (a) $ct = 0$ ja (b) $ct = 75$ cm. Airy ostsillatsioonid tasandis $z = 0$ on osaliselt laiali määratud ja asendunud poole tähe X kujuliste harudega, sest skaalaparaameeter x_0 sõltub tugevasti sagedusest ehk on võrdeline monokromaatse komponendi lainepikkusega tüüpi II impulsi puhul.



Joonis 5. Tüüpi III laiiribalise Airy impulsi lainefunktsiooni moodul ajahetkedel (a) $ct = 0$ ja (b) $ct = 75$ cm.

suure ruumilise lahutusega z -suunas. Samuti, mooduli maksimumväärtus normeeriti 1-ks, seega tema kustumine levi käigus vastavalt eksponendile valemis (2) joonistel ei paista.

Tüüpi II impulsi profiil (joon. 4) kaldub kõrvale Airy funktsiooni (koos ohje-eksponent-teguriga) kõverast juba lähtetasandis $z = 0$, kus ta ilmub X-kujulisi harusid või „tiibu“ vasakul küljel. Väärrib tähelepanujuhtimist, et kahepoolne X-kujuline profiil on iseloomulik Bessel-X impulsidele ja teistele optilistele lokaliseeritud lainetele [5, 6], mis on Besseli kimpude ülilairibalised superpositsioonid-lainepaketid.

Airy funktsiooni ostsillatsioonide väljauhtumine ja nende asendumine „tiibadega“ on tingitud rist-suunalise skaala sõltuvusest lainearvust: $x_0 \propto 1/k$ või $x_0 = (k_0/k) \times 100 \mu\text{m}$ meie poolt valitud arväärtuste puhul. Meie laiiriba-impulsside puhul nende 20% suhtelise ribalaiusega, mis ulatub rohelisest spektri piirkonnast infrapunasesse (lainepikkustes $0,51 \mu\text{m}$ kuni $0,82 \mu\text{m}$), muutub x_0 vahemikus $80 \mu\text{m}$ kuni $130 \mu\text{m}$, millest piisab spektraalkomponentide Airy funktsioonide ostsillatsioonide faasist väljaminekuks seal, kus $x < -0,5$.

Tüüpi III impulsi puhul on longitudinaalse skaala parameeter z_0 konstantne ja seepärast suuruse x_0 sagedussõltuvus nõrgem: $x_0 = (k_0/k)^{-1/2} \times 100 \mu\text{m}$. Vastavalt on alguses impulsi profiil (joon. 5) vahepealne sama ribalaiusega tüüpi I ja II impulsside kujudele.

3. TULEMUSTE INTERPRETATSIOON

Siin toodud tulemused ei käi mitte ainult valitud kandesageduse väärtuse kohta – kuna tegelikes arvutustes kasutatakse suhtelisi ühikuid, siis on impulssväljade pildid invariantseid vastavate skaleeringute suhtes.

Küsime, et kui kõige parempoolsemad maksimumid kõigil kolmel impulssitüübil täiesti ilmselt ilmutavad levides kiirendust paremale, kas siis impulss ise tervikuna samuti „lendab ümber nurga“? Ehk teiste sõnadega, milline on impulsi tsentroidi (keskmise lateraalse positsiooni) käitumine z kasvades?

Monokromaatse lõpliku energiaga Airy kimbu jaoks on tõestatud [2], et tsentroid ei sõltu üldse muutujast z . Sama peab kehtima polükromaatse impulsi korral. Tsentroidi ja maksimumi erinev käitumine on loomulik, nagu üldiselt muutuja keskvärtus ei lange kokku tema tõenäoseima väärtusega (antud juhul – footoni lateraalse koordinaadi tõenäoseima väärtusega).

Kõige parempoolsem maksimum joonisel 4 ilmutab valguse kiirusest vaakumis veidi suuremat levikiirust. See ei ole üllatav, sest lainepakettide rühma kiirus vaakumis võib teatavatel tingimustel olla superluminaalne [6, 12] (kuid muidugi mõista mitte signaali edastamise kiirus). Nii on see näiteks impulssidega Gaussi kimbus juhul, kui iga tema monokromaatse komponendi konfokaalne parameeter on võrdeline komponendi lainepikkusega [10, 7] – just samuti nagu meie teist tüüpi Airy impulssidel. See impulss on ühtlasi parim kandidaat eksperimentaalseks realiseerimiseks, sest kui kasutada õhukese läätsega teostatavat ruumilist Fourier' teisendust tasalaineimpulssile, mis läbib ruumilise modulaatori, millel on kuubiline faasisõltuvus piki üht lateraalset koordinaati, saamegi parameetritele x_0 tüüpi II sõltuvuse lainearvust.

Lisaks on õpetlik teada, et igast paraksiaalses lähenduses lainevõrrandi monokromaatsest lahendist, nagu seda on ka valemitega (2) antu, saab konstrueerida täpse lainevõrrandi lahendi järgmiste asenduste teel [13]: $k \rightarrow 2k$, $z \rightarrow z - ct$ ja $\Phi \rightarrow \Phi \cdot \exp[ik(z + ct)]$. Niimoodi saadud lahendid kirjeldavad nn fookuslainemoodi tüüpi lokaliseeritud lainepakette, mis lõpmatu apertuuri ideaaljuhul üldse ei haju ega diffrageeru oma levil valguse kiirusega c . Seega on ka Airy kimbust võimalik tuletada selline lainepakett [14]. Üldse on lainevõrrandite kohta endale süsteemi loomiseks ning see läbi uute ideede leidmiseks kasulik silmas pidada järgmisi seoseid.

- Schrödingeri võrrand \rightarrow paraksiaalne lainevõrrand, kui muutuja $t \rightarrow z$.
- Paraboolne difusioonivõrrand \rightarrow Schrödingeri võrrand, kui $t \rightarrow it$.

4. KOKKUVÕTE

Me oleme tuletanud ja numbriliselt simuleerinud kolme tüüpi Airy impulsse. Need eristuvad oma parameetrite sagedussõltuvuse poolest ja ilmutavad erinevat ajalis-ruumilist käitumist. Kõige tugevamad piigid impulsside intensiivsusejaotuses kalduvad kiirenevalt külgsuunas ja see efekt on täiesti märgatav impulsi levil kaugustele meetri suurusjärgus. Samas see paradoksaalne efekt ei tähenda, nagu kalduks kogu impulsi raskuskese kõrvale sirgjoonelisest liikumisest otse ettepoole, seega optikaseadusi tegelikult ei rikuta.

Tänaseks on juba leitud mitmeid huvitavaid rakendusi Airy valguskimpudele, näiteks nanoosakestega manipuleerimises (vt [15] ja viited seal).

Seda uurimistööd on toetanud Eesti Teadusfond. Tulemused koos animeeritud lainepiltidega on varem avaldatud elektroonses ajakirjas *Optics Express* [16].

KIRJANDUS

- [1] G. A. Siviloglou and D. N. Christodoulides, "Accelerating finite energy Airy beams," *Opt. Lett.* 32, 979–981 (2007).
- [2] I. M. Besieris and A. M. Shaarawi, "A note on an accelerating finite energy Airy beam," *Opt. Lett.* 32, 2447–2449 (2007).
- [3] G. A. Siviloglou, J. Broky, A. Dogariu, and D. N. Christodoulides, "Observation of accelerating Airy beams," *Phys. Rev. Lett.* 99, 213901 (2007).
- [4] M. V. Berry and N. L. Balazs, "Nonspreading wave packets," *Am. J. Phys.* 47, 264–267 (1979).
- [5] *Localized Waves: Theory and Applications*, ed. by H. E. Hernandez-Figueroa, M. Zamboni-Rached, and E. Recami (J. Wiley, New York, 2008); H. Sõnajalg, P. Saari, „Valgusimpulsid, mis levivad laienemata, kuid pole solitonid,“ EFS aastaraamat 1996 VII, 49–56 (1997).
- [6] P. Saari and K. Reivelt, "Generation and classification of localized waves by Lorentz transformations in Fourier space," *Phys. Rev. E* 69, 036612 (2004).
- [7] Z. L. Horváth and Zs. Bor, "Reshaping of femtosecond pulses by the Gouy phase shift," *Phys. Rev. E* 60, 2337–2345 (1999).

- [8] S. Feng and H. G. Winful, "Spatiotemporal structure of isodiffracting ultrashort electromagnetic pulses," *Phys. Rev. E* 61,862–873 (2000).
- [9] P. Saari, "Evolution of subcycle pulses in nonparaxial Gaussian beams," *Opt. Express* 8, 590–598 (2001), www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-8-11-590.
- [10] P. Saari, "Relativistic Doppler effect, aberration and Gouy effect on localized waves," *Atti della Fondazione Giorgio Ronchi, Special Issue on "Anomalies and Strange Behavior in Physics: Challenging the Conventional"*, 58, 729–754 (2003).
- [11] C. J. R. Sheppard, "Bessel pulse beams and focus wave modes," *J. Opt. Soc. Am. A* 18, 2594–2600 (2001).
- [12] M. A. Porras, "Pulsed light beams in vacuum with superluminal and negative group velocities," *Phys. Rev. E* 67, 066604 (2003).
- [13] A. Sezginer, "A general formulation of focus wave modes," *J. Appl. Phys.* 57, 678–683 (1985).
- [14] I. M. Besieris, A. M. Shaarawi, and R.W. Ziolkowski, "Nondispersive accelerating wave packets," *Am. J. Phys.* 62, 519–521 (1994).
- [15] D. N. Christodoulides, "Riding along an Airy beam," *Nature Photonics* 2, 652–653 (2008).
- [16] P. Saari, "Laterally accelerating Airy pulses," *Optics Express* 16, 10303–10308 (2008).

TÖRTS TORUJUTTU

JAAK KIKAS

TÜ Füüsika Instituut

toru, hrl. silindriline õhukeseseinaline suhteliselt pikk õõneskeha
(Eesti Entsüklopeedia 9)

Silindrilistel struktuuridel (sealhulgas siis ka õõnessilindritel – torudel) on mitmeid häid omadusi, seda nii teoorias kui ka praktilisest otsast (või otstest – torul neid ju kaks!) vaadates. Kõrge sümmeetria tõttu on silindrilisi struktuure lihtne kirjeldada ja igapäevaelus vaevalt et möödub päeva, kus me torudega suht lähedalt kokku ei puutuks.

1. SILINDRILINE SÜMMEETRIA

Silindrilise sümmeetriaga objekte on hõlbus kirjeldada silindrilistes koordinaatides r , ϕ , h . Silindri telg (h -telg) on seejuures lõpmatut järku sümmeetriatelg – pöörded selle telje ümber suvalise nurga ϕ võrra on sümmeetriateisendusteks. Sümmeetriateisendusteks võivad olla ka kõikvõimalikud nihked piki h -telge (homogeensed silindrid). Viimast muidugi lõpmata pikkade silindrite korral. Mittetriviaalsena säilib siis vaid objekti omaduste sõltuvus kaugusest silindri teljest (radiaalkoordinaat r). Aga ka reaalseste lõpliku pikkusega silindrite korral võib otsaefekte sageli mitte arvestada, nt kui silindri pikkus $L \gg R$ (silindri raadius) ja meid huvitab situatsioon silindri keskel kaugel otstest. Kui meid huvitavad õõnessilindri sees toimuvad protsessid (vedeliku voolamine, lainete levi), on tegemist silindersümmeetriliste ääretingimustega (otsitavatele funktsioonidele püstitatakse teatud nõuded kohal $r = R = \text{const}$). Mõnedel juhtudel võivad meid huvitada protsessid kahe

koaksiaalse silindri vahel ($R_1 \leq r \leq R_2$). Kui $R_1 \rightarrow R_2$, siis taandub käsitlus efektiivselt kahemõõtmeliseks (nt lainete levi õhukeses silindrilises koorikus).

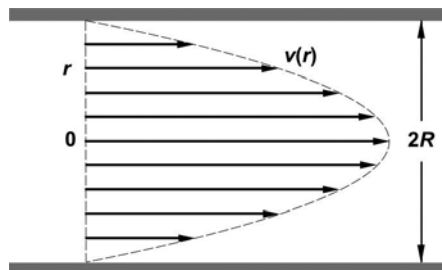
2. VOOLAMINE TORUDES

Küllap olulisim torude rakendus tehnikas on seotud asjaoluga, et neid mööda saavad voolata vedelikud ja gaasid. Ja eriti need torud, mida mööda voolavad nafta ja maagaas, on tehnorajatiste hulgas saanud järjest enam (paraku) ka poliitiliste kirgede sõmpunktideks. See voolamist harilikult ei soodusta – nende lausete tippimise vahel loeb kirjutaja uudeid järjekordsest Vene-Ukraina gaasitulist (Nord Stream’ist siinkohal rääkimata). Kõikvõimalike toruprofilide hulgast on enimkasutatavad kindlasti silindrilised (ringikujulise ristlõikega) torud. Neid eristab asjaolu, et sama ristlõike pindala juures on sellise toru ümbermõõt ja seega ka (sama seinapaksuse juures) valmistamiseks kuluv materjalikogus minimaalne. Ka on sama ristlõikepindala ja rõhkude vahe korral toru otstes torujuhtme läbilaskvus maksimaalne just silindrilise toru korral.

Klassikalise viskoosse (Newtoni) vedeliku vooluprofiil (voolukiiruse sõltuvus kaugusest silindri teljest) on paraboolne: voolukiirus v on null vedeliku kokkupuutel toru seinaga ja maksimaalne toru teljel:

$$v(r) = (P/4\eta L) \cdot [R^2 - r^2], \quad (1)$$

kus R on toru (sise)raadius ja r kaugus teljest, L toru pikkus ja η vedeliku viskoossus ning P rõhkude erinevus toru otsede vahel (joonis 1). Prantsuse füsioloogi Jean Louis Marie Poiseuille’ (1799 – 1869) järgi kannab selline vooluprofiil Poiseuille’ profiili nimetust. Läbi silindrilise toru ajaühikus kanduva vedeliku (gaasi) ruumala (voolamise ruumkiirus) on



Joonis 1. Kiiruste jaotus silindrilise toru pikilõikes – Poiseuille’ profiil (valem 1). Toru seinaga kokkupuutes oleva vedeliku kiirus on null, toru teljel maksimaalne.

$$\Phi = dV/dt = \pi PR^4/8\eta L, \quad (2)$$

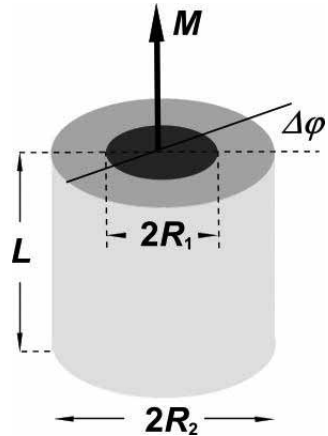
kus P on rõhkude vahe toru otste vahel, η on voolise¹ viskoossus ja L toru pikkus. Kui võrrelda vooluhulki, mis kanduvad läbi üksteise sisse „asetatud“ voolusilindrite, s.t ruumiosades $n\Delta R < r < (n+1)\Delta R$, siis on selline vedeliku transport suhteliselt ebaökoonoomne: maksimaalne vedeliku ruumala liigub minimaalsel (joon)kiirusel. Suurim vedeliku kogus kantakse edasi voolusilindris, mille raadius $r = 3^{-1/2}R \approx 0,58R$. Kui kogu vedelik torus liiguks samal kiirusel, mis on toru teljel, oleks vedeliku voolamise ruumkiirus (ajaühikus läbi toru kantav vedelikuhulk) 2 korda suurem.

3. KERGED JA JÄIGAD

Silindrilise toru väänamisel (joonis 2) on piki toru telge rakendatud jõumoment M ja väändenurk $\Delta\phi$ seotud võrdusega

$$M = (\pi/2)(R_2^4 - R_1^4)(\mu/L)\Delta\phi, \quad (3)$$

kus L on toru pikkus, R_1 ja R_2 vastavalt toru sise- ja välisraadius ning μ toru materjali nihkemoodul. Siit on lihtne näha, et väline 20% läbimõõdust annab torule (õõnessilindrile) 60% jäikusest. Seda selles mõttes, et samast materjalist sama pika õõnessilindri korral (seina paksus 10% välisläbimõõdust) on sama väändenurga tekitamiseks vaja jõumomenti, mis vaid 40% võrra on väiksem laussilindrile rakendatust. Seda asjaolu teab ja kasutab hästi ka loodus: just sellise ehitusega (seest tühjad suhteliselt õhukese seinaga) on kõrreliste varred (joonis 3), mis võimaldab neil taimedel saavutada varre läbimõõduga võrreldes väga suure kasvukõrguse.



Joonis 2. Toru väänamine. Silindrilisele torule on rakendatud jõumoment M , mille tulemusel toru üks ots pöörduv teise suhtes ümber vertikaaltelje nurga $\Delta\phi$ võrra.

1 Voolis on see, mis voolab, gaas või vedelik niisiis.

4. VÕNKUMISED JA LAINED TORUDES

Torude mitmed olulised rakendused on seotud nendes kulgevate laineprotsesside ja resonantsidega. Silindrilises resonaatoris asuva gaasi (õhu) võnkumised on inimkonnale andnud suure hulga kaunist muusikat (joonis 3). Eestigi rahvamuistendites tuleb „toru“ kõige enam vastu sõnaühendis „torupill“.

Kahest otsast avatud torus olev õhusammas resoneerib sagedustel

$$f = nv/2L, \quad (4)$$

kus v on heli kiirus õhus (344 m/s normaaltingimustel) ja $n = 1, 2, 3, \dots$ (täisarv). Toru mõlemas otsas on sellisel võnkumisel pais, s.t rõhumuutuse amplituud on maksimaalne. Kui toru üks ots on suletud, on võimalikud sagedused antud seosega

$$f = nv/4L, \quad (4')$$



Joonis 3. Bambusvartest valmistatud vietnami rahvapill. Käteplaks bambustoru otsa juures paneb erineva pikkusega torudes oleva õhu resoneerima erinevatel sagedustel.

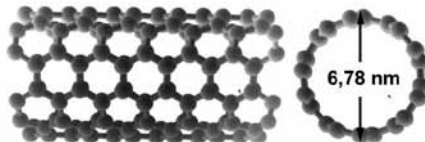
kus nüüd $n = 1, 3, 5, \dots$ (paaritu täisarv). Toru suletud otsas on nüüd sõlm (nullamplituud), avatud otsas pais. Täpsemas käsitluses tuleb arvestada toru lõplikku läbimõõtu, mis nihutab veidi valemitega $(4, 4')$ antud sagedusi.

Huvilistele aga uurimiseks järgmine küsimus (muidugi juhuks, kui te vastust juba ei tea). Oletame, et hõikate asudes suht suure sfäärilise õõnsuse keskel. Millist kaja kuulete? Aga nüüd oletame, et asute lõpma-ta pika suure läbimõõduga õõnessilindri teljel. Millist kaja nüüd kuulete? Siia juurde võib siis ka „klassikalist“ kaja eemal asuvalt tasapinnalt meelde tuletada.

Akustilistest nähtustest olulisemaks on tänapäeval saanud aga lainete levi ja resonantsid „valgustorudes“ – optilistes fiibrites ja lasergeneratsioonil, millele järjest enam tugineb kogu moodne kommunikatsiooni-tehnoloogia.

5. NANOTORUD: SÜSINIK JA TEISED

Toru läbimõõdu ja seina paksuse kahandamisel saabub kunagi olukord, kus need saavad võrreldavaks aatomite-molekulide karaktersete mõõdetega. Muidugi osutub enamiku ainete korral selline „kahandamine“ reaalselt võimatuks, seda enam aga pakuvad huvi materjalid, kus see siiski saavutatav on. Nende üldiseks omaduseks on moodustada 2D molekulaarseid struktuure – tasandeid, kus aatomite-molekulide vahel on suht tugevad sidemed, naabertasandite vahel aga nõrgad (van der Waalsi) jõud. Selliste omadustega on nt volframdisulfiid (WS_2) ja boornitriid (BN). Senituntud-uuritud nanotorudest on aga konkurentsilt esikohal (teaduspublikatsioonide ja patentide arvu, erinevate potentsiaalsete rakenduste arvu jm poolest) süsiniknanotorud (joon. 4) [1]. Taolist nanotoru võib ette kujutada kui objekti, mis on saadud lõpmatust graafenitasandist (koosneb kovalentselt seotud süsiniku aatomitest moodustunud kuusnurkadest) vajaliku laiusega pika riba väljalõikamisel ja selle vastaskülgede



Joonis 4. Jupike süsiniknanotoru (nn (5,5) „tugi-tooltoru“ mudel) külgvaates (vasakul) ja otsvaates (paremal).

„kokkukleepimisel“. Riba laius määrab nanotoru läbimõõdu, selle mõned omadused (nt elektrilised) sõltuvad aga oluliselt ka sellest, milline oli riba orientatsioon süsinikkuusnurkade suhtes. Süsiniknanotorudel on mitmeid silmapaistvaid omadusi, neist enam on tähelepanu pälvinud erakordne tugevus – oma kaalu kannataks välja 3641 km pikkune süsiniknanotorust „kõis“! Õige mitmed rakenduslootused on seotud ka süsiniknanotorude elektriliste omadustega. Sõltuvalt konkreetsest struktuurist võivad nad ilmutada nii metallidele kui ka pooljuhtidele iseloomulikke omadusi. See ei pruugi aga olla veel kõik.

6. NANOVOOLAMINE

Üheks paljudest nanotorudega seotud üllatustest olid voolamise iseärasused taolistes torudes. Nimelt osutus, et nanotorusid läbivad vooluhulgad on mitmeid suurusjärke suuremad, kui see tuleneb klassikalisest valemist (2). Nii näiteks uuriti erinevate vedelike läbiminekut süsiniknanotorudest (sisemine diameeter 7 nm) koosnevatest membraanidest. Osutus, et vee korral ületas mõõdetud väärtus pea 50 000 korda klassikalisest teooriast tuleneva väärtuse [2, 3]. Selgus ka nähtuse põhjus, selleks on vedeliku „libisemine“ mööda nanotoru pinda – toru seinaga kokku puutuva vedeliku liikumiskiiirus ei ole mitte null, vaid omab lõplikku väärtust. Ehk võiksime seda nimetada *libivoolamiseks*? Valem (1) modifitseerub sellisel juhul kujule

$$v(r) = (P/4\eta L) \cdot [(R+\delta)^2 - r^2], \quad (5)$$

kus suurust δ (*slip length* inglise keeles) võis nimetada *libiulatuseks* – see määrab karakterse mõõde, millest allpool klassikaline vooluseadus (1) enam ei kehti. Nanovoolamise iseärasused pakuvad suurt huvi rakendustes, mis on seotud mikroskoopiliste (kuni femtoliitriiliste) vedeliku-hulkade uurimisega ja nendega manipuleerimisega (biokeemiline analüüs, nanokeemia).

7. BIONOTORUD: MIKROTUUBULID

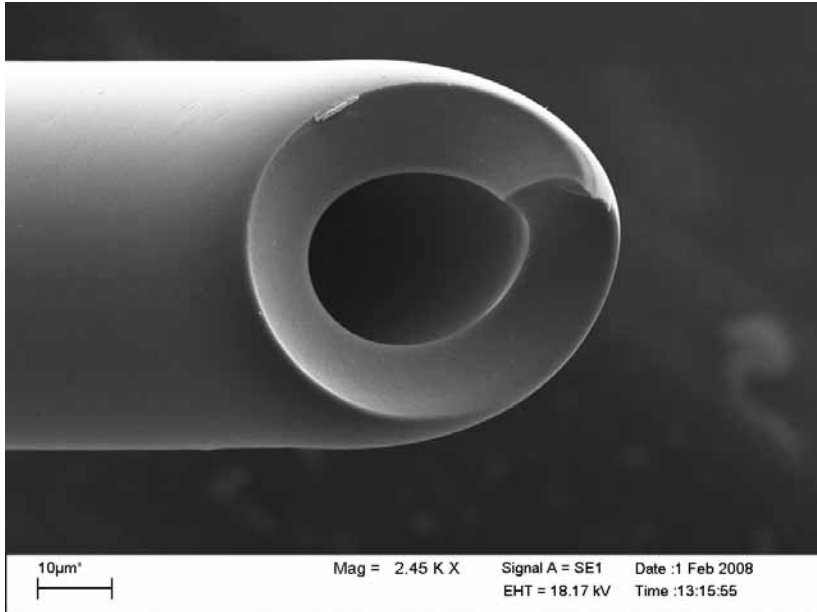
Torustruktuuride tuntud (makro)bioloogilisteks rakendusteks (rakenda-jaks muidugi Loodus ise) on kõrreliste varte ehitus, vere voolamine vere-

soontes (mis oli ka Poiseuille' otseks huviobjektiks) ja mõned muudki. Nende kõrval (ehk tuleks öelda „all“ või „sees“) eksisteerivad kõikides hulkraksete organismide (eukarüootide) rakkudes „bionanotorud“ – mikrotoobulid [4]. Mikrotoobulid on nn tubulaarproteiinidest koosnevad õõnessilindrilised moodustised (välisläbimõõt 25 nm, siseläbimõõt 15 nm, pikkus 1 ... 100 µm). Nad moodustavad nn rakuskeleti, ilma milleta poleks eukarüootsete organismide eksistents võimalik. Nende kunagine teke oli oluliseks sammuks bioloogilise evolutsiooni käigus. Mikrotoobulid „orkestreerivad“ rakkude paljunemisega (pooldumisega) seotud protsesse, sh pärilikkusinfot sisaldava rakutuuma jagunemist. On seega arusaadav, miks mitmete efektiivsete vähiravimite toime aluseks on mikrotoobulite funktsioneerimise mõjutamine. Mikrotoobulitel on ka oluline osa rakusisesel transpordil – nad on „kiirteedeks“, mida mööda transportproteiinid kannavad raku toimimiseks vajalikke ühendeid. Võrreldes „makrotorude“ ja süsinikanotorudega on mikrotoobulitel siiski üks oluline erinevus. Kui esimeste juures harilikult hinnatakse nende stabiilsust (mehaanilist tugevust), mis süsinikanotorude juures on lausa rekordiline, siis mikrotoobulite funktsioneerimiseks on vajalik nende piisav *labiilsus*. „Muude“ torude korral on valmistamine (vt allpool) ja kasutamine nii ajas ja ruumis kui ka vastavate füüsikaliste protsesside poolest selgelt eristuvad. Mikrotoobulite moodustumine (kasv) ja taandareng on aga nende funktsioneerimise oluliseks tahuks ja toimub rakus pidevalt. Nende protsesside vahel on rakus delikaatne ja hästi reguleeritud tasakaal. Kasutades mehaanikatermineid võib öelda, et mikrotoobulite seintes on tugevad sisepinged, mis – kui stabiliseerivad välised jõud kõrvaldada – tuubuli kohe purustavad.

Suhtlastiseks ja spekulatiivseks on senini jäänud küsimus mikrotoobulitega seotud resonantsidest (akustilistest, elektrilistest) ja nende võimalikust bioloogilisest tähtsusest – ehk on see midagi füüsikutele edasiseks puremiseks?

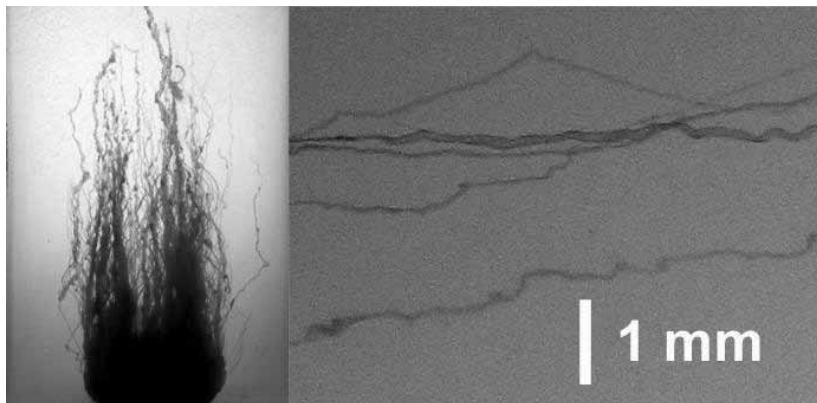
8. KUIDAS TORU TEHAKSE?

Süüvimata siinkohal tööstuslikesse „torutehnoloogiatesse“, märgime vaid, et kõik nad on (kui pikemate torude korral mitte väga praktiline „makaronipuurimine“ kõrvale jätta) variatsioonid kahel teemal: torude keeramine lehtmaterjalist järgneva kokkukeevitamisega või ekstrusioon keevisõmbulusega torude valmistamiseks, kus toru profiil saavutatakse plastselt voo-



Joonis 5. Hafniumoksiidist mikrotoru (Tanel Tätte & Aleksei Vorobjov, TÜ FI ja NanoTAK).

lava materjali (metallisulamid, plastid) surumisega välja kahe koaksiaalse silindri vahelt. Mikro- ja eriti nanotorude valmistamisel pakuvad suurt huvi nähtused, kus torud moodustuvad suhteliselt lihtsate („iseeneslike“) protsesside tagajärjel. Nii on süsinikkanotorude saamise efektiivseks meetodiks nende kasvatamine metalli (Ni, Co, Fe) nanoosakestel, kasvamiseks vajalik süsinik saadakse süsinikku sisaldava ümbrisgaasi katalüütilisel lagunemisel metalli pinnal. Selline toru kasvab „alt“ – s.t metalli pinnalt liituvad sellega järjest uued süsiniku aatomid. Kaks huvitavat ja potentsiaalsete rakendustega protsessi mikrotorukeste saamiseks on hiljuti leidnud TÜ Füüsika Instituudi teadlased. Nii täheldati, et sool-geel meetodil saadud titaandioksiidi lähteaine õhukesed kiled keerduvad teatud tingimustel rullikesteks diameetriga 2–50 mikromeetrit, kuumutamisel on võimalik saada sama kujuga oksiidstruktuure [5]. Samuti võib geelistumisprotsessiga ja geeli kuivamisega kaasnev ruumalamuutus geelfiibrite tõmbamisel anda tulemuseks õõnsaid struktuure (joonis 5). Õõnessilindriliste struktuuride moodustumisega on tegemist ka nn „keemilise aia“ korral – juba suht ammu tuntud efektses (kuid olemuslikult mitte lihtsas) keemiademos



Joonis 6. Vasksilikaadi torukesed „keemilises aias“. Peenemate torukeste läbimõõt on alla 0,1 mm.

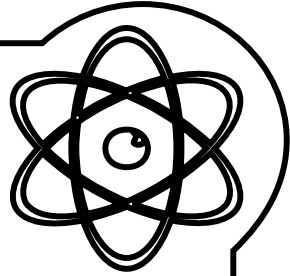
(joonis 6). Asetades vesiklaasi lahusesse (Na- või K-silikaadi vesilahus) vees lahustuvate soolade kristalle, mida moodustavate metallide silikaadid aga pole lahustuvad, võib täheldada soolast sõltuva kujuga „kasvude“ teket, mis vägagi meenutab bioloogilisi kasvuprotsesse. Nähtuse põhjuseks on lahustumatutest silikaatidest poolläbilaskva nanokristalse membraani (laseb sisse vett, ei lase aga välja solvateerunud metalliioone) teke ja selle purunemine osmootse rõhu toimel [6]. On huvitav märkida, et selle katse vägagi detailsele kirjeldusele on oma teoses „Doktor Faustus“ pea terve lehekülje pühendanud kuulus saksa kirjanik Thomas Mann [7].

Mõnede käesolevas artiklis käsitletud tulemuste saamist on toetanud Eesti Teadusfondi grandid ETF7141, ETF7612 ja ETF6660. Autor tänab Ants Lõhmust, Tanel Tättet ja Martin Järvekülge artiklis kasutatud materjalide eest.

KIRJANDUS

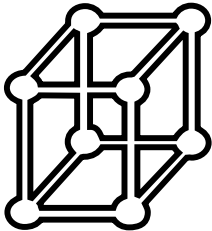
- [1] Carbon nanotube – Wikipedia: en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube
- [2] M. Majumder, N. Chopra, R. Andrews, B. J. Hinds “Nanoscale hydrodynamics: Enhanced flow in carbon nanotubes”, Nature 438, 44 (2005). doi:10.1038/43844a

- [3] M. Whitby, N. Quirke “Fluid flow in carbon nanotubes and nanopipes”, Nature Nanotechnology 2, 87 (2007). doi:10.1038/nnano.2006.175
- [4] Microtubule – Wikipedia: en.wikipedia.org/wiki/Microtubule
- [5] V. Reedo, M. Järvekülg, A. Lõhmus, U. Mäeorg “Novel route for preparation of tubular TiO₂ microstructures”, phys. stat. sol. (a) 205, No. 6, 1511 (2008). doi:10.1002/pssa.200778165
- [6] Materjalimaailm: Vesiklaas www.physic.ut.ee/materjalimaailm/
- [7] T. Mann „Doktor Faustus“ (tõlge H. Kross), Eesti Raamat, 1987 (lk 21–22)



**XXXIX
EESTI
FÜÜSIKAPÄEVAD**

**17. JA 18. MÄRTS 2009
TARTUS**



17.–18. MÄRTS 2009. A
TARTU ÜLIKOOLI FÜÜSIKAHOONE
SUUR AUDITOORIUM

TÄHE 4, TARTU

TEISIPÄEV, 17. MÄRTS

AVASESSIOON

Avasõnad	10.15
EFS preemiate kätteandmine, laureaadi ettekanne	10.30
Stefan Groot (TÜ FI)	
2008. a Nobeli füüsikapreemia.	11.30
Stendiettekanded, lõunapaus, EFS juhatuse koosolek	12.15
Henn Käämbre (TÜ FI)	
Universum kui oksüümoron.	13.15
Ergo Nõmmiste (TÜ FI)	
20 aastat eksperimente MAX-lab'is.	13.35
Andi Hektor, Yuji Kajiyama, Kristjan Kannike, Martti Raidal (KBFI)	
Tumedad tegelased osakestefüüsikas ja kosmoloogias	14.05
Hannes Tammet, Urmas Hörrak (TÜ FI)	
Nanomeeterosakeste tekkimine vee pritsimisel	14.25
Urmas Kvell, Ilmar Ansko, Tõnis Eenmäe, Siim Meerits, Priit Laes, Kaupo Voormansik, Katrin Tuude, Jüri Ruut, Silver Lätt, Mart Noorma (TÜ FI)	
Tartu Ülikooli satelliitside keskuse raadioühendused	14.55
<i>Kohvipaus</i>	15.10
Eesti Füüsika Seltsi üldkogu	15.30
<i>Transport</i>	17.30
Eesti Füüsika Seltsi seltsiõhtu	18.00

KOLMAPÄEV, 18. MÄRTS

TEADUSSESSIOON

D. Kropman¹, T. Kärner², I. Heinmaa³, T. Laas⁴, A. Medvid⁵**(¹TTÜ, ²TÜ FI, ³KBFI, ⁴TLÜ, ⁵Riia Tehnikaülikool)**Interaktsioon punktdefektide ja lisandite vahel süsteemis Si-SiO₂ ja nende mõju piirpinna omadustele 11.30**Heli Valtna-Lukner¹, Madis Lõhmus¹, Peeter Piksarv¹, Peeter Saari¹, P. Bowlan², R. Trebino²** (¹TÜ FI, ²Georgia Institute of Technology, USA)

Valgusimpulsside difraktsiooni ja ülevalguskiirusega levi uurimine femtosekundilise ajalise ja mikromeetrilise ruumilise lahutusega 11.45

Sander Mirme¹, Andreas Minikin², Toomas Bernotas¹, Margus Eller¹, Meelis Eller¹, Aadu Mirme¹ (¹TÜ FI, TÜ, ²Saksa Õhu- ja Kosmoselendude Keskuse Atmosfäärifüüsika Instituut)

Esimesed klasterioonide ja nanomeeter-aerosooli mõõtmised troposfääri ülemistes kihtides 12.15

Artur Suisalu (TÜ FI)

Ferrotoroidsed materjalid 12.30

ÕPETAJATE SESSIOON

Avasõnad 9.30

Jaak Jõgi, Enn Ööpik, Riina Leet, Kristel Hankov

Ülevaade uuest füüsika põhikooli ainekavast. 9.40

Marko Reedik (REKK)

Põhikooli eksam: analüüs ja arendus. 10.00

Arvo Mere (TTÜ)

Gümnaasiumi eksamist. 11.00

*Kohvipaus***Svetlana Ganina^{1,2}, Henn Voolaid²** (¹KVÜÕA, ²TÜ FI koolifüüsika keskus)

Hajusandmetega ülesannete lahendamise mõju füüsikaõppe efektiivsusele 11.30

Enn Pärtel (TÜ FI)

Puust ette ja punaseks: erinevate õpistiilide arvestamine füüsika õpetamisel 11.40

Kaido Reivelt (TÜ FI, EFS)

Virtuaalõppest 12.10

Füüsikaõpetajate osakonna üldkogu ja juhatuse valimised, arutelu, 2009. a plaanid, lõppsõna 12.20

Stendiettekanded, lõunapaus 13.20

ÜLDSESSIOON

Väino Sammelselg (TÜ FI)

Milli ja nano vahel. 14.00

Märt Aints, Matti Laan, Peeter Paris (TÜ FI)

Laserindutseeritud plasmaspetspektroskoopia
termotuumaprogrammis. 14.30

Marko Kaasik¹, Mikhail Sofiev^{1,2}, Marje Prank², Mirjam Paales¹

(¹TÜ FI, ²FMI)

Keemilise ilma mudelid ja prognoos 14.55

Ergo Nõmmiste (TÜ FI)

MAX-III kogujaringil asuva vaakumultravioletti kiirekanali I3 jätku-
kanal FINEST- Oulu, Turu ja Tartu Ülikoolide ühisprojekt 15.25

STENDISESSIOON

Priit Jaanson^{1,2}, Riho Vendt^{1,2}, Viktor Vabson^{1,2}, Toomas Kübarsepp¹,

Mart Noorma² (¹Eesti Metroloogia Keskasutus – AS Metrosert, ²TÜ FI)

Termokaamera näidu sõltuvus mõõdetava objekti kaugusest

Dmitri Martila¹, Risto Tammelo¹, Romi Mankin², Astrid Rekker²

(¹TÜ FI, ²TLÜ)

Müra tasasuse poolt indutseeritud stohhastiline transport kallutatud
tükati lineaarsetel potentsiaalidel

Artjom Vargunin, Teet Örd, Risto Tammelo (TÜ FI)

Faasisiirde ja stohhastilise resonantsi komplementaarsus lõpliku
ruumalaga süsteemides

Riho Vendt^{1,2}, Viktor Vabson^{1,2}, Toomas Kübarsepp¹, Mart Noorma²

(¹Eesti Metroloogia Keskasutus – AS Metrosert, ²TÜ FI)

Vee kolmikpunkti temperatuuri realiseerimise metrooloogiline jälgita-
vus Eestis

KEEMILISE ILMA MUDELID JA PROGNOOS

**MARKO KAASIK¹, MIKHAIL SOFIEV^{1,2},
MARJE PRANK², MIRJAM PAALES¹**

¹ TÜ Füüsika Instituut

² Soome Meteoroloogia Instituut

Keemiline ilm (*chemical weather*) on termin tähistamaks atmosfääri paljude lisandite omavahelist vastasmõju ja nende mõlemapidiseid seoseid atmosfääri füüsikalise seisundiga. Toimub areng ilmaprognoosi mudelitelt õhukeskkonna prognoosi mudelite suunas, mis hõlmavad õhu gaasiliste lisandite keemilisi muundumisi, sekundaarse aerosooli moodustumist nendest, gaasiliste lisandite ja primaaraerosooli allikaid. Lisandid avaldavad ilma ja eriti kliima kujunemisele mõju lühi- ja pikalainelise kiirguse neelamise ja pilvede moodustumise protsesside kaudu. Võib rääkida ka bioloogilisest ilmast – õhu biolisanndite levikust ja mõjust. Enamasti mõeldakse selle all allergeense õietolmu levikut, mille prognoosimiseks sobivad samad meetodid, mis igasuguse jämedisperse aerosooli puhul. Kõigi selle valdkonna mudelite „selgroog“ on vaba atmosfääri ja piirkihi dünaamika, millele „kinnituvad“ paljud mikrofüüsikalised, keemilised ja bioloogilised protsessid. Järgnevas antakse keemilise ilma mudeli näitena ülevaade Soome, Eesti ja Venemaa töörühmade koostöös arendatavast süsteemist SILAM. Terviklikkuse huvides käsitletakse ka mooduleid, mis ei kuulu otseselt füüsikasse – sõltuvused füüsikalistest keskkonnaparameetritest sisalduvad ka neis. Viimases osas antakse ülevaade selles vallas Euroopas ja üle maailma toimuvast.

1. MÕISTE, MIS TÄHISTAB UUT SUUNDUMUST

Mõiste „keemiline ilm“ on tulnud käibele viimase kümne aasta jooksul. Lawrence'i jt (2005) järgi mõistetakse selle all atmosfääri oluliste lisandite, nii gaaside kui aerosooli, kohalikku, regionaalset ja globaalset jaotumist ajaskaalas minutitest kuni tundide ja päevadeni, eriti erinevate mõjude kontekstis nagu inimese tervis, ökosüsteemid, meteoroloogiline ilm ja kliima. Niisiis on tegemist nähtusega, milles füüsikalistel protsessidel on vähemalt sama suur osa kui keemilistel. Kui keemilise ilma vaatlused õhu saasteseire jaamade näol on toimunud juba aastakümneid, siis mudelarvutuste ja prognoosi ajalugu ei ole palju pikem kui mõiste enda iga.

Meteoroloogia valdkonnas ei ole mudel mitte ainult ega isegi mitte peamiselt teadustöö abivahend, vaid just arendustegevuse lõpp-produkt. Lähipäevade ilm arvutatakse välja mahuka teadustöö tulemusena välja töötatud ja seejärel fikseeritud programmpaketiga, mis töötab rutiinselt kusagil ilmateenistuses ning tarbib üle maailma kokkujooksvaid algandmeid. Iga uue mudeliversiooni väljatöötamine ja kasutuselevõtt sarnaneb majanduslikus ja ajaskaala mõttes mistahes tehnoloogilise uuenduse juurutamisega.

Meteoroloogilise ilma esimesed numbrilised prognoosid tehti umbes 60 aastat tagasi kohe peale elektronarvuti loomist. Sellest ajast peale on ilmaprognoos arenenud koos arvutite täiustumisega, kasutades ära kogu olemasoleva ressursi – ilmateenistused on ühed suurimad arvutusvõimsuste kasutajad tänapäeva maailmas. Mudeli tuum on atmosfääri kui pidevat keskkonda kirjeldavad võrrandid, mida lahendatakse numbriliselt. Dünaamika võrranditele lisanduvad parametrizeeringud – arvutuseeskirjad protsesside kohta, mida mudeli (tavaliselt kümnepaarikümnekilomeetrine) võrgurakk ei lahuta, kuid millel on oluline mõju dünaamikale, näiteks kiirgusülekanne, rünkpilved, turbulentsed keerised. Algandmed hangitakse Ülemaailmse Meteoroloogiaorganisatsiooni võrgust, kuhu operatiivselt laekuvad meteojaamade mõõtetulemused üle maailma.

Kõige lihtsamini prognoositav keemilise ilma element on passiivne lisand – aine, mis levib koos õhumassiga ja ei muundu leviku käigus. Passiivse lisandi leviku kirjeldamiseks piisab, kui lisada atmosfääri dünaamika võrranditele lisandi turbulentset difusiooni ja adveksiooni kirjeldav võrrand. Töötava mudeli loomine ei ole siiski nii lihtne, sest vajatakse turbulentsse ülekande koefitsiente, mis protsessi stohhastilise

iseloomu tõttu ei ole arvatavad fundamentaalsetest füüsikaseadustest – empiirilised lähendused on möödapääsmatud.

Enamik saasteaineid atmosfääris ei ole passiivsed lisandid. Toimuvad keemilised reaktsioonid nii õhu makrokomponentidega kui omavahel – viimased sõltuvad lisandite kontsentratsioonidest, järelikult tuleb kontsentratsioonid arvutada sarnaselt meteoroloogiliste muutujatega igal ajasammul. Teatud keemiliste reaktsioonide saadused lähevad üle vedelasse või tahkesse faasi – moodustuvad aerosooliosakesed. Nendega toimub edasi rida erinevaid protsesse: osakesed kasvavad gaasiliste lisandite kondenseerumisel ja ühinevad omavahel põrkudes, küllalt suureks kasvades sadenevad raskusjõu mõjul ja pestakse sademetega välja. Kõigi keemiliste ja aerosooliprotsesside (erineva suurusega osakesed käituvad väga erinevalt, mistõttu nad tuleb jagada suurusvahemikeks) arvessevõtmine lisab mudelisse palju rohkem võrrandeid kui „raamistikku“ moodustavad dünaamika- ja difusioonivõrrandid. Et saada reaalajast kiiremini töötavat mudelit, tuleb teha palju lihtsustusi. See, kuidas lihtsustada keemia- ja aerosoolivõrrandeid nii, et olulised protsessid säiliks talutava täpsusega, on keemilise ilma modelleerimise üks võtmeküsimusi. Arvutite areng küll parandab keemilise ilma modelleerimise väljavaateid, kuid kõigi teadaolevate protsesside arvessevõtmisest on reaalsed võimalused veel väga kaugel.

Teine suur väljakutse on arvestada keemilise ilma tagasimõju atmosfääri dünaamikale. Gaasilised lisandid ja eriti aerosool mõjutavad atmosfääri läbipaistvust. Kondensatsioonituumade rohkus soodustab pilvede moodustumist. Pilvede omadused võivad sõltuda sellest, millise läbimõõduga aerosooliosakesi õhus leidub. Kui kõrgrõhkonna õhus on palju tahkeid osakesi (näiteks metsatulekahjude tõttu), siis võib päikesekiirguse neeldumine nendes põhjustada tugevat temperatuuriinversiooni, mis omakorda halvendab hajumistingimusi. Eriti suuri lootusi pannakse tagasisidemehhanismide detailsele arvessevõtmisele kliimamudelite täiustamisel (Ghan & Schwarz, 2007).

2. SILAM – SOOME KEEMILISE ILMA MUDEL

SILAM loodi Soome Meteoroloogianstituudis üheksakümnendate aastate keskel ja oli algselt mõeldud tuumaõnnetuses õhku paiskuvate radionukliidide leviku prognoosimiseks. Viimase kümne aasta arenduse

tulemusena on sellest saanud üks tähelepanuväärsemaid keemilise ilma modelleerimise süsteeme.

Nagu enamik tänapäeva atmosfäärse leviku mudeleid, ei arvuta SILAM meteoroloogilisi suurusi ise, vaid kasutab tuulevektorite, temperatuuri, õhurõhu ja paljude muude vajalike suuruste välju, mis saadakse meteoroloogilise (ilmaprognooosi-) mudeli väljundist. Võimalik on kasutada mistahes mudeli välju, mis on salvestatud Ülemaailmse Meteoroloogiaorganisatsiooni standardformaadis GRIB. Ka SILAM-i väljundtulemusi – lisandite kontsentratsioonid, sadenemisvooge, (pöördülesande) tõenäosustihedusi – saab salvestada GRIB formaadis, kuid enam kasutatakse meteoroloogiliste väljade visualiseerimise programmi GrADS formaati.

SILAM-i tuum seisneb turbulentses difusiooni-advektsioonivõrrandi numbrilises lahendamises (Sofiev jt, 2006). Võrrandi üldkuju on:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \phi) - \frac{\partial}{\partial x_i} \mu_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} + \sigma \phi = f, \quad (1)$$

kus ϕ on lisandi kontsentratsioon, u_i tuule kiiruse komponendid ja μ_i turbulentses ülekande koefitsiendid koordinaattelgedes x_i sihis (üldjuhul ei ole võrdsed ning sõltuvad ruumipunktist ja ajast), σ tähistab neelude ja f allikate välja – mõlemad on võrrandi (1) lahendamisel välised parameetrid, mis võivad olla nullist erinevad kogu ruumi ulatuses; neelud (sadenemine, väljapesemine, keemilised muundumised) on üldjuhul võrdelised kontsentratsiooniga, mistõttu kirjutatakse kujul $\sigma \phi$.

Võrrand (1) kirjeldab lisandi levikut tuntud allikatest – see on atmosfäärse leviku klassikaline otseülesanne. SILAM võimaldab lahendada ka pöördülesannet, kasutades selleks põhiliselt sama programmikoodi. See põhineb formaalselt sarnasel võrrandil, mis matemaatiliselt on võrrandi (1) kaasvõrrand:

$$\frac{\partial \phi^*}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \phi^*) - \frac{\partial}{\partial x_i} \mu_i \frac{\partial \phi^*}{\partial x_i} + \sigma \phi^* = p, \quad (2)$$

kus suurust ϕ^* nimetatakse tundlikkusjaotuseks ja p tundlikkusallika-funktsiooniks – viimaseks võib olla näiteks seirejaamas mõõdetud kontsentratsioon. Lahendades võrrandit (2) ajas tagasi, saadakse siis tundlikkusjaotus $\phi^*(t, x_i)$, mis väljendab tõenäosustihedust, et selles ruumipunktis

sel ajahetkel asuv lisand detekteeritakse hiljem seirejaamas. Funktsiooni $\phi^*(t, x_i)$ kujutist kaardil nimetatakse sageli allika p jäljeks (*footprint*). Jälg annab mõõdetud lisandi võimalikust päritolust hulga parema ettekujutuse kui klassikaline tagasijälituse trajektoori – lõpmata peenike joon ei võimalda hinnata, kui kaugel sellest asuvad allikad on võimelised andma panuse mõõdetud väärtusesse. Selle võimaluse eest võlgname tänu difusiooniliikmele (kolmas liige võrrandis (2) vasakul poolel).

Võrrandi (1) või (2) lahendamiseks on SILAM-is kaks alternatiivset arvutuskeemi ehk tuuma.

Nn Lagrange'i tuum asendab pideva funktsiooni ϕ või ϕ^* diskreetsete prooviosakestega – sisuliselt on tegemist Monte-Carlo meetodiga. Need osakesed liiguvad kaasa põhivooluga tuulte väljas (adveksioon) ja omandavad juhuslikke nihkeid õhu keeriseselises liikumises (turbulentne difusioon). Prooviosakese juhuslik nihe $\Delta x_i'$ horisontaalmõõtmes parameetriseeritakse nii:

$$\Delta x_i' = ra \cdot (\Delta x_i)^b, \quad (3)$$

kus r on normaaljaotusega juhuslik arv (jaotuse parameetrid sõltuvad meteotingimustest), Δx_i deterministlik (adveksiooni-)nihe ajasammu jooksul, empiiriline koefitsient $a=0,5$ atmosfääri piirkihis ja $0,25$ vabas atmosfääris ning astmenäitaja $b=0,875$ (Saltbones jt, 1996; Sutton, 1953). Vertikaalmõõtmises eeldatakse täielikku läbisegunemist piirkihis, mis tavaliselt kasutatava horisontaalse võrgulahutuse 10 km ja rohkem juures on mõistlik. Piirkihist väljumine on selle mudeli eeldustel võimalik vaid piirkihi paksuse (saadakse otse meteoandmetest või parameetriseeritakse) muutumisel või õhumassi suunatud tõusval liikumisel. Prooviosakese nihe ajasammul saadakse Δx_i ja $\Delta x_i'$ liitmisel.

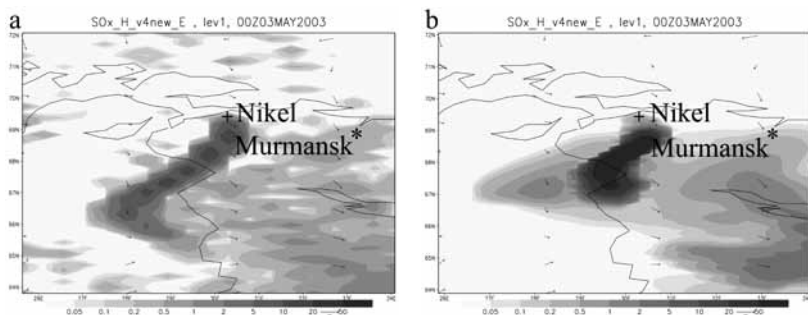
Lagrange'i tuum on SILAM-i „süda“ mudeli loomisest peale. Kuigi vaatamata lihtsusele töötab see arvutuskeem üllatavalt adekvaatselt (Sofiev jt, 2006), jäi ta hiljuti arendustööle jalgu. Peapõhjus seisneb selles, et Lagrange'i osakeste mudel ei võimalda samaaegselt levikuga arvesse võtta muundumisi, mis sõltuvad kahe või enama lisandi kontsentratsioonidest, nagu mittelineaarsed keemilised reaktsioonid ja aerosooli dünaamika (see ei kehti radioaktiivse lagunemise ning lisandi ja õhu makrokomponendi vahelise reaktsiooni puhul, mis on lineaarsed protsessid). Teiseks on Lagrange'i tuum seda ebaefektiivsem, mida enam on lisandi allikad geograafiliselt laiali paigutatud: suurteil aladel suurus-

järgudes erinevate kontsentratsioonide väljendamiseks vajatakse väga palju prooviosakesi, mis teeb arvutuse aeglaseks. SILAM on võimeline mõistliku kiirusega jooksmas kuni mõne miljoni prooviosakesesega, kuid sedagi kipub näiteks kogu Euroopa õhusaaste detailseks modelleerimiseks väheks jääma.

Euleri tuum on SILAM-is alternatiivina kasutusel 2008. aastast. Võrrandeid (1), (2) lahendatakse aluspinna suhtes paigalseisvas taustsüsteemis diskretiseerides. Kasutatakse M. Galperini poolt loodud (Galperin, 1999) massi jäävust jälgivat ja pikka ajasammu (seega suurt arvutuskiirust) võimaldavat horisontaalset numbrilist skeemi. Selle skeemi puuduseks on, et kood on väga raskesti paralleliseeritav – seni pole seda üritatud. Vertikaalne diskretiseerimine on läbi viidud mahtuvus-takistus-elektriahela analoogi järgides, kus mahtuvuse asemel on kihi paksus, takistuse asemel vertikaalse ülekandekoefitsiendiga läbijagatud naaberkihtide masskeskmete vahekaugus ja laengu asemel lisandi mass kihis ühikulise pindala kohta (Sofiev, 2002). Seegi arvutusskeem on kokkuhoidlik, sest võrguraku sisese (lisandi massikeskme) info kasutamine võimaldab kordades vähendada tasemete arvu. Euleri tuumaga kaasnevad mitmed lisavõimalused, näiteks vertikaalse hajumise detailsem käsitus varasema täieliku segunemise ja piirkihi-vaba atmosfääri eralduspinna läbilaskmatuse asemel, mis annab häid tulemusi ka peenematel horisontaallahutustel – kuni umbes 1 km. Hea näide „Euleri“ SILAM-i võimalustest on see, et ta jookseb mõistliku kiirusega globaalsel võrgul, kasutades üht protsessorit.

Joonisel 1 on toodud sama hajumisülesande tulemus, mis on saadud nii Lagrange´i kui ka Euleri tuuma kasutades. Soome Lapimaa kirdenurgas Värriö seirejaamas (umbes 200 km Nikelist lõunas) tehtud mõõtmised näitasid sel ajal aerosooli järsku tõusu atmosfääris. Kontsentratsioon oli Lagrange´i tuumaga mõnevõrra ala- ja Euleri tuumaga ülehinnatud (Kaasik jt, 2008). Lagrange´i tuumaga saadud kaardil on näha ühe-kahe võrguraku suurused laigud, mis tulenevad prooviosakeste juhuslikust jaotumisest.

Üheks põnevamaks protsessiks, mille päritolusse aitab selgust tuua hajumise pöördülesanne (2), on nukleatsioonisündmus. Tegemist on nanomeeterosakeste puhangulise ilmumisega maalähedases õhukihis, mis tuleneb madala küllastunud auru rõhuga lisandite (mitte vee!) kondenseerumisest. Massi poolest on nanoosakesi atmosfääris vähe – nanogrammide kuupmeetris –, kuid edasise kondensatsiooni tõttu tundide jooksul kümnete ja sadade nanomeetrite suurusteks Aitkeni tuuma-

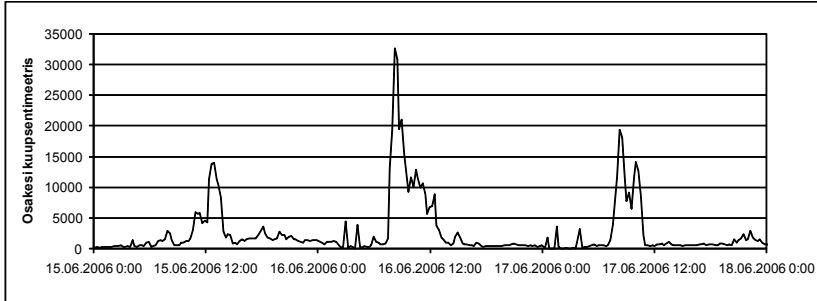


Joonis 1. Aerosoolse sulfaadi maapinnalähedased kontsentratsioonid Nikeli metallurgia-kombinaadist 2003. aasta 3. mai keskööl arvatuna SILAM-i Lagrange'i (a) ja Euleri (b) tuumaga (meteoroloogilised andmed – Soome Meteoroloogiainstituudi mudel HIRLAM). Kaardil on kujutatud ka maapinnalähedased tuulevektorid sellel hetkel.

deks kasvades omandavad need osakesed võtmetähtsuse pilvetilkade moodustumisel. Nukleatsioonisündmuste tekkemehhanismid ei ole lõpuni selged – nähtavasti on protsessi algaasis oluline roll sulfaadil, ammoniumil ja õhu ioonidel, kasvamisel kondenseeruvad orgaanilised aurud, mis võivad pärineda nii heitgaasidest kui ka taimsetest eritistest (okaspuud ning teatud lehtpuu- ja puhmaliigid). Ilmselt toimub nanoklastrite moodustumine atmosfääris kogu aeg, kuid mõõdetavad puhangud ilmuvad ainult teatud tingimustel, millest tähtsaim on difusiooni teel nanoosakesi neelavate suurte (mikromeetri suurusjärgus) aerosooliosakeste vähesus õhus – seetõttu esineb nukleatsioonipuhanguid sageli arktilises õhumassis, soodustavaks teguriks on ka intensiivne päikesepaiste, mis põhjustab kondenseerumiseks vajalikke fotokeemilisi reaktsioone.

Tugevaid nukleatsioonisündmusi ei esine kuigi tihti. Tähelepanuväärsed puhangud kolmel järjestikusel päeval registreeriti TÜ FI aerosoolilabori poolt koostöös Leedu kolleegidega Kura säärel Preila seirejaamas 15.–17. juunil 2006. aastal (joonis 2).

Kust oli pärit see õhk ja kui kiiresti ta mõõtekohta jõudis? Kas kõik kolm sündmust toimusid ühtlases õhumassis? Kuigi praegusel tasemel ei ole SILAM-is aerosooliprotsesse, võimaldab see mudel siiski detailset õhumassi tagasijälitust. Nukleatsioonisündmused toimuvad küll mõne tunni jooksul, enamasti hommikupoolikul, kuid aerosooli prekursorid (eeldusained) ja füüsikalised eeldused (näiteks vähe mikromeeterosakesi) kujunevad palju pikema aja vältel levivas õhumassis. Joonisel 3



Joonis 2. Nukleatsiooniosakeste (läbimõõt 10 – 32 nm) kontsentratsioonid Preilas 15.–17.06 2006. aastal. Tundlikkusallikafunktsioonina kasutamiseks elimineeriti foonimüra – masskontsentratsioonid kuni 20 ng/m^3 , mis vastab ligikaudu arvkontsentratsioonile 5000 osakest kuupsentimeetris.

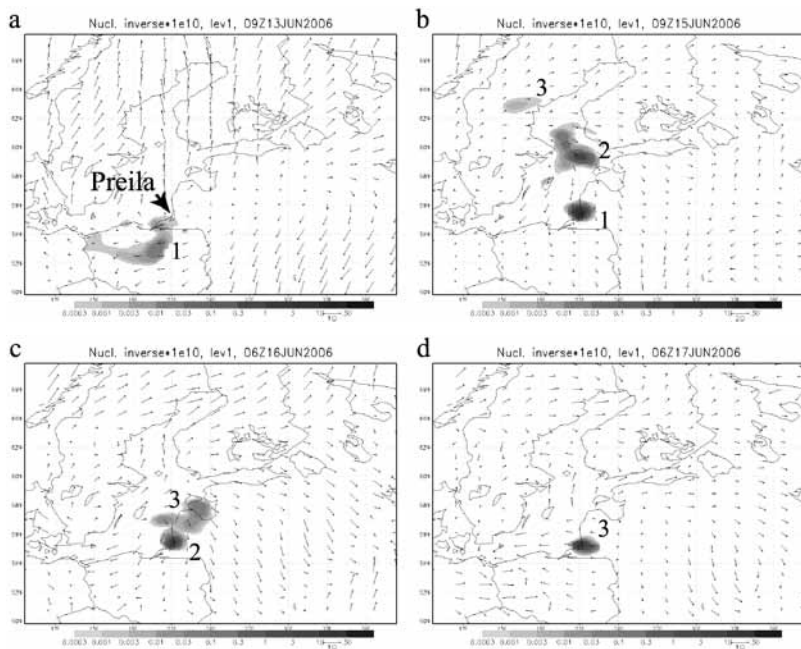
on näidatud nimetatud kolme nukleatsioonipuhangu jälgede liikumine nelja ööpäeva jooksul.

Jooniselt 3 ilmneb, et 15. juuni sündmus kujunes peaaegu paigalseisvas kontinentaalses õhumassis, kahe järgneva sündmuse õhumass aga saabus suhteliselt kiiresti põhjast – viimaste puhul on nähtavasti tegemist peaaegu sama protsessi kordumisega kahel järjestikusel sarnase ilmaga päeval. Kogu kolmepäevasele perioodile oli iseloomulik püsiv kõrgrõhkkond keskmega vaatluskoha lähedal. Õhumassid ei ületanud viimastel päevadel tihedalt asustatud piirkondi, küll aga viibisid metsate alade kohal – oletada võib taimsete lenduvate ühendite mõju.

3. SELLEST, MIS ON SILAM-I TUUMA ÜMBER

Eelmise punktis kirjeldatud mudeli „selgroole“ lisanduvad erinevate protsesside parametrizeeringud. Mida rohkem neid on, seda mitmekesisemate lisandite levikut saab mudeliga prognoosida. SILAM-i koodi mahust moodustavad parametrizeeringud kaugelt suurema osa kui numbriline tuum. Taoline põhimõtteline struktuur on iseloomulik igale keemilise ilma mudelile.

Meteoroloogiline preprotsessor. Meteoroloogilise mudeli väljundmuutujate komplekt on piisav ilma kirjeldamiseks, kuid mitte lisandi leviku arvutamiseks. Põhiliselt kehtib see atmosfääri piirkihi, see on aluspinnast tugevalt mõjutatud kihi ehk laias laastus alumise kilomeet-



Joonis 3. Preilas 15.–17.06.2006 mõõdetud nukleatsioonipuhangute tundlikkusjaotused ehk jäljed: a) 13. juuni hommikul, b) 15. juuni hommikul, c) 16. juuni varahommikul, d) 17. juuni varahommikul. Numbritega 1, 2 ja 3 on tähistatud vastavalt 15. 16. ja 17. juunil mõõdetud sündmuste jäljed. Tundlikkusallikafunktsioon vt joonis 2.

ri kohta. Piirkihis paiknevad peaaegu kõik saasteallikad. Osad vajalikud parameetrid (näiteks piirkihi paksus, aluspinna karedus) on meteomudelil arvutatud, aga hajumisarvutuse jaoks ebapiisava täpsusega – tegemist on sisemiste parameetritega, mis otseselt ilmaennustuses ei sisaldu, seetõttu on nende arvutusskeeme reeglina katseliselt „tuunitud“ õigete vertikaalsete soojus- ja impulsivoogude saamiseks aluspinna ja vaba atmosfääri vahel. Tulemus ei pruugi sobida peamiselt piirkihis toimuva protsessi kirjeldamiseks, mistõttu preprotessor arvutab need dünaamiliste muutujate alusel uuesti, kuid reeglina eksisteerib ka valikuvõimalus kasutada otse meteomudelil saadud suursi. Teiseks on mitmeid suursi, mis kirjeldavad turbulentset ülekannet piirkihis või isegi ainult pinnakihis (umbes alumine 1/10 piirkihist) ja mida meteomudel üldse ei arvuta. Need on näiteks turbulentse soojus- ja lisandi ülekande koefitsient, Monini-Obuhhovi pikkus, hõõrdekiirus ja piirkihi

temperatuurimastaap, mille paljude vahesuurustega, poolempiiriline ja osalt iteratiivne arvutuskeem põhineb SILAM-is vene teoreetikute töö (Groisman & Genikhovich, 1997).

Kuiv- ja märgsadenemine. Lisandi leviku juurde kuulub lahutamata erinevate atmosfäärist väljasadenemise mehhanismide arvestamine. Nende tähtsus on kahepidine: ühelt poolt väheneb lisandi kontsentratsioon atmosfääris, teiselt poolt võib väljasadenev aine avaldada olulist keskkonnamõju. Drastilisemal juhul pesevad lühiajalised kuid tugevad sajud välja praktiliselt kogu saaste, mis sadeneb väikesele alale. Lisandi kontsentratsiooni vähenemist sademete tõttu arvestatakse SILAM-is kujul $d\phi/dt = -\Lambda\phi$; $\Lambda = \eta R^v$, kus R on saju intensiivsus (millimeetrit tunnis) ning koefitsiendid v ja η sõltuvad sademete tüübist, neelamise tüübist (pilvesisene, pilvealune) ja lisandist. Kuivsadenemine (lisandi adsorptsioon aluspinnal) põhineb sadenemiskiirusel, mille empiirilisi arvvaartusi on maailmas vaadeldud aastakümneid. Raskete osakeste korral lisandub sellele gravitatsioonilise sadenemise suunatud kiirus. Mõlemat sadenemismehhanismi arvestatakse ka pöördülesande lahendamisel: siis on tegemist ajas tagasi minnes kasvava tundlikkusjaotuse väärtusega, mis võimaldab rekonstrueerida mõju tugevuse juhul, kui tundlikkusallika signaal oli vaatamata sadenemise tõttu nõrgenemisele siiski detekteeritav.

Keemilised muundumised. Väaveldioksiidi muundumine väävelhappeks ja sulfaatideks oli olemas ja hästi testitud juba koos Lagrange´i tuumaga – tegemist on lineaarsete reaktsioonidega, mis toimuvad üksnes lisandi ja õhu makrokomponentide (hapnik, veeaur) vahel. Selliseid reaktsioone on võimalik arvestada Lagrange´i osakest ajas üksteisest sõltumatult muutuva kontsentratsiooniga ainete vahel „jagades“. Euleri tuum avas võimalused arvesse võtta põhimõtteliselt mistahes keemilisi reaktsioone, kui vaid arvutusteks kuluv aeg on talutav. Praegu on SILAM-i keemiablokk testimise faasis. See hõlmab lämmastiku oksiidide jt tähtsamate happeliste lisandite muundumised, troposfääriosooni ja lenduvate orgaaniliste ühendite reaktsioonid – tähtsamatest inimtekkelistest ja looduslikest saasteallikatest õhku paiskuvate ühendite muundumised.

Aerosooli dünaamika ei ole praegu veel SILAM-i koodi integreeritud, kuid suurem osa eeldusi selleks on täidetud. Tegemist on ühe suurima väljakutsega tänapäeva õhu kvaliteedi mudelite arenduses – siiani ei ole teada ühtki rutiinselt kasutatavat mudelit, kus see töötaks, kuid

arendustöö selles suunas kestab juba aastaid. Probleemid on üldjoontes samad, mis keemiliste reaktsioonide puhul. Nanomeeterosakesed kasvavad mõne tunniga Aitkeni tuumadeks ja edasi nn akumulatsiooniosakesteks läbimõõduga 0,1 – 1 μm , mis püsivad atmosfääris keskmiselt nädala. Veelgi suuremad osakesed paiskuvad õhku mitmesuguse tolmu ja tuhana. Nende eluiga on lühem, sest nad sadenevad raskusjõu toimel. Suured osakesed neelavad difusiooni tõttu väiksemaid. Nukleatsiooni- ja neeldumisprotsessid on nii kiired, et neid tuleb modelleerida igal ajasammul, mille pikkuseks on tüüpiliselt kümnekond minutit. Aerosooliga toimuvaid protsesse, eriti väiksemate osakestega, mõjutab nii erinevate osakeste erinev keemiline koostis kui ka erinevad ained ühe osakese koostises. Ühtlases ruumalas toimuvate aerosooliprotsesside arvutamiseks on tehtud väga detailseid mudeleid, milles võib olla sadu osakeste suuruse vahemikke (fraktsioone) ja sama palju keemilisi koostisaineid, kuid niisugune mudel on lootusetult aeglane, kui ta peab arvutama tuhandetes võrgurakkudes. Vaja on midagi „kergemat“, kuid samas piisavalt adekvaatset.

Niisuguseks arvutusaega säästvaks aerosoolidünaamika mudeliks osutus Helsingi Ülikoolis väljatöötatud SALSA (Kokkola jt, 2008). Osakeste suurusjaotus vahemikus 3 nm – 10 μm on jagatud kümnesse erineva laiusega fraktsiooni. Erineva suurusega osakeste jaoks võetakse arvesse ainult neid protsesse ja keemilisi koostisosi, mis on just nende jaoks kõige tähtsamad. SALSA-ga 12-tunnisel ajavahemikul 15-minutilise ajasammuga arvutatud kondensatsiooni- ja koagulatsiooniprotsessi võrreldi detailsete mudelitega (vastavalt CONDEFF ja COAGUL). Erinevused olid väheolulised.

Mudeli kontroll AOD põhjal. Mudelarvutuse täpsuse kontrolliks ei piisa hõredalt maapinnal paiknevatest seirejaamadest. Hulga informatiivsem on kasutada selleks kaugseire ja maapealsete optiliste mõõtmiste andmeid. Selleks on SILAM-ile välja töötatud moodul (Prank, 2008), mis põhineb eksperimentaalselt mõõdetud ekstinktsiooni ristlõigetel gaasiliste ainete jaoks ja sisaldab Mie' teoorial põhinevaid arvutusi aerosooliosakeste jaoks. Praeguse seisuga suudab SILAM arvutada optilisi paksusi, mida mõõdavad AERONET-i maapealsed mõõtejaamad. MODIS-e satelliitmõõtmisest aerosooli optilise paksuse (AOD) arvutamiseks tehakse teatavaid eeldusi aerosooli koostise kohta. SILAM-i arvutustulemuste võrdlus MODIS-ega Euroopas näitas süstemaatilist AOD alahindamist. Alahindamise põhjusteks võivad olla ääretingimus-

te puudumine SILAM-is aerosoolide jaoks, mistõttu puuduvad panused Ameerikast ja Atlandi ookeanilt; tolmuosakeste puudumine mudelis, mis võivad omada Lõuna-Euroopas olulist osakaalu, ja puuduvad andmed MODIS-e AOD kaartidel, mis ei sisalda pilvealuseid väärtusi, mis võivad olla madalamad märgsadenemise tõttu.

Variatiivne andmehõive (*variational data assimilation, 4D-VAR*) on SILAM-is edukalt katsetatud võimalus emissioonide määramatusest tulenevate mudelarvutuse vigade silumiseks. Eriti keeruline on heitkoguste hindamine juhusliku iseloomuga looduslike allikate korral. Heitkoguste täpsustamiseks kasutatakse seiremõõtmiste andmeid ning iteratiivselt hajumisarvutuse otse- ja pöördülesande lahendamist. Meetodi katsetamine kahenädalasel ajavahemikul 260 Kesk-Euroopa seirejaamas mõõdetud vääveldioksiidi kontsentratsioonidele tuginedes näitas, et heitkogused suurimast allikast, Etna vulkaanist, on kordades ülehinnatud. Erinevusi leiti ka mõnedes inimtekkelistes allikates nagu Po jõe org Põhja-Itaalias ja mõni piirkond Tšehhimaal. Peale korrektsioonide sisseviimist allikaliikmesse paranesid mudelarvutuse tulemused oluliselt – seda kontrolliti mõnekümne andmehõives kasutamata seirejaama mõõtmiste põhjal (Vira, 2008).

Loodustulekahjude heitmete hõive. Loodustulekahjud on üks kontrollimatuid ja samas tugevamaid jämedate aerosooliosakeste allikaid. Suits kevadistest kulupõlengutest Ukraina ja Lõuna-Venemaa steppides ning suvistest metsatulekahjudest Ida-Euroopas ja Vahemere maades mõjutab tuntavalt peaaegu kogu Euroopa õhku. Kui inimtekkelised heitmed on mingis lähenduses arvutatavad tehnoloogiast lähtudes, siis tulekahjude puhul tuleb lähtuda kaudsetest andmetest, millest võimsaimaks taas on kaugseireandmestik. SILAM on varustatud välise mooduliga, mis hindab metsatulekahjude tuhaemissioone kahel meetodil: lihtsa temperatuurianomaalia põhjal ja tule kiirgusvõime (kiirgusenergia hulk ajaühikus) põhjal. Kiirgusvõime (megavatti ruutkilomeetri kohta) arvutatakse infrapunapildi põhjal valemist $E_f = 4,34 \cdot 10^{-19} (T_f^8 - T_b^8)$, kus T_f ja T_b on vastavalt tulest haaratud võrguraku kiirgustemperatuur ja tausta kiirgustemperatuur mõõdetuna lainepikkusel 3,96 μm . Kiirgusvõime on hästi korreleeritud ajaühikus põleva biomassiga ja konvektiivse soojusvooga – nende suurustega on üldiselt määratud õhku paisatava aine hulk. Kiirgusvõimel põhinev meetod on teoreetiliselt hästi põhjendatud, kuid kiirgustemperatuuri kaheksas aste (!) arvutusvalemis muudab ta ülearu tundlikuks mõõtevigadele. Tausta kiir-

gustemperatuuri ei ole alati lihtne määrata: seda hinnatakse naaberpikslite temperatuuride järgi, kuid kui tulest on haaratud vaid osa pikslist, ei saa üheselt vahet teha põleva ja mittepõleva ala vahel. Siiski suurte (ruutkilomeetritesse ulatuvate) põlengute emissioonid on üsna täpselt määratavad.

Meresoola emissioon. Merest eralduvad pritsmed on üks olulisi aerosooli allikaid. Pritsmete kuivamisel õhus jääb järele meresoolast tuum, mis hügroskoopsuse tõttu sisaldab õhuniiskusest sõltuvalt rohkem või vähem vett. Kuni kaunis viimase ajani arvati, et merepinnal õhumullide lõhkemisel tekkivad, piiskadest jäävad soolaterakesed on mitte väiksemad kui 100 µm. Detailed laborikatsed näitavad siiski, et õhumulli katva õhukese veekile pihustumisel tekib arvestataval hulgal ka mõnekümne nanomeetriseid osakesi, mille suurusjaotuse peendis dispersne ots võib isegi kattuda nukleatsiooniosakestega (Mårtensson jt, 2003). Selle töö tulemused on võetud aluseks SILAM-i meresoola emissioonide arvu-tusskeemis. Juhtparameetrid on tuule kiirus, merevee soolsus ja temperatuur (külm vesi annab mõnevõrra rohkem pritsmeid).

Taimsete lenduvate orgaaniliste ühendite emissioonid. Taimede, peamiselt okaspuude ja osade lehtpuude, eritised – peamiselt isopreen ning mono- ja seskviterpeenid – esinevad õhus tavaliselt kogustes kuni mõni mikrogramm kuupmeetris, kuid madala küllastunud auru rõhuga ja väga reaktsioonivõimeliste ühenditena on neid kindlasti vaja arvestada aerosoolidünaamika moodulis. SILAM-is on kasutusel (esialgu testimise järgus) emissioonimoodul, mis arvestab taimestiku emissioonivõime hindamiseks 200 Euroopas levinud maakasutustüüpi, andmebaasi võrgulahutus on 1 km. Emissioonide hindamine põhineb klassikalisel tööil (Guenther jt, 1993), juhtparameetrid on õhutemperatuur ja päikesekiirguse voog.

Allergeense õietolmu emissioonid. Õietolmul on kõigist õhusaaste liikidest kõige konkreetsemad tervisemõjud: see, missuguse õietolmu milliste kontsentratsioonide juures kui palju allergikuid vajab arstiabi ja kui palju tööpäevi läheb kaduma, on meedikutele hästi teada. Profülaktilise ravi ja eluviiside korrigeerimisega saab tagajärgi oluliselt leevendada. Vaatamata sellele ei ole enamikus maades seni riiklikku tellimust õietolmu kauglevi seireks ja prognoosiks. Olukord on aga muutumas allergikute osakaalu kiire kasvu tõttu heaolumaade rahvastikus.

Õietolmuterad on suhteliselt suured (paarkümmend mikromeetrit), kuid küllaltki kerged – suuremal osal liikidel umbes vee tihedusega, mõ-

nedel okaspuuliikidel veel oluliselt kergemad. Soodsate õhuvooludega võib õietolm levida ühest Euroopa otsast teise. SILAM-is on praegu olemas Põhja-Euroopas enim terviseprobleeme põhjustava kase õietolmu emissioonide arvutusmoodul, mille peamiseks juhtparameetriks on varakevadest saadik kogunenud õhutemperatuuride summa, millega korreleeruvad hästi õitsemise alguse ja lõpu ajad. Arvestatakse õietolmu eraldumise katkemist sadude ja külmalainete tõttu. Geograafiliseks alusmaterjaliks kase leviku määramiseks on taas Euroopa maakasutus. Perspektiivis vajatakse emissioonimooduleid ka kõrreliste, oliivipuu ja ambrosia (Lõuna- ja Kesk-Euroopas levinud umbrohi) õietolmu jaoks. Peamiselt seoses õietolmuga on hakatud rääkima sarnaselt keemilisele ilmale ka bioloogilisest ilmast.

SILAM-i reaalaraja prognoosid vääveldioksiidi, sulfaadi, tahkete osakeste, meresoola, loodustulekahjude lendtuha ja õietolmu kohta Euroopas on nähtavad veebilehel silam.fmi.fi. Samas on vabalt allalaaditav ka SILAM ise – töötav programm ja selle FORTRAN-kood.

4. KEEMILISE ILMA MUDELID JA RAHVUSVAHELINE KOOSTÖÖ

Mitmesuguses arengustaadiumis ja mitmesuguse rõhuasetusega õhulisandite leviku mudeleid on teaduslikus ja operatiivses kasutuses märgatavalt rohkem kui ilmaprognoosimudeleid. Nähtavasti on peapõhjuseks see, et suhteliselt kitsale saasteainete rühmale orienteeritud mudelid on oluliselt vähem nõudlikud nii arvutusressursi kui algandmete hulga ja operatiivsuse suhtes. Ka ei ole kvaliteedikriteeriumid nii selged kui ilmaennustuse korral. Olukord muutub põhjalikult, kui hakatakse arvestama lisandite mõjuga ilma füüsikalistele parameetritele. Siis tekib vajadus panna levikumudel tööle meteomudeliga sünkroonis. Selleks tuleb kas mudelid koodi tasemel ühendada või organiseerida andmevahetus failide kaudu. Esimene variant töötab kiiremini, kuid teise eeliseks on suurem paindlikkus – võimalus vahetada suhteliselt valutult mõlemat mudelipoolt. Võib luua ka vahepealse variandi – suhteliselt iseseisvad moodulid, mis vahetavad andmeid ühiste massiivide kaudu. Üks esimesi pääsuke si tagasisidemehhanisme arvestavas keemilise ilma modelleerimises on Taani Meteoroloogiateadusliku instituudi süsteem ENVIRO-HIRLAM (Korsholm jt, 2006). Võibolla kõige töökindlam süsteem maailmas on praegu USA Atmosfääriuurimise Keskuse (NCAR) mudel WRF/Chem (Grell jt, 2005).

Ambitsioonikaim keemilise ilma projekt on Euroopa Liidu 6. raamprogrammi poolt finantseeritav GEMS, mille lõpukonverents peetakse loetud nädalad pärast selle artikli ilmumist, 31. märtsist – 3. aprillini 2009. GEMS, mille põhiraskust kannavad mitmete Euroopa riikide ilma-teenistused (partnereid 13 riigist), on loonud aluse potentsiaalselt ohtlike atmosfäärilisandite globaalse leviku andmehõiveks ja prognoosiks rõhuasetusega kliimamuutuste põhjustele ja Euroopale (gems.ecmwf.int). Süsteem baseerub Euroopa Keskpika Ilmaprognoosi Keskuses (Reading, Suurbritannia). GEMS on tihedalt seotud Euroopa Kosmo-seagentuuri õhu kvaliteedi, stratosfääriosooni ja kliimamuutuste andmehõiveprojektiga PROMOTE. GEMS-i käigus loodud süsteemi arendab edasi, muu hulgas erinevate mudelite kooskasutuse (ansambli) suunas, 7. raamprogrammi projekt MACC – *Monitoring Atmospheric Composition and Climate* (2009–2011).

Koostöö veelgi rohkemate partnerite vahel toimub Euroopa Teadusfondi COST-aktsioonides, mis koordineerivad eri riikides toimuvaid arendusprojekte. Keemilise ilma valdkonnas teedrajav on COST 728 (*Enhancing Mesoscale Meteorological Modelling Capabilities for Air Pollution and Dispersion Applications*), mis lõpeb samuti nagu GEMS käesoleval aastal ja mille teatapulga on juba võtnud üle COST ES0206 (*Towards a European Network on Chemical Weather Forecasting and Information Systems*), milles osalevad arendajad 20 Euroopa Liidu riigist ning eksperdid USA-st, Kanadast ja Venemaalt (www.chemicalweather.eu). Jõupingutuste telg on luua ansambel kohtadel arendatavatest keemilise ilma mudelitest, saavutamaks usaldusväärsemat prognoosi kui mistahes üksiku mudeliga eraldi. Nn adaptiivse ansambli idee on luua iseõppiv süsteem, mis arvutab eri prognooside kaalutud keskmise, kusjuures kaalud omistatakse nendesamade prognooside usaldusväärseuse (seireandmetega kokkulangevuse) põhjal eelnevatel ajasammudel. Seda metoodikat saab rakendada mistahes eri prognoosidele – näiteks kas eri hajumismudelitega tehtutele või ka sama hajumismudeli ja eri meteosisendiga tehtutele või mõlema kombinatsioonile.

Keemilise ilma COST-aktsioonidele lisandub allergeense õietolmu prognoosi arendav aktsioon ES0603.

5. KOKKUVÕTE

Ilma, kliima ja õhusaaste leviku prognoosimise mudelid lähenevad üksteisele – neist kujunevad ettenähtavas tulevikus terviklikud õhukeskkonna mudelid. Vaatamata kaasatud keemilistele, bioloogilistele ning isegi majanduslikele ja sotsiaalsetele protsessidele (viimased näiteks inimtekkeliste heitmete arvutamisel) põhineb nii mudeli tuum kui ka enamik siduvaid parameetreid füüsikal. Nähtavasti jääb õhukeskkonna prognoos ka edaspidi üheks suurimaks arvutiressursi tarbijaks ja vastupidi – olemasolev arvutiressurss mudeli detailsuse oluliseks piirajaks.

KIRJANDUS

- [1] Galperin, M. 1999. Approaches for improving the numerical solution of the advection equation. Raamatus: Z. Zlatev, J. Dongarra, I. Dimov, J. Brandt, and P.J. Builtjes, Large Scale Computations in Air Pollution Modelling, lk 161–172, Kluwer.
- [2] Ghan, S. J., Schwarz, S. E., 2007. Aerosol properties and processes. A path from field and laboratory measurements to global climate models. Bulletin of the American Meteorological Society 88, 7, 1059–1081.
- [3] Grell, G.A., Peckham, S.E., Schmitz, R., McKeen, S.A., Frost, G., Skamarock, W.C., Eder, B., 2005. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model, Atmos. Environ. 39(37), 6957–6975, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.04.27.
- [4] Groisman, P. Ya., Genikhovich, E.L. 1997. Assessing surface-atmosphere interactions using former Soviet Union standard meteorological network data. Part I. Method. Journal of Climate 10, 2154–2183.
- [5] Guenther, A., Zimmerman, P., Harley, P., Monson, R. and Fall, R., 1993. Isoprene and monoterpene emission rate variability: model evaluation and sensitivity analysis. J. Geophys. Res. 98D, 12 609–12 617.
- [6] Kaasik, M., Prank, M., Kukkonen, J., Sofiev, M., 2008. A Suggested Correction to the EMEP Database, Regarding the Location of a Major Industrial Air Pollution Source in Kola Peninsula. Raamatus: Borrego, C., Miranda, A.I. (Toim). Air Pollution Modelling and its Application XIX, 331–338, Springer.

- [7] Kokkola, H., Korhonen, H., Lehtinen, K.E.J., Makkonen, R., Asmi, A., Järvenoja, S., Anttila, T., Partanen, A.-I., Kulmala, M., Järvinen, H., Laaksonen, A., Kerminen, V.-M., 2008. SALSA – a Sectional Aerosol Module for Large Scale Applications. *Atmos. Chem. Phys.* 8, 2469–2483.
- [8] Korsholm, U.A., Baklanov, A., Mahura, A. Petersen, C., Lindberg, K., Gross, A., Rasmussen, A., Sørensen, J.H., Chenevez, J., 2006. ENVIRO-HIRLAM. An On-Line Coupled Multi-Purpose Environment Model. ACCENT/GLOREAM Workshop 2006 Proceedings.
- [9] Lawrence, M.G., Hov, Ø., Beekmann, M., Brandt, J., Elbern, H., Eskes, H., Feichter, H., Takigawa, M., 2005. The chemical weather. *Environ. Chem.* 2, 6–8, doi:10.1071/EN05014.
- [10] Mårtensson, E. M., Nilsson, E. D., de Leeuw, G., Cochen, L. H., Hansson, H.-C., 2003. Laboratory simulations of the primary marine aerosol production. *J. Geoph. Res.* 108, D9, 4297, doi:10.1029/2002JD002263.
- [11] Prank, M., 2008. Evaluation of atmospheric composition simulations via comparison with remote-sensing and in-situ observations. Masters thesis. University of Tartu, Faculty of Science and Technology, Institute of Physics, 75 lk.
- [12] Saltbones, J., Foss, A., Bartnicki, J., 1996. A real time dispersion model for severe nuclear accidents, tested in the European tracer experiment. *Syst. Anal. Modelling Simulat.* 25, 263–279.
- [13] Sofiev, M., 2002. Extended resistance analogy for construction of vertical diffusion scheme for dispersion models, *J. Geophys. Res.* 107 (D12), 4159–4165, doi:10.1029/2001JD001233.
- [14] Sofiev, M., Siljamo, P., Valkama, I., Ilvonen, M. and Kukkonen, J., 2006. A dispersion modelling system SILAM and its validation against ETEX data, *Atmospheric Environment* 40, 674–685.
- [15] Sutton, O.G., 1953. *Micrometeorology*. New York: McGraw-Hill, 343 lk.
- [16] Vira, J., 2008. Variational data assimilation in chemistry-transport modelling. Master's thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Technology. Helsinki University of Technology Department of Engineering Physics and Mathematics, 53 lk.

HAJUSANDMETEGA ÜLESANNETE LAHENDAMISE MÕJU FÜÜSIKAÕPPE EFEKTIIVSUSELE

SVETLANA GANINA^{1,2} , HENN VOOLAID²

¹ KVÜÕA, ² TÜ Füüsika Instituut

Üldteada on fakt, et viimasel ajal täppisteaduste populaarsus langeb nii Eestis kui ka mujal maailmas. Olukorra parandamiseks on Eestis astutud konkreetseid samme. Näiteks muudetakse füüsika riiklikku ainekava [1], HTM koos Eesti Energiaga muretseb koolidele füüsika laboritööde komplektid [2], on avatud Eesti füüsikaportaali [3], teaduskeskus AHHAA korraldab näitusi ja üritusi [4], populariseerimistööd teeb ka teadusbuss Suur Vanker [5] jne.

Meie arvates kõige lihtsam ja odavam moodus tõsta füüsikaõppe efektiivsust ning selle populaarsust on uut tüüpi ülesannete lahendamine. Miks ei arenda traditsiooniliste füüsikaülesannete lahendamine piisavalt õpilaste füüsikaoskusi ja ei tõsta huvi füüsika vastu? Sellepärast, et õpilaste jaoks on see tavaliselt rutiinne tegevus, kus loovust läheb vähe vaja. Reeglina on traditsiooniline füüsikaülesanne eluvõõras, seal on kõik vajalikud andmed antud ja neid on täpselt samapalju, kui lahendamiseks vaja läheb. Tuleb ainult leida sobiv valem, arvud sisse panna ja vastus välja arvutada. Keerulisemates ülesannetes tuleb ka ühikuid teisendada või mitut valemit kasutada.

Paraku elus see nii lihtne ei ole, elulised ülesanded on probleemid, mis nõuavad lahendaja poolt loovat lähenemist, et õpitud teooriat rakendada. Selleks on vaja analüüsivõimet, oskust probleemi mõista ja lahendada ning vajalikke lähteandmeid leida [6, 7, 8].

Käesolevas artiklis tutvustatakse hajusandmetega ülesandeid, mis

koosnevad olukorra kirjeldusest ja esitatud küsimusest. Algandmed on esitatud eraldi ja neid on kas rohkem või vähem kui lahendamiseks vaja läheb.

Tehtud uurimustöö käigus selgus, et hajusandmetega ülesannete lahendamine suurendab füüsikaõppe efektiivsust kuni 20%.

1. SISSEJUHATUS

Füüsikaõppes on ülesannete lahendamisel väga suur roll, mis võib tõsta füüsikaõppe efektiivsust [9]. Kuid tulemus sõltub sellest, milline on õpetaja eesmärk: kas õppekava täitmine, riieksamiks ettevalmistamine, füüsikalise mõtlemise arendamine või veel midagi muud [10]. Füüsikaülesannete tähtsust rõhutavad näiteks R.-K. Loide [11] ja R. Plotzner [12], kes väidavad, et füüsika õppimise kõige efektiivsemaks teeks on lihtsamate probleemide ja ülesannete iseseisev lahendamine. Kuid paljud uurijad [13, 14] kurdavad, et õppurid lahendavad enamasti ülesandeid mehaaniliselt, mõtlemata ülesande sisule. Sel juhul on eesmärgiks etteantud arvude abil jõuda õige arvuni, mida nimetatakse vastuseks. Klassikalises ülesannete lahendamismetoodikas [6, 15] nähakse ette, et õppur kordab füüsikaliste suuruste tähiseid, nende ühikuid, õpib ja harjutab ühikute teisendamist, kordab seadusi ja jätab meelde vastavad matemaatilised mudelid, õpib analüüsima füüsikalisi probleeme ning neid lahendama. Kahjuks õppurid ei tegutse nii. Nemad otsivad ülesande tekstist üles füüsikalised suurused, tuletavad meelde või otsivad neile vastavad tähed ja nende järgi valemid, kus need tähed esinevad. Tihti ei peeta sedagi oluliseks, kas valemis on suur või väike täht (nt v – kiirus ja V – ruumala; p – impulss (ka rõhk) ja P – kaal jne), avaldatakse valemist otsitavale suurusele vastav täht, pannakse valemisse arvud sisse ja ülesanne ongi lahendatud [16]. Sellist lahendamist soodustab asjaolu, et reeglina traditsiooniline füüsikaülesanne sisaldab täpselt sama palju andmeid, kui lahendamiseks vaja läheb. Õpilane juba teab, et kui mõni täht ja sellele vastav arv jääb kasutamata, siis on lahendus kindlasti vale. Paraku praktilises elus ei ole kunagi kõik vajalikud lähteandmed ette antud.

Mida teha, et füüsikaülesannete lahendamine aitaks tõesti õppuril omandada füüsikat, mitte ainult valemitega manipuleerimise oskust? Meie arvates on selleks uut tüüpi ülesannete lahendamine, milleks on vaja analüüsivõimet ja probleemilahendamise oskust [6, 7, 8].

2. HAJUSANDMETEGA ÜLESANDED

2.1 Füüsikaülesande lahendamise kaks komponenti

Füüsikaülesande lahendamine koosneb kahest osast: füüsikalisest ja matemaatilisest [17]. Füüsikalises osas tuleb enne lahendamist saada ülevaade olukorrast: mis toimub ja kuidas. Tehakse lihtsustusi, valitakse mudelid, leitakse sobivad valemid, koostatakse vajalikud võrrandid. Pärast lahendamist hinnatakse vastuse reaalsust. Siin toimub ülesande sisuline lahendamine.

Matemaatilises osas teisendatakse valemeid, lahendatakse võrrandeid, teisendatakse ühikuid, arvutatakse otsitav suurus. See on ülesande formaalne lahendamine. Tihti piirduakse õpetamisel füüsikalises osas ainult valemite väljaotsimise ja võrrandite koostamisega. Olulisemaks peetakse matemaatilist osa, sest seda on lihtsam kontrollida. Kuid füüsika õppimise seisukohalt on olulisem just füüsikaline osa [16].

Selline formaalne lahendamine on arvatavasti tingitud praegu (üli-)koolis kasutusel olevast ülesannete lahendamise metoodikast, kus kõik algab andmete väljakirjutamisest. Kui andmed on kirjas, valitakse sobivad valemid ja lahendamine läheb lahti. Kuid õppur valib valemeid formaalselt. Andmetest ta näeb, millised „tähed“ (füüsikaliste suuruste tähised) on „teada“ ja otsib samade tähtedega valemeid. Selle võtte kasutamisel saavad õppurid tihti ebareaalsed vastused, milliseid nad ei suuda ega oska seletada [18, 19].

2.2 Hajusandmetega ülesanded

Füüsika õppe-efektiivsuse tõstmiseks pakume uut tüüpi ülesandeid, mille lahendamisel ei saa enam läbi ilma füüsikalise osata. Neid ülesandeid me nimetame *hajusandmetega ülesanneteks*¹.

Ülesanne koosneb mingi olukorra kirjeldusest ja küsimusest. Algandmed on toodud eraldi ja neid on kas rohkem või vähem kui vaja läheb. Lähtusime sellest, et elus ei ole kunagi nii, et kõik vajalikud andmed on kohe antud. Ikka peab neid kas kuskilt otsima või kellegi käest küsima. Samuti tuleb otsustada, kas kõiki asjaolusid tuleb arvestada või võib vähemolulised kõrvale jätta. Loomulikult võtab selliste ülesannete lahendamine rohkem aega, aga arvame, et see tasub ennast ära – õpilane õpib analüüsima, seoseid looma ja meelde jääb ka rohkem.

Ülesannete lahendamisel kasutame meetodit, mida me nimetame *kaheosaliseks ekvivalentsmeetodiks*². Nimetus tuleneb sellest, et ülesan-

1 *dispersed data problem* – DDP (autorite tõlge).

2 *binary equivalent solving method* – BESM (autorite tõlge).

nete lahendamisel selle meetodi abil tõstetakse füüsikaline komponent matemaatilise komponendiga samale tasemele. Meie arvates kaheosaline ekvivalentsmeetod ja hajusandmetega ülesannete lahendamine lubab paremini arendada õpilase transformatiivseid ja regulatiivseid oskusi. Transformatiivsed oskused on probleemi määratlemine, uurimisküsimuse sõnastamine, hüpoteesi püstitamine, uuringu planeerimine, uuringu läbiviimine, andmeanalüüs ja tõlgendamine, tulemuste esitamine. Regulatiivsed oskused on õpiprotsessi planeerimine, õpiprotsessi jälgimine, õpiprotsessi hindamine [20].

2.3 Hajusandmetega ülesannete mõju õppe-efektiivsusele

Õppeaastal 2007/2008 viisime läbi uuringu eesmärgiga teada saada, kas hajusandmetega ülesannete lahendamine tõstab õppe-efektiivsust. Uuring käib praegugi, siiani on uuringus osalenud 630 õpilast kogu Eestist (10.–12. klass). Uurimuses kasutasime nn mugavat valimit – koole ja õpetajaid, kes on meiega juba varem koostööd teinud ja alati eksperimendi läbi viinud ning tulemused esitanud. Eksperimenditulemuste randomiseerimiseks ei käinud töö autorid koolis eksperimente korraldama ega juhendama. Õpetajatele oli tutvustatud hajusandmetega ülesande lahendamismetoodikat ja oli palve kasutada nii frontaalset lahendamist, kus aktiivne roll on õpetajal, kui ka paaristööd ja rühmatööd, kus aktiivne ja otsustav roll on õpilastel ja õpetaja esineb konsultandina. Lahendamise käigus oli võimalik kasutada valemeid, vihikuid, õpikuid, käsiraamatuid, internetti ja õpetaja abi. Ette rutates tuleb mainida, et parima tulemuse andis rühmatöö.

Konkreetsuse mõttes esitame ühe ülesande teksti.

Inimene sõitis jalgrattaga auto juurde ja tõstis ratta auto katusel olevale katuserestile. Kui palju tööd pidi ta tõstmisel tegema?

Andmed:

Auto: maksimaalne kiirus 160 km/h, mass 1200 kg, värv – sinine, istekohti – 4, kiirendus pidurdamisel (aeglustus) – 5 m/s², õhu rõhk auto sisekummis 2,3 at, 1 at $\approx 10^5$ Pa, hõõrdeegur 0,3, mootori töömaht 1,6 l, võimsus 55 (75) kW (hj).

Jalgratas: kiirus 9 km/h, mass 10 kg, värv – punane.

Inimene: mass 70 kg, pikkus 186 cm, sugu – mees, juuste värv – must, juhi reaktsiooniaeg 0,4 s.

Uuringu käigus küsisime õpetajate ja õpilaste arvamust antud meetodi kohta. Selgus, et alguses oli suuremal osal õpilastest hoiak hajusandmetega ülesannete vastu – nad ei osanud ega julgenud antud tüüpi ülesandeid lahendada. Samuti oli raskusi õpetajatel, kellel puudus vastav kogemus.

Õpilaste lõplikud arvamused hajusandmetega ülesannete kohta olid väga erinevad – oli neid, kellele need ülesanded ei meeldinud üldse, oli ka neid, kes ütlesid, et antud tüüpi ülesanded panevad mõtlema, analüüsima ja on edaspidises elus kasulikumad kui traditsioonilised ülesanded, kus on kõik ette antud. Poistele meeldisid hajusandmetega ülesanded rohkem kui tüdrukutele.

Oma meetodi mõju füüsikaõppe efektiivsusele kontrollisime meie poolt juba varem kasutatud meetodikaga, mis seisneb eel- ja järeltesti tulemuste võrdlemises [21].

Tabelis 1 on toodud eel- ja järeltesti tulemused koos efektiivsuse väärtusega.

Nagu on tabelist näha, lubab kaheosaline ekvivalentsmeetod tõsta füüsika õppe-efektiivsust keskmiselt 0,2 ehk 20 % võrra (standardhälve $\sigma = 0,04$).

Meie ülesannete edu pole mitte ainult andmete rohkuses, vaid eriti selles, et me esitame andmed olukorra kirjeldamisest eraldi ja õppur peab ise otsustama, milliseid andmeid on tal probleemi lahendamiseks vaja.

Tabel 1. Eel- ja järeltesti tulemused ja efektiivsus ($n = 620$).

	Traditsioonilised ülesanded $n = 320$			Hajusandmetega ülesanded $n = 300$		
	eel-test	järel-test	efektiivsus ($\sigma=0,04$)	eel-test	järel-test	efektiivsus ($\sigma=0,04$)
Mehaanika	0,41	0,59	0,19	0,39	0,74	0,34
Termo-dünaamika	0,28	0,61	0,31	0,32	0,81	0,51
Elektromagnetism	0,20	0,50	0,30	0,19	0,68	0,48

Uuringu viimases osas kontrollisime, kuidas mõjutab olukorda asjaolu, et andmed on esitatud ülesande tekstist ehk probleemist eraldi. Selleks võrdlesime traditsiooniliste ülesannete efektiivsust olenevalt sellest, kas ülesande andmed olid esitatud teksti sees või eraldi. Selgus, et traditsioonilised ülesanded, kus andmed on eraldi esitatud, pole oluliselt efektiivsemad neist, kus andmed on esitatud tekstis.

3. KOKKUVÕTE

Antud uurimustöö eesmärgiks oli kontrollida, kas hajusandmetega ülesannete lahendamine tõstab füüsikaõppe efektiivsust.

Välja on töötatud hajusandmetega ülesanded, mis koosnevad mingi olukorra kirjeldusest ja küsimusest. Algandmed on toodud eraldi ja neid on kas rohkem või vähem, kui lahendamiseks vaja läheb.

Saadud tulemused näitavad, et hajusandmetega ülesannete lahendamine tõstab füüsikaõppe efektiivsust.

KIRJANDUS

- [1] Riiklik õppekava: www.ekk.edu.ee (01.01.09).
- [2] Eesti Energia projektid: www.energia.ee/index.php?id=23 (01.01.09).
- [3] Eesti füüsikaportaal: fyysika.ee/fyysika/avaleht (01.01.09).
- [4] Teaduskeskus AHHA: www.ahha.ee (01.01.09).
- [5] Teadusbuss Suur Vanker: fyysika.ee/fyysika/teadusbuss (01.01.09).
- [6] Heller, P., Keith, R. & Anderson, S. 1992. Teaching Problem Solving Through Cooperative Grouping. Part 1: Group Versus Individual Problem Solving. *American Journal of Physics*, 60 (7), 627–636.
- [7] Fuller, R. 1982. Solving Physics Problems – How Do We Do It? *Physics Today*, September, 43–47.
- [8] Loide, R.-K. 2005. Füüsika näidisülesanded. Mehaanika, Tallinn, Koolibri.
- [9] Karu, G. 1996. Füüsika didaktika, Tallinn, Koolibri.
- [10] Redish, E. 2003. *Teaching Physics with the Physics Suite*, John Wiley and Sons, Hoboken.
- [11] Loide, R.-K. 2002. Füüsika I, Ülesandeid ja probleeme, näidisülesandeid, KVÜÖA, Tartu.

- [12] Plotzner, R. 1994. The Integrative Use of Qualitative and Quantitative Knowledge in Physics Problem Solving. Peter Lang, Frankfurt am Main.
- [13] Styer, D. 1998. Guest comment: Getting there is half the fun. *American Journal of Physics* 64, 105–106.
- [14] Bolton, J. 1997. Developing students' physics problem-solving skills. *Journal of Physics Educations* 32, 176–185.
- [15] Reif, F. 1995. Understanding and teaching important scientific thought processes. *American Journal of Physics* 63, 17–35.
- [16] S. Ganina, S., Voolaid, H. 2005. Füüsikaülesannete lahendamine. Loodusainete õpetamisest koolis, II osa. Riiklik eksami- ja kvalifikatsioonikeskus, Tallinn.
- [17] Ganina, S., Voolaid, H. 2008. Füüsikaõppe efektiivsuse mõõtmine. *Eesti Füüsika Seltsi aastaraamat 2007*, 86–92.
- [18] Neuman, Y., Leibowitz, L., & Schwarz, B. 2000. Patterns of verbal mediation during problem solving: A sequential analysis of self-explanation. *Journal of Experimental Education* 68(3), 197–213.
- [19] Palincsar, A. S. & Brown, A. L. 1984. Reciprocal teaching of comprehension-fostering and comprehension-monitoring activities. *Cognition and Instruction* 1(2), 117–175.
- [20] De Jong, T., & Njoo, M. 1992. Learning and instruction with computer simulations: Learning processes involved. In: E. de Corte, M. Linn, H. Mandl, & L. Verschaffel (Eds.) *Computer-based learning environments and problem solving*. Springer-Verlag, Berlin, 411–429.
- [21] Ganina, S., Voolaid, H. 2007. Füüsikaõppe efektiivsus ja selle tõstmise võimalused. *KVÜÕA toimetised* (8), Tartu Ülikooli Kirjastus.

ETTEKANNETE SISUKOKKUVÕTTED

LASERINDUTSEERITUD PLASMASPEKTRO- SKOOPIA TERMOTUUMAPROGRAMMIS

MÄRT AINTS, MATTI LAAN, PEETER PARIS

TÜ Füüsika Instituut

Igor Tamme ja Andrei Sahharovi rohkem kui poole sajandi tagusest ruudulisel vihikulehel tehtud skitsist on tänaseks välja kasvanud hiiglaslikud TOKAMAK seadmed, kus kõrgetemperatuurilist plasmat tekitatakse ja sulustatakse elektromagnetilise induktiooni põhimõttel. Täna ei ole kahtlust, et lähtetingimused juhitavaks termotuumareaktsiooniks on saavutatavad. Jõudmaks impulssrežiimis töötavast TOKAMAKist pidevas režiimis töötava reaktorini tuleb leida täiendavad viisid energia sisestamiseks plasmasse ja oluliselt suurendada reaktori seinte vastupidavust energiavoogudele.

Praeguses Euroopa võimsamais reaktoris, Oxfordi-lähedases JETis, paigutatakse plasma mõju uurimiseks reaktori seinte erinevatesse osadesse markerkihtidega kaetud plaadid. Pärast 2-3 aastase kestusega mõõtmisseeriat, mille jooksul testplaadid on olnud ca 5000 lahendusimpulsi ja nende vaheliste puhastustsükli mõju all, plaadid eemaldatakse ja nende pinna seisundit uuritakse erinevatel pinnaanalüüsi meetoditel. On leitud, et reaktori seinte eri osades toimub nii materjali sadestumine kui ka erosioon. Paraku on kirjeldatud testimismeetod kaudne ja pinnaanalüüsiks oleks vaja *in situ* meetodit. Paljulubavaks meetodiks on laser-indutseeritud plasmaspetskoopia (LIPS). Vaatamata meetodi põhimõttelisele lihtsusele on momendil terve hulk vastusetu probleeme (laseri lainepikkus, tema impulsi kestus jpm), mille lahendamise tegeleb kümnekond rühma Euroopas, sh ka meie gaaslahenduslabor.

Meie eesmärgiks on LIPSi abil määrata reaktori seintel sadestunud/eemaldunud kihtide koosseis ja paksus ning hinnata markerkihtide materjali sobivust püstitatud eesmärgiks. Praeguses, laboratoorses katsestaadiumis testitakse Soome firma DIARC valmistatud objekte, kus erinevatele alusmaterjalidele on kantud fikseeritud paksustega volframi, teemandilaadse süsiniku ning reenumi kihid. KrF eksimeerlaser tekitab testobjektile plasmatombu, mille kiirgusspektri järgi saab määrata materjali koosseisu. Katseseade võimaldab registreerida ühe laservälkega tekitatud spektri piirkonnas 200–850 nm. Registreerides üksteisele järgnevate laservälgete spektreid, on võimalik hinnata objektile olevate ainekihtide paksusi.

Selgus, et võrreldes infrapunalaaseriga on eksimeerlaseriga materjali aurustamiseks vajalik energia pindtihedus vähemalt suurusjärgu väiksem. Ilmnesid tulemuste interpretatsiooni raskendavad asjaolud. Esiteks, spektrijoonte intensiivsuse jaotus erineb oluliselt andmebaasides toodud jaotustest. Teiseks, testobjekti pinna kareduse tõttu erineb laserkiirguse neeldumine pinna erinevates piirkondades, mille tulemuseks registreeritakse laservälke ajal eri sügavusel paiknevate ainekihtide spekter. Ja lõpuks, oluliselt erinevate termiliste omaduste tõttu tekivad mõningate ainete puhul kihtide vahel mehaanilised pinged ja markerkihid eemaldatakse objektilt helveste kujul.

Kui registreerida laservälkele vastavat spektrit ilma ajalise lahutuseta, siis domineerib spektris pidev komponent, mille osakaal on eriti suur volframkatete puhul. Diagnostikat raskendav pidev komponent on peamiselt tingitud ablatsiooni hilisstaadiumis tekkivatest molekulaarsetest ühenditest. Registreerides spektreid ajalise lahutusega, oli võimalik tõsta LIPS meetodi tundlikkust.

Ettekanne lõpuosas tutvustatakse uurimuste järgmist staadiumi – objektide testimist, mida mõjutavad plasmavood, mille intensiivsus on võrreldav reaalse reaktori omaga.

TUMEDAD TEGELASED OSAKESTEFÜÜSIKAS JA KOSMOLOOGIAS

**ANDI HEKTOR, YUJI KAJIYAMA,
KRISTJAN KANNIKE, MARTTI RAIDAL**

Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut

Tume aine on väga nõrgalt interakteeruv ainevorm. Astronoomid ennustasid galaktikate tähekiiruste analüüsi põhjal tumeda aine olemasolu juba 1930. aastatel. Hilisemad galaktikate, superparvede, varajase tuumasünteesi ja taustkiirguse uuringud on ainult kinnitanud tumeda aine vajalikkust kosmoloogias. Oluline roll tumeda aine uurimisel on olnud ka Eesti füüsikutel, seda nii minevikus kui praegusel hetkel.

Kahjuks pole senised eksperimendid ja vaatlused suutnud tuua selgust tumeda aine täpsema olemuse kohta. Sisuliselt teadsime eelmise aastani, et tume aine omab vaid gravitatsioonilist interaktsiooni. Aasta 2008 ja mõned järgnevad aastad töötavad tuua olulist selgust tumeda aine vallas. Eksperimendid PAMELA ja ATIC on andnud esimese mitte-gravitatsioonilise vihje tumedast ainest. Eksperimendid mõõtsid positronide liiasust võrreldes ennustatud termilise kosmilise taustaga, mis viitab leptoniliselt interakteeruvale osakesele massiga umbes 1 TeV. Kui võrd ühene on see tulemus, sellest juba lähemalt ettekandes.

Teine tume asi kosmoloogias on tume energia. Tumedaks energiaks nimetatakse aine vormi, mis Friedmanni võrrandites käitub nagu efektiivne kosmoloogiline konstant. See tähendab ideaalsel juhul ainevormi, millel on ruumalast sõltumatu konstantne negatiivne rõhk ja seega konstantne energiatihedus. Positiivne kosmoloogiline konstant Friedmanni võrrandites tähendab Universumi kiirenevat paisumist. Astronoomilised vaatlused näitavad, et praegune Universum paisub kiirenevalt.

Tumeda energia mikroskoopilist olemust on üllatavalt vähe uuritud. Praktiliselt puuduvad mudelid, mis seostaks realistlikke osakestefüüsika mudeleid tumeda energia mudelitega. Käesolevas ettekandes tutvustame autorite poolt välja pakutud ideed, mis on teadaolevalt üks esimesi katseid siduda tuntud osakestefüüsika mudeleid tumeda energiaga.

Ettekandes anname kiire ülevaate arengutest tumeda aine ja energia uurimise hetkeseisust. Tutvustame autorite ideed poolklassikalisest tumedast energiast, mis põhineb keskmistatud väljade teoorial (*mean field theory*, MFT). Edasi hindame võimalusi, kuidas siduda MFT konkreetsete osakestefüüsikast tuntud mudelitega ja kas meie poolt pakutud mudel on lokaalselt stabiilne. Arutleme selle üle, kas kirjeldatud tumeda energia mudelisse saaks sobitada ka tumeda aine ja kas antud mudel võiks anda mõõdetavaid märke käivituva CERN LHC eksperimendi juures. Ettekanne põhineb autorite viimastel publikatsioonidel.

TERMOKAAMERA NÄIDU SÕLTUVUS MÕÕDETAVA OBJEKTI KAUGUSEST

**PRIIT JAANSON^{1,2}, RIHO VENDT^{1,2}, VIKTOR VABSON^{1,2},
TOOMAS KÜBAREPP¹, MART NOORMA²**

¹ Eesti Metroloogia Keskasutus – AS Metrosert, ² TÜ Füüsika Instituut

Termograafia on kiire ja täpne meetod temperatuurijaotuste mõõtmiseks erinevates rakendustes, nagu näiteks mittepurustav testimine, hoonete soojalekete määramine, meditsiin jne. Tänapäeval on tavaseadmetega võimalik saavutada tasapinnaliste objektide temperatuurijaotuse mõõtmisel määramatus tasemel 20 mK. Samas mõõtetulemuste seosed absoluutse temperatuuriskaalaga ITS-90 jäävad vähemalt kaks suurusjärku madalamale tasemele – tüüpilised tootjate poolt termokaameratele spetsifitseeritud lubatud veapiirid on vahemikus 2 K kuni 5 K. Põhilised määramatuse allikad tulenevad kaamerast endast, mõõdetavast objektist ning ümbritsevast keskkonnast.

Uurimiseks kasutati kahte erineva diameetriga tasapinnalist absoluutselt musta keha imiteerivat kalibraatorit. Uuriti termokaamera ja infrapunatermomeetri näidu sõltuvust mõõdetava objekti kaugusest. Selgus, et distantstermomeetri ja objekti vahelise kauguse väike muutus põhjustab näidu arvestatavat muutumist. Mitmete erinevat tüüpi

distantstermomeetrite süstemaatilise uurimise tulemusena on võimalik kalibreerimisel arvesse võtta parandid, mille abil oleks võimalik vähendada või arvesse võtta mõõdetava objekti kaugusest tulenevat määramatuse komponenti. Sõltuvalt distantstermomeetri tüübist vahemaa muutumisel (0,3...1) m võib sama objekti temperatuuri näit muutuda (1...5) K, mis on võrreldav või isegi ületab tavaliselt rakendatavaid mõõtmiste laiendmääramatusi.

INTERAKTSIOON PUNKTDEFEKTIDE JA LISANDITE VAHEL SÜSTEEMIS Si-SiO₂ JA NENDE MÕJU PIIRPINNA OMADUSTELE

**D. KROPMAN¹, T. KÄRNER², I. HEINMAA³,
T. LAAS⁴, A. MEDVID⁵**

¹ TTÜ, ² TÜ Füüsika Instituut, ³ KBFI, ⁴ Tallinna Ülikool,

⁵ Riia Tehnikaülikool

Tänu raadiospektroskoopiliste meetodite (EPR, NMR) kasutamisele koostöös Füüsika Instituudiga ning Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudiga õnnestus meil identifitseerida punktdefektide (PD) olemus süsteemis Si-SiO₂ ja vähendada nende kontsentratsiooni piirpinnal. Antud töö eesmärk on PD ja lisandite interaktsiooni uurimine süsteemis Si-SiO₂ ning piirpinna omaduste modifitseerimine laserikiirrituse abil. PD ja lisandite kontsentratsiooni varieeriti mitmel viisil: oksüdeerimistingimustega, lisandite valikuga (B, P) ja kahekihiliste struktuuride Si₃N₄ - SiO₂ abil. Nitriid ei ole vesinikule läbitav ja see kindlustab tema säilitamist oksiidis. Tänu sellele, et räni oksiid ja nitriidi termilise paisumise koefitsiendid on erimärgilised, lubavad kahekihilised struktuurid modifitseerida SiO₂ mehaanilisi sisepepingeid. Vesiniku sisaldust piirpinnal hinnati ¹H NMR spektrite abil. Piirpinna defektide eristamiseks sisedefektidest mõõdeti pulbriliste ja kristalliliste objektide EPR ja NMR spektreid. Uuriti laserikiirrituse (520 nm, 10 MW/cm²) mõju piirpinna

omadustele. Tuvastati, et SiO_2 vesinikusisaldus on p-tüüpi juhtivusega Si korral kõrgem kui n-tüüpi juhtivuse korral. See võib olla seotud vesiniku ja PD erinevast interaktsioonist tingitud vesiniku neeldumise ja jaotumise erinevustega n ja p juhtivusega objektide korral. Selle oletuse kontrollimiseks mõõdeti EPR spektrite sõltuvust struktuuride valmistamise tehnoloogiast. EPR signaali intensiivsus muutus olenevalt oksüdeerimise kestusest mittemonotoonselt ja oli, sõltuvalt jahutamise kiirusest, ühe või kahe maksimumiga [1], mis on kooskõlas töös [2] esitatud PD genereerimise kineetika mudeliga. Pärast laserikiiritust EPR signaal g-faktoriga 2,006 (E^{t} tsentrid) väheneb. See võib olla seotud mehaaniliste pingete muutusega. Proovide kõverdumise muutus pärast laserikiiritust kinnitab seda oletust. Süsteemi Si-SiO₂ valmistamise tehnoloogia optimeerimine lubab parandada tema parameetreid ja tõsta töökindlust.

[1] D. Kropman, S. Dolgov, T. Kärner (1996). Appl. Phys. [Part]A 62, 4.

[2] T.Y. Tan, U. Göesele (1985). Appl. Phys. [Part]A 37, 1.

TARTU ÜLIKOOLI SATELLIITSIDE KESKUSE RAADIOÜHENDUSED

**URMAS KVELL, ILMAR ANSKO, TÖNIS EENMÄE,
SIIM MEERITS, PRIIT LAES, KAUPU VOORMANSIK,
KATRIN TUUDE, JÜRI RUUT, SILVER LÄTT, MART NOORMA**

TÜ Füüsika Instituut

Maa orbiidil on järjest rohkem erinevaid satelliite, mis kasutavad sideks amatöörraadioside sagedusalasid. See tähendab, et igaüks võib vastu võtta ja vabalt kasutada nende satelliitide poolt saadetud andmeid. Raadioside üle satelliitide, satelliitide poolt tehtud mõõtmistulemuste ja piltide vastuvõtt on kõigest mõned näited erinevatest rakendustest.

Amatöörraadioside üle satelliitide seab kasutatavale tehnikale mitmeid olulisi lisanõudeid. Sideseansid tuleb ette planeerida arvestades

satelliitide ülelende ja otsenähtavust satelliitidega, antennid peavad satelliiti ülelennu ajal jälgima ning vastuvõtu- ja saatesagedusi tuleb vastavalt Doppleri nihkele jooksvalt muuta.

Sidekeskus koosneb antennidest ja nende pöörast, transiiverist ehk raadiosignaali saatjast-vastuvõtjast, modemist ning arvutisüsteemist, mis tööd juhib. Valminud vastuvõtujaam võimaldab sidet pidada amatöörraadioside 70 cm ja 2 m sagedusalades. Esimesed peetud side-seansid on olnud Aacheni Ülikooli tudengisatelliidiga Compass-1, amatöörraadioside satelliitidega Amsat-Oscar 51 ja VUSat Oscar-51 ning ka rahvusvahelise kosmosejaama ISS mooduliga Zarja.

Tulevikuperspektiivideks on sidekeskuse liitmine rahvusvahelise satelliitide jaamade võrgustikuga *Global Education Network for Satellite Operations* (GENSO). ESA arendab GENSO projekti, et avardada oluliselt sidevõimalusi avalikuks kasutamiseks mõeldud satelliitidega. Üle interneti toimiv võrgustik luuakse peamiselt teiste ülikoolide ja raadioamatööride sidejaamadest.

Tartu Ülikooli satelliitide keskuse väljaarendamine on oluline osa maapealsest infrastruktuurist, mis toetab Eesti Tudengisatelliidi projekti EstCube. Projekti raames ehitatakse Eesti esimene satelliit. Sidekeskuse tähtsamad funktsioonid on sideseansside pidamine satelliitidega ja laboritööde võimaldamine satelliitide uurimiseks. Süsteemi ülesehitamist on finantseerinud Eesti Infotehnoloogia Sihtasutus oma projekti raames.

UNIVERSUM KUI OKSÜÜMORON

HENN KÄÄMBRE

TÜ Füüsika Instituut

Oksüümoron (kreeka sõna, *ωξυμορον*, umbes „tark lollus“ või „teravmeelne rumalus“) pole õieti füüsika ega kosmoloogia, vaid pigem poeetika mõiste, kõnefiguur. (Veel näiteid: valge pimedus, rõõmus kurbus, õpetatud loll, helitu heli). Vestluses vihjatakse universumist teada oleva vastuolulisusele, paradoksaalsusele. Eakamad kuulajad on nõukogude

ajal õppinud Engelsi dialektilist materialismi, mis johtus Fichte-Schellingi-Hegeli dialektikast, mille juured on antiikfilosoofias (Herakleitos *contra* Aristoteles). Oksümooriline lähenemisviis on iseloomulik kristlikule usuõpetusele (nt katoliiklikud dogmad). Oksüümoroni mõttevälja kuulus ka mõjuka prantsuse filosoofi Jacques Derrida (1930–2004) dekonstruktsiooniõpetus. Universum on peaaegu täiesti tühi (keskm tihedus 10^{-29} g/cm³), kuid ometi kätkeb endas hiidmassi (nähtav aine 10^{23} , nähtamatu aine 10^{24} Päikese massi). Paradoksaalselt suur on kosmiliste objektide mitmekesisus (galaktikad ja tolmukogud, valged kääbused, punahiid jpm). Oksümoorseks võiks pidada ka mõneti teleoloogilisena näivat antroopsusprintsipi. Omaette oksüümoron on must auk, tohutu massi koondis punkti, singulaarsusse, nähtamatu, kuid ometi akretsiooni-kiirguses nähtav.

MÜRA TASASUSE POOLT INDUTSEERITUD STOHHASTILINE TRANSPORT KALLUTATUD TÜKATI LINEAARSETEL POTENTSIAALIDEL

**DMITRI MARTILA¹, RISTO TAMMELO¹, ROMI MANKIN²,
ASTRID REKKER²**

¹ TÜ Füüsika Instituut, ² Tallinna Ülikool

Mõned hiljuti avastatud nähtused (näiteks stohhastiline resonants) näitavad, et müra saab tekitada korrapära mittelineaarsetes ja mittetasakaalulistest süsteemides. Stohhastiline resonants on juba kinnitust leidnud erinevates kontekstides: näiteks hammaslatt-mudelid on sisuliselt tihedasti seotud stohhastilise resonantsiga [1, 2].

Allpool me käsitleme kolme mudelit, kus Browni osakesele mõjuvad potentsiaalne jõud, soojusmüra ja mittetasakaalulised Markovi fluktuatsioonid. On võimalikud olukorrad, kus ühe parameetri väikese muutuse tõttu hakkab Browni osake liikuma suunas, mis on vastupidine esialgsele: see nähtus on „voolupööre“. Me oleme leidnud kuni kuus voolupööret

isegi siis, kui perioodiline potentsiaal on lihtne (tükati lineaarne). Voolupöörded võivad aidata eraldada segust vajalikke nanoosakesi, näiteks DNA fragmente, viiruseid jne [3].

Madalatel temperatuuridel on Browni osakeste voog ülitundlik kaldejõu suhtes. Osakeste liikuvuse sõltuvus müra korrelatsiooniajast ning tasasusest omab resonants-kuju (st on Gaussi kõvera kujuline). Hüper-sensitiivne stohhastiline transport on põhimõtteliselt rakendatav signaalide võimendamisel.

Oleme uurinud järgmisi efekte [4].

- Ülitundlik diferentsiaalne vastuvõtlikkus (ik HDR): voo suur tundlikkus kaldejõu suhtes. Efekt on nähtav madalal temperatuuril müra suurtel „sagedustel“ (st korrelatsiooniaja pöördväärtusel).
- „Isoleeritud akna“ fenomen (ik DW): selle korral on osakeste voog teatavas lõplikus kaldejõu väärtuste vahemikus väga väike võrreldes seda vahemikku ümbritseva piirkonnaga. Efekt on nähtav madalal temperatuuril müra suurtel „sagedustel“.
- Absoluutne negatiivne liikuvus (ik ANM): osakeste (keskmise) voog on vastupidine kaldejõu suunale. Efekt on nähtav madalatel temperatuuridel, kuid esineb ka kõrgetel temperatuuridel, eeldusel et müra amplituud on piisavalt suur.
- Negatiivne diferentsiaalne liikuvus (ik NDR): osakesed liiguvad enamasti kaldejõu suunas, kuid nende voog väheneks, samal ajal kui kaldejõu väärtus suureneks.

- [1] L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung, F. Marchesoni (1998). *Rev. Mod. Phys.* 70, 223.
- [2] D. Martila, R. Mankin, R. Tammelo, A. Sauga, E. Reiter (2006). *EPJB* 54, 375.
- [3] H. Linke (2002). *Appl. Phys. A* 75, 167.
- [4] A. Haljas, R. Mankin, A. Sauga, E. Reiter (2004). *Phys. Rev. E* 70, 041107.

ESIMESED KLASTERIOONIDE JA NANO- MEETER-AEROSOO LI MÕÖTMISED TROPOSFÄÄRI ÜLEMISTES KIHTIDES

**SANDER MIRME¹, ANDREAS MINIKIN², TOOMAS BERNOTAS¹,
MARGUS ELLER¹, MEELIS ELLER¹, AADU MIRME¹**

¹ TÜ Füüsika Instituut, ² Saksa Õhu- ja Kosmoselendude Keskus,
Atmosfäärifüüsika Instituut, Oberpfaffenhofen, Saksamaa

SISSEJUHATUS

Neutraalsete nanomeeter-osakeste ja klasterioonide spektromeeter (*neutral cluster and air ion spectrometer*, NAIS) on seade, mis mõõdab õhuioonide, st õhu klasterioonide ja laetud osakeste, liikuvusjaotust vahemikus $3,2 - 0,0013 \text{ cm}^2/\text{V}/\text{s}$ (vastab osakeste suurustele 0,8 nm kuni 40 nm) ja neutraalse nanomeeteraerosooli osakeste suurusjaotust vahemikus 1,5 - 40 nm (kasutades sisseehitatud laadimist). Seade koosneb kahest paljukanalilisest liikuvusanalüsaatorist. Esimene NAIS ehitati aastal 2004, selle eelkäijaks oli AIS (õhuioonide spektromeeter, Mirme *et al.* 2007). NAIS ja AIS instrumente on kasutatud osakeste tekkeprotsesside uurimiseks üle maailma (Kulmala *et al.* 2007). Uue põlvkonna NAIS spektromeeter osales EUCAARI LONGREX mõõtmiskampanias lennates DLR Falcon uurimislennuki pardal kokku üle 50 lennutunni Kesk-Euroopa ja Atlandi kohal.

UUE PÕLVKONNA AIS TÄIENDUSED

Aerosooliosakeste liikuvus sõltub õhurõhust. Uus instrument säilitab mõõdetavate osakeste suurusvahemiku sõltumata õhurõhust, reguleerides automaatselt õhuvoo kiirust liikuvusanalüsaatoris. Samuti hoitakse automaatselt konstantsena sisendvoo ruumkiirus. Selleks ehitati NAIS-spektromeetrile uus õhusüsteem täiendavate andurite ja pumpadega. Lisaks valmistati seadmele uus andmehõivesüsteem, mis võimaldas suurendada mõõtmiskiirust ligikaudu kümne suurus-spektrini sekundis. See on oluline, sest DLR Falcon uurimislennuki kiirus on 250 - 300 m/s.

TULEMUSED

Seade töötab lennukil ootuspäraselt. Kuni 8 km kõrguseni suutis seade õhuvoogude reguleerimisega säilitada mõõdetavat suurusvahemikku. Suurematel kõrgustel hakkas vahemik veidi nihkuma suuremate osakesete poole. Lennuk lendas kuni 12 km kõrguseni. Mõõtmised kinnitasid võimalust uurida NAIS abil klasterioone ja nanomeeter-aerosooli kuni troposfääri ülemiste kihtideni.

- [1] Mirme, A., Tamm, E., Mordas, G., Vana, M., Uin, J., Mirme, S., Bernotas, T., Laakso, L., Hirsikko, A. and Kulmala, M. (2007). A wide range multi-channel Air Ion Spectrometer. *Boreal Env. Res.* 12:247, 264.
- [2] Kulmala, M., Riipinen, I., Sipilä, M., Manninen, H., Petäjä, T., Junninen, H., Maso, M. D., Mordas, G., Mirme, A., Vana, M., Hirsikko, A., Laakso, L., Harrison, R. M., Hanson, I., Leung, C., Lehtinen, K.E.J., Kerminen, V.-M. (2007). Towards direct measurement of atmospheric nucleation. *Science* 318(5847):89, 92.

PUUST ETTE JA PUNASEKS: ERINEVATE ÕPISTIILIDE ARVESTAMINE FÜÜSIKA ÕPETAMISEL

ENN PÄRTEL

TÜ Füüsika Instituut

Igal inimesel on dominantne meelesüsteem, mille kaudu ta maailma tunnetab. Vastavalt dominantsele meelele liigitatakse inimesi visuaalideks, audiaalideks ja kinesteetikuteks. Erinevad uuringud näitavad, et kinesteetikuid ja visuaale on ligikaudu võrdselt, audiaale mõnevõrra vähem.

Visuaalid võtavad infot vastu peamiselt nägemise kaudu ja nende õppimisstiil toetub nägemisele, audiaalid kuuluvad meelsasti ja õpivad kuulmise (valjult rääkimise) kaudu. Kinesteetikud õpivad praktilise tegevuse kaudu.

Klassis õpivad koos erineva õpistiiliga õpilased, seetõttu on info vaja edastada nii nägemise kui kuulmise kaudu, kuid info edastusele järgnegu praktiline töö.

Ettekandes tuuakse näiteid füüsikatunni stsenaariumidest, mis baaseruvad VAK-metoodikal (Visuaalne-Audiaalne-Kinesteetiline).

NANOMEETEROSAKESTE TEKKIMINE VEE PRITSIMISEL

HANNES TAMMET, URMAS HÕRRAK

TÜ Füüsika Instituut

Kui vabalt langeva 2 mm läbimõõduga vihmatilga kineetiline energia muuta ühtlaste pritsmete pinnaenergiaks, siis saame pritsmetilgad läbimõõduga 20 mikromeetrit. Ometi tekib vee pritsimisel koskede lähedal ja vihma ajal hulgaliselt tuhandeid kordi väiksemaid negatiivset elektrilaengut kandvaid osakesi. Ballolektrilise efekti või Lenardi efekti nime kandev nähtus on tuntud juba enam kui sada aastat, kuid selle olemuses on tänaseni palju arusaamatut.

Nanomeeterosakeste elektrilisi liikuvusi saab mõõta, nende mõõtmete leidmiseks peab aga teadma ka osakeste laengut. Meil õnnestus esimestena tõestada varasem oletus, et ballolektrilised osakesed kannavad ühtainsat elementaarlaengut.

Vedel nanomeetertilk peaks Kelvini efekti tõttu ka 100% niiskusega õhus ära aurama vähem kui mikrosekundi jooksul. Katse näitab, et osakeste aurumine on vähemalt 5 suurusjärku aeglasem. Võiks oletada, et osakesed on tilkade aurumise kuivjääd. Vastu räägib aga tulemus, et Tartu kraanivee pritsimisel saadakse just samasuguseid osakesi kui vihmavee pritsimisel, olgugi kraanivee kuivainesisaldus ca 50 korda suurem.

Veeosakeste aurumist võib aeglustada kaks nähtust. Caleman'i ja Spoel'i arvutisimulatsioonide kohaselt peaks vaakumis auruvad tilgad külmuma kuubiliseks jääks temperatuuriga ca -70°C . Õhus pidurdab jahtumist soojusvahetus, mis aga nanomeeterdiapasoonis nõrgeneb.

Chaplin'i arvutisimulatsioonide kohaselt moodustuvad vees 280 molekulist koosnevad korrapärase ehitusega superklastrid, mille läbimõõt 2,5 nm võrdub enam-vähem täpselt maksimumkohaga balloelektriliste ionide mõõtmejaotuses.

Autorite tulemusi võib leida artiklist www.atmos-chem-phys-discuss.net/8/16609/2008/.

VALGUSIMPULSSIDE DIFRAKTSIOONI JA ÜLE- VALGUSKIIRUSEGA LEVI UURIMINE FEMTO- SEKUNDILISE AJALISE JA MIKROMEETRILISE RUUMILISE LAHUTUSEGA

**HELI VALTNA-LUKNER¹, MADIS LÕHMUS¹, PEETER
PIKSARV¹, PEETER SAARI¹, P. BOWLAN², R. TREBINO²**

¹ TÜ Füüsika Instituut,

² Georgia Institute of Technology, School of Physics, Atlanta, USA

Ülilühikesed impulsid – alla pikosekundilise kestvusega valgusimpulsid – on leidnud laialdast rakendust nii füüsikas kui ka lähedastes valdkondades. Ometi on olnud jätkuvalt aktuaalne ülilühikeste valgusimpulsside elektrivälja täpse ajalise-ruumilise registreerimise probleem. Alles päris viimasel ajal on see probleem, juhuks kui on kasutada reeperina veelgi lühem valgusimpulss, saanud hea praktilise lahenduse, mis võimaldab nii kõrget ajalise-spektraalset kui ka ruumilist lahutust.

Käesolevas ettekandes tutvustame ülilühikese valgusimpulsi difraageerumist apertuurilt, mõõdetuna ajalise lahutusega femtosekundi ning ruumilise lahutusega mikromeetri suurusjärgus. Muuhulgas võimaldab see avardada difraktsiooninähtuse mõistmist difraageerunud impulsslaine ajalise esituse kaudu. Urime ajalisel ülilühikese, ruumis valguskoonusekujulisi lokaliseeritud lained ning registreerime eksperimentaalselt nende superluminaalse levimiskiiruse [1].

Kirjeldatud mõõtmisi on võimalik sooritada kasutades mõnekümne femtosekundi kestvusega optiliste (võrdlus-)impulsside elektrivälja registreerimiseks spektrograafilist meetodit FROG [2] – *Frequency-Resolved Optical Gating* – ning uuritava elektrivälja ruumilise käitumise registreerimiseks lineaarset interferomeetrilist tehnoloogiat SEA TAD-POLE [2, 3] – *Spatial Encoded Arrangement for Temporal Analysis by Dispensing a Pair of Light E-fields*.

- [1] P. Saari and K. Reivelt (2004). Generation and classification of localized waves by Lorentz transformations in Fourier space, *Phys. Rev. E* 69, 036612.
- [2] R. Trebino, *Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrafast Laser Pulses* (Springer, 2002).
- [3] P. Bowlan, P. Gabolde, and R. Trebino (2007). Directly measuring the spatio-temporal electric field of focusing ultrashort pulses, *Opt. Express* 15, 10219.

FAASISIIRDE JA STOHHASTILISE RESONANTSII KOMPLEMENTAARSUS LÕPLIKU RUUMALAGA SÜSTEEMIDES

ARTJOM VARGUNIN, TEET ÖRD, RISTO TAMMELO

TÜ Füüsika Instituut

Uurimuste põhieesmärgiks oli stohhastiliste efektide väljaselgitamine faasisiirdega süsteemides ning tulemuste rakendamine erinevates eksperimentides vaadeldava käitumise seletamiseks. Uurimisobjektiks võeti ruumis piiratud nn „väike“ süsteem II liiki faasisiirdega makroskoopilisel piirjuhul. On tehtud kindlaks, et „väikese“ süsteemi korral korrastusparameetri käitumise iseloom muutub stohhastiliseks. Selle tulemusena dünaamilise vastuvõtlikkuse transformeerumist seoses ruumala ja välise välja sageduse kasvuga võib interpreteerida pideva üleminekuna puhtalt stohhastiliselt reaktsiooni

käitumiselt ja sellest tingitud stohhastiliselt resonantsilt juhule, kus vastuvõtlikkuse anomaalne käitumine ja välise väljaga seotud korrastusparameetri dünaamika on deterministlik. On leitud, et antud mudelis kriitiline temperatuur alaneb ja faasisiirde anomaalia muutub difuussemaks süsteemi ruumala vähenemisel. Ruumis piiratud süsteemis saab konstrueerida pikkuseskaala, mis määrab kriitilisi ilminguid suuremas süsteemis. Väiksemas süsteemis määrab neid aga teistsugune pikkuseskaala, mis on puhtalt stohhastilise päritoluga. Viimase olemasolu mängib märkimisväärset rolli seoses kriitilise mõõtme probleemiga ning kriitilise temperatuuri käitumisega kriitilise mõõtme lähedal. Selles piirkonnas näitab vastuvõtlikkus olulist mittemonotoonsust tingituna stohhastilisest ruumala-resonantsist. Efekti võiks tõlgendada objekti mõõtmetega tüüritava faasisiirdena analoogselt temperatuuri poolt juhitava faasiüleminekuga, kusjuures stohhastilist ruumala-resonantsi võib interpreteerida antud teoreetilises skeemis kriitilise mõõtme olemasolu indikaatorina. Saadud tulemused on heas kooskõlas eksperimentidega keraamilistes ja relaksor-tüüpi ferroelektrikes.

Töö tulemused kajastuvad publikatsioonides:

- [1] Vargunin, T. Örd, R. Tammelo (2008). Phys. Rev. E 77, 061137.
- [2] Vargunin, T. Örd, R. Tammelo, N. Voropajeva (2008). J. Phys.: Condens. Matter 20, 362202.

VEE KOLMIKPUNKTI TEMPERATUURI REALISEERIMISE METROLOOGILINE JÄLGITAVUS EESTIS

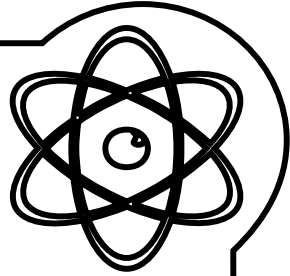
**RIHO VENDT^{1,2}, VIKTOR VABSON^{1,2},
TOOMAS KÜBAREPP¹, MART NOORMA²**

¹ Eesti Metroloogia Keskasutus – AS Metrosert, ² TÜ Füüsika Instituut

Rahvusvaheliselt tunnustatud praktika kohaselt on mõõtetulemused usaldusväärsed siis, kui need on seotud metrooloogilise jälgitavusahela kaudu rahvusvahelise mõõtühikute süsteemiga SI. Selleks, et kindlusta-

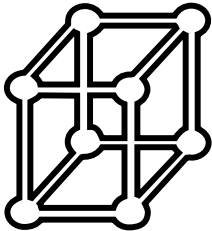
da mõõtetulemuste seostatust SI ühikutega, on iga iseseisev riik loonud metroloogiainstituudi, mille ülesandeks on füüsikaliste suuruste riigietalonide arendamine, säilitamine, kasutamine ja võrdlemine kõrgeimal tasemel. Tehes tihedat koostööd ülikoolidega tegeleb Eestis nende ülesannete täitmisega Eesti Metroloogia Keskasutus – AS Metrosert.

Eesti temperatuuri riigietaloni laboris on loodud mõõtetulemuste seos SI ühiku definitsiooniga (üks Kelvin on $1/273,16$ osa vee kolmikpunkti termodünaamilisest temperatuurist) ja rahvusvahelise praktilise temperatuuriskaalaga ITS-90. Nimetatud seose loomine ja säilitamine tugineb kalibreeritud takistustermomeetrite grupile ja kolmele erinevale vee kolmikpunkti rakule. Tulenevalt temperatuuriskaala ITS-90 ülesehitusest on vee kolme faasi (vedeliku, auru ja jää) tasakaalulise oleku e kolmikpunkti temperatuuri realisatsiooni usaldusväärsus takistustermomeetrite metrooloogiliste omaduste hindamisel ülimalt oluline. Vee kolmikpunkti temperatuuri realisatsiooni rahvusvaheliseks seostamiseks osales AS Metrosert 2004. aastal Euroopa metroloogiaorganisatsiooni EUROMET projektis nr 714 „*Comparison of realization of the triple-point of water*”. Projekti raames võrreldi Eesti riigietalonilaboris vee kolmikpunkti temperatuuri esitamist kolmes rakus analoogse realisatsiooniga Prantsusmaa metroloogiainstituudi LNE-INM/CNAM ülekanderakus. Võrdluses ringelnud ülekanderakk oli eelnevalt mitmete võrdluste kaudu seotud Kelvini definitsioonijärgse realisatsiooni ülemaailmse tugiväärtusega, mis saadi võrdlusest „*CCT-K7: Key comparison of water triple point cells*”. Sooritatud võrdluste ahela abil on võimalik vee kolmikpunkti realisatsioon Eestis siduda rahvusvahelise tugiväärtusega. Rahvusvahelisele üldsusele 2008. aastal avaldatud projekti lõpptulemused kinnitavad temperatuuri riigietaloni laboris realiseeritava vee kolmikpunkti temperatuuri ja rahvusvahelise tugiväärtuse head kooskõla (erinevus vaid $100 \mu\text{K}$) väikesel mõõtemääramatusel $178 \mu\text{K}$ (kattetegur $k = 2$).



**EESTI FÜÜSIKA
SELTS**

2008



EFS AUKIRJAD JA PREEMIAD

EFS AASTAPREEMIA 2008

DIPLOM Nr 15

Eesti Füüsika Selts tunnistab oma aastapremia vääriliseks

ettevõtte Laser Diagnostic Instruments kollektiivi

väljapaistva rakendusliku arendustöö eest, mis on viinud Eesti jaoks oluliste kõrgtehnoloogiliste seadmete loomiseni ning mis samuti on aidanud parandada avalikkuse ettekujutust teaduspõhise arenduse olemusest ja vajalikkusest.

Tunnustuseks annab Selts temale 2008. aasta numbrit kandva medali.

Tartus, 18. märtsil 2008. a.

EFS esimees

EFS AULIIKME TUNNISTUS

Nr 5

Käesolevaga tunnistab Eesti Füüsika Selts oma liikme

Piret Kuuse

seltsi auliikmeks.

Tartus, 18. märtsil 2008. a.

EFS esimees
EFS aseesimees

EFS AUKIRI 2008

Nr 14

Eesti Füüsika Selts tunnustab aukirjaga

Kalev Tarkpea'd

füüsika populariseerimise eest.

Tartus, 18. märtsil 2008. a.

EFS esimees
EFS aukirjakomisjoni esimees

EFS ÕPILASPREEMIA 2008

DIPLOM

Nr 10

Eesti Füüsika Selts tunnustab oma õpilaspreamia vääriliseks

Kaarel Mäearu

töö „Staatilise kõvaduse mõõtmise meetodid“ eest.

Tartus, 18. märtsil 2008. a.

EFS esimees

TÄNUKIRI

Eesti Füüsika Selts tänab

Mart Kuurme't

EFS õpilaspreamia saanud töö „Staatilise kõvaduse mõõtmise meetodid“
(autor Kaarel Mäearu) juhendamise eest.

Tartus, 18. märtsil 2008. a.

EFS esimees

MUUDATUSED EFS PÕHIKIRJAS

Muudatused EFS põhikirjas, kinnitatud EFS erakorralise üldkogu poolt 15.08.2007.

Muuta EFS põhikirja punkt 9.5

„Lõpetamisel annab ühing vara üle samalaadsete eesmärkidega ühingu- või sihtasutusele või riigile või kohalikule omavalitsusüksusele.“

alljärgnevalt:

„Ühingu lõpetamise korral antakse pärast võlausaldajate nõuete rahuldamist alles jäänud vara üle tulumaksusoodustusega mittetulundusühingute ja sihtasutuste nimekirja kantud ühingu- või avalik-õiguslikule juriidilisele isikule.“

ning kinnitada EFS põhikirja viimane redaktsioon.

EESTI FÜÜSIKA SELTSI JUHATUSE 2008. AASTA TEGEVUSARUANNE

Traditsioonilised Eesti füüsikapäevad toimusid 18.–19.03. 2008. a Tartus, TÜ Tähe 4 õppehoones. Registreerunud osalejaid oli 131. Füüsikapäevad organiseerisid Kaido Reivelt, Ilmar Kink, Jaak Jõgi ja Aigar Vaigu. Füüsikapäevade raames toimus 18. märtsil EFSi üldkogu, millel kinnitati seltsi juhatuse tegevus- ja majandusaruanne. Tööpäeva lõpetas traditsiooniline seltsiõhtu Rehe motellis.

Füüsikapäevadel anti välja EFSi aastapremia ettevõtte Laser Diagnostic Instruments kollektiivile väljapaistva rakendusliku arendustöö eest, mis „on viinud Eesti jaoks oluliste kõrgtehnoloogiliste seadmete loomiseni ning mis samuti on aidanud parandada avalikkuse ettekujutust teaduspõhise arendustegevuse olemusest ja vajalikkusest“. EFSi aukirja pälvis Kalev Tarkpea füüsika populariseerimise eest. EFSi õpilaspremia omistati Kaarel Mäearu'le töö „Staatilise kõvaduse mõõtmise meetodid“ eest, mis valmis Tallinna Reaalkooli õpetaja Mart Kuurme juhendamisel.

Ilmus EFSi aastaraamat 2008 (toimetajad Anna Aret, Helle Kaasik ja Piret Kuusk). EFSi listi seltsid.efs@lists.ut.ee haldab Jaak Jõgi ning EFSi kodulehte (www.fyysika.ee/efs) toimetab Kaido Reivelt.

Märtsis toimunud Eesti koolinoorte 52. füüsikaolümpiaadil sai EFSi eriauhinna (ajakirja „Scientific American“ aastatellimuse) Taavi Pungas Tallinna Reaalkoolist.

2008. a jätkus eestikeelse kõrgkoolide füüsika põhiõpiku (D. Halliday, R. Resnick, J. Walker „Fundamentals of Physics“) tõlkimine ja toimetamine. Loodame raamatu 2009. aastal trükki anda. Alustasime J. Walkeri raamatu „Flying Circus of Physics“ tõlkimisega.

Jätkusid EFSi mitmesugused füüsikat populariseerivad üritused. Taavi Adambergi vedamisel jätkas oma tööd Teadusbuss Suur Vanker, jätkus füüsikaportaali (www.fyysika.ee) arendamine ning ligi kuuekümmne praeguse ja tulevase füüsiku ühise jõupingutusena korraldati järjekordsed Tähe Perepäevad Täpe 2008. Lisaks sellele osalesime mitmesugustel messidel ja üritustel, nagu messid Intellektika ja Teeviit, Teadlaste Öö üritused jne. Kokku tegi Teadusbuss 120 reisi.

Uute ettevõtmistena võiks nimetada videotundide läbiviimist Kihnu koolis (õpetaja Enn Ööpik, tehniline tugi Taavi Adamberg ja Andres Juur) ning 5.-6. klassi õpilastele suunatud teaduslaagri läbiviimist 27.-30. oktoobril Tartus koostöös TÜ Teaduskooliga (projektijuht Andres Juur).

25.-27.06.2008 toimus Türil sealses kolledžis järjekordne füüsikaõpetajate suvekool. Organiseerimise raskus oli EFSi füüsikaõpetajate osakonna juhatuse õlul ja toimus see TÜ Avatud Ülikooli egiidi all. Esinesid TÜ ja TTÜ teadurid ning toimus pikk õppereis Ida-Virumaale. Suvekoolis osales 25 õpetajat.

Kogu aasta vältel käisid ettevalmistused veebipõhise, pidevalt täieneva inglise-eesti-inglise füüsikasõnastiku loomiseks ning moodustati füüsika terminoloogiakomisjon selle sisu toimetamiseks ja täiendamiseks. Sellesuunaline tegevus toimus koostöös Eesti Keele Instituudi ning TÜ üldkeeleteaduse osakonnaga. Sõnastik saab töökorda 2009. aasta esimeses pooles.

Noorfüüsikute osakonna eestvedamisel korraldati aruandeaastal kaks noorte füüsikute kooli (vt ka www.fyysika.ee/kool/). 20.-22. juunil toimus Nelijärve Puhkekeskuses kuues EFSi Täppisteaduste Suvekool. Osales 68 tudengit TTÜ-st ja TÜ-st. Toimus 18 tundi akadeemilisi loenguid ja seminare ning tudengite stendi- ja ettekandesessioon. Organisaatoriteks olid: Maarja Grossberg, Andi Hektor, Ahto Kuusk ja Kaido Reivelt. 31. oktoobrist kuni 2. novembrini toimus Käärikul järjekorras kümnes EFSi Täppisteaduste Sügiskool. Osales kokku 88 tudengit, teadlast ja õppejõudu. Kuulati üle 25 tunni loenguid ja seminare. Esmakordselt toimus töö paralleelselt kahes auditooriumis. Teemadest käsitleti nano- ja kosmosetehnoloogiaid, kvantkrüptograafiat ja tuumaenergeetikat. Organisaatoriteks olid Maarja Grossberg, Andi Hektor, Ahto Kuusk, Rünno

Lõhmus, Taavi Adamberg, Heli Kuuseorg, Kaido Reivelt, Tanel Ainla ja Aigar Vaigu.

2008. a kuulus EFSi 195 aktiivset liiget. EFS kuulub jätkuvalt Euroopa Füüsikaühingusse.

EFSi ettevõtmisi toetasid aastal 2008 TÜ Füüsika Instituut, Eesti Teaduste Akadeemia, Haridus- ja Teadusministeerium, Tiigrihüppe SA, Hasartmängumaksu nõukogu, Tartu Ülikool, Tallinna Tehnikaülikool, Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut, Tartu Observatoorium, Eesti Keele Instituut, AS Eesti Energia, SA Tallinna Tehnika- ja Teaduskeskus, MTÜ Kinobuss, SA Archimedes. Täname kõiki toetajaid ja loodame koostöö jätkumist.

Eesti Füüsika Seltsi juhatuse liikmed:

Kaido Reivelt

Ilmar Kink

Silver Lätt

Raivo Stern

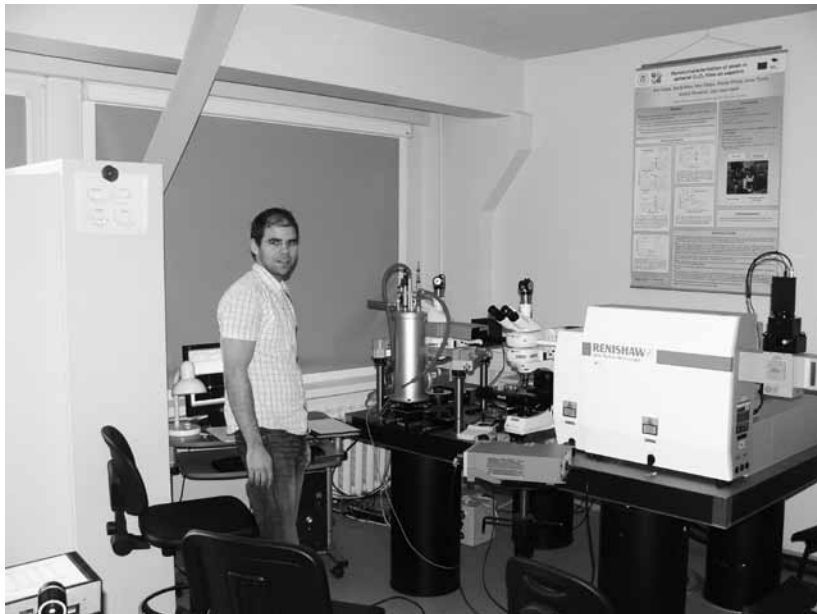
Tartus 7. veebruaril 2009. a.

AASTA PILT 2008

Kui maailmas sai 2008. a kõige enam vastukaja LHC eksperiment, millega ka Eesti füüsikud seotud on, siis kohalikku füüsikaelu iseloomustas eelkõige paljude tippseadmete lisandumine TTÜ, KBFI, TÜ ja ka teiste teaduskeskuste aparatuuriparki. Loodetavasti jätkub infrastruktuuri moderniseerimine ka tulevastel aastatel ja peatselt kuuleme selle tulemusena põnevaid uudiseid uutest avastustest.



KBFI „tubane pilvevabrik“: firma Brukeri tuumamagnetspektroskoopia seade ja selle „maaletooja“, leidur ja tuumaresonantsi meetodi täiustaja Ago Samoson. Seadet iseloomustavad vedela He temperatuuril üljuhnmagneti nominaalväli 18,81 teslat ja prootonite Larmori sagedus 800 MHz. Seadmega on seotud juba ka esimesed „viljad“ – *Nature Materials*'i veebruarinumbris (2009) ilmus Ago Samosoni ja Jaan Pasti osalusel artikkel KBFIis arendatud tahkise tuumaresonantstechnika läbimurdelisest rakendamisest nanomool-koguseliste valkude uurimisel.



Firma Renishaw Ramani mikrospektroskoopia kompleksi tutvustab selle suurim ekspert TÜ FIs Martti Pärs. Seade võimaldab väga erinevate mikroobjektide Ramani spektroskoopilist analüüsi.

TÜ FIs installeerimisel olev skaneeriv elektron-ioonmikroskoop (FIB/SEM firmalt FEI). Seade võimaldab nanomeetrilise lahutusvõimega nanostruktuuride tekitamist, kujutamist, keemilise koostise analüüsi ja manipuleerimist.



EFS LAIENDATUD JUHATUS 2008. AASTAL

- Kaido Reivelt** Tartu Ülikooli Füüsika Instituut, Riia 142, 51014 Tartu
esimees
Tel/faks: +372 737 4623 / 738 3033
E-mail: kaidor@fi.tartu.ee
- Ilmar Kink** Tartu Ülikooli Füüsika Instituut, Riia 142, 51014 Tartu
aseesimees
Tel/faks: +372 737 4744 / 738 3033
E-mail: ilmar.kink@ut.ee
- Raivo Stern** Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut, Akadeemia
aseesimees tee 23, 12618 Tallinn
Tel/faks: +372 639 8309 / 639 8393
E-mail: stern@kbfi.ee
- Silver Lätt** Tartu Ülikool, Tähe 4, 51010 Tartu
Tel/faks: +372 737 6523 / 741 0205
E-mail: Silver.Latt@ut.ee
- Maarja Grossberg** Tallinna Tehnikaülikool, Ehitajate tee 5, 19086, Tallinn
Tel/faks: +372 620 3210 / 620 3367
E-mail: mgross@staff.ttu.ee
- Helle Kaasik** Tartu Ülikooli Füüsika Instituut, Riia 142, 51014 Tartu
Tel/faks: +372 737 4707 / 738 3033
E-mail: helle.kaasik@ut.ee
- Madis Kiisk** Tartu Ülikooli Füüsika Instituut, Riia 142, 51014 Tartu
Tel/faks: +372 737 4780
E-mail: madis.kiisk@ut.ee
- Tõnu Laas** Tallinna Ülikool, Narva mnt 25, 10120 Tallinn
Tel/faks: +372 6409 408 / 6409 418
E-mail: tony@tlu.ee
- Anu Reinart** Tartu Observatoorium, Tõravere, 61602 Tartumaa
Tel/faks: +372 741 0278
E-mail: reinart@aai.ee
- Peeter Saari** Tartu Ülikooli Füüsika Instituut, Riia 142, 51014 Tartu
Tel/faks: +372 737 4611 / 738 3033
E-mail: peeter.saari@ut.ee

Margus Saal Tartu Ülikooli Füüsika Instituut, Riia 142, 51014 Tartu
Tel/faks: +372 737 4760 / 738 3033
E-mail: margus@fi.tartu.ee

Jaak Jõgi Lääne Ühisgümnaasium, Lääne sjsk, 60502 Lääne
Tel/faks: +372 733 4180 / 733 4184
E-mail: jaak.jogi@gmail.com

EFS V FÜÜSIKAÕPETAJATE SUVEKOOL

25.–27. juunini toimus Türi sealse kolledži baasil järjekordne füüsikaõpetajate suvekool. Organiseerimise raskus oli EFS füüsikaõpetajate osakonna juhatuse õlul ja toimus see TÜ Avatud Ülikooli egiidi all. Suvekoolis osales 25 õpetajat.

PÄEVAKAVA

Kolmapäev, 25. juuni

Enn Realo (TÜ). Tuumaenergeetikast
Ivo Palu (TTÜ). Eesti energeetikast

Neljapäev, 26. juuni

Õppereis Ida-Virumaale: Viru-Nigula tuulepark, Kohtla-Nõmme kaevanduspark-muuseum, Eesti Elektri jaam, Püssi alajaam. Giid oli Rein Levo.

Reede, 27. juuni

Marek Strandberg (Riigikogu). Mis on energeetika alternatiivid?
Õppereis Viljandimaale Olustverre, kus tutvuti Oskar Noorkõivu tähetorni-ga Orion ja osaleti füüsikaeksperimentides (vt www.hot.ee/tahetornorion/)

EFS TÄPPISTEADUSTE SUVEKOOL

EFS täppisteaduste suvekool 2008 toimus 20.–22. juunini Nelijärvel.
Lisainfo veebilehel www.fyysika.ee/kool.

LOENGIKAVA

Reede, 20. juuni

- | | |
|---------------|---|
| 13.00 – 13.15 | Avasõna korraldajatelt |
| 13.15 – 14.00 | Heli Lukner (TÜ). Valguskuulidest lineaarsetes ja mittelineaarsetes keskkondades |
| 14.00 – 15.00 | Aigar Vaigu (TÜ). Mida me nimetame footoniks? |
| 15.30 – 16.00 | Ivo Heinmaa (KBFI). Tuumaresonants – mis see on ja kuidas kasutatakse tahke aine uurimiseks |
| 16.00 – 16.45 | Andi Hektor (KBFI). Suure paugu ootuses: CERN LHC 2008 |
| 17.15 – 17.45 | Kaupo Voormansik (TÜ): Eesti tudengisatelliit? |
| 17.45 – 19.00 | Seminar: Võimalikud ühenduslülid noorfüüsikute vahel |

Laupäev, 21. juuni

- | | |
|---------------|---|
| 14.00 – 15.30 | Marko Vendelin (TTÜ). Südame töö matemaatilise modelleerimisest |
| 15.30 – 16.45 | Aleksander Rebane (Montana State University/KBFI). Mittelineaarse optika rakendusi biofüüsikas |
| 17.00 – 18.15 | Meelis Merilo (Keskkonnaministeerium). Milleks elektriauto? |
| 18.15 – 19.00 | Kristi Valdmets (TÜ), Krista Alikas (TÜ). Kosmose- tehnoloogia rakendused 71% Maa pinna seireks |

Pühapäev, 22. juuni

- | | |
|---------------|---|
| 10.00 – 11.30 | Tudengite lühiloengud & postrite tutvustused |
| 11.30 – 13.00 | Peeter Piksarv (TÜ) ja Kaido Reivelt (TÜ). Mis on saanud holograafiast? |
| 14.00 – 15.00 | Kokkuvõte, auhindade jagamine ja särgi oksjon |

EFS TÄPPISTEADUSTE SÜGISKOOL

31. oktoobrist 2. novembrini toimus Käärikul EFS täppisteaduste sügis-
kool 2008. Lisainfo veebilehel www.fyysika.ee/fyysika/nofy/.

LOENGIKAVA

Reede, 31. oktoober

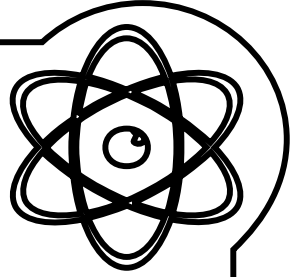
- | | |
|---------------|--|
| 14.00 – 14.15 | Avasõna korraldajatelt |
| 14.15 – 15.00 | Mait Müntel (CERN / KBFI). LHC |
| 15.00 – 15.45 | Siim Pikker (TÜ FI). Kuld |
| 16.15 – 17.00 | Mihkel Kree (TÜ FI). Kvantkrüptograafia praktilised võimalused |
| 17.15 – | Kaido Reivelt (EFS). fyysika.ee – kuhu edasi? |

Laupäev, 1. november

- | | |
|---------------|--|
| 10.30 – 11.30 | Enn Realo (TÜ). Tuumaenergia taassünd: probleemid ja väljakutsed |
| 13.00 – 16.00 | Kristjan Otsmann (Vain ja Partnerid). Mõtetest tegudeni |
| 16.30 – 17.40 | Mirt Gramann (TO). Kosmoloogia ja selle viimased arengud |
| 18.00 – 19.00 | Tudengite lühiloengud & postrite tutvustused |

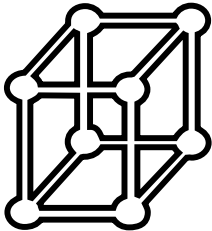
Pühapäev, 2. november

- | | |
|---------------|---|
| 10.00 – 11.30 | Marco Kirm (TÜ FI). Valgustahkiste saladusi paljastamas |
| 11.45 – 12.30 | Jouni Envall (TO). The electric solar wind sail |
| 12.45 – 13.45 | Lõunasöök & kokkuvõte & auhindade jagamine |



FÜÜSIKAKROONIKA

2008



TÖÖKORRALDUS

- 1. jaan ühendati Tartu Ülikooli füüsika-keemia- ja bioloogia-geograafiateaduskonnad loodus- ja tehnoloogiateaduskonnaks (LOTE). LOTE koosneb kuuest teadus- ja arendusasutusest: TÜ Füüsika Instituut, TÜ Keemia Instituut, TÜ Molekulaar- ja Rakubioloogia Instituut, TÜ Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, TÜ Tehnoloogia-instituut ning TÜ Eesti Mereinstituut. LOTE dekaan on keemilise füüsika professor Peeter Burk (valiti 29. nov 2007). LOTE dekaanat asub Vanemuise 46-202.
- 1. jaan alates on Tallinna Ülikoolis suurte teaduskondade asemele tulnud märksa väiksemad instituudid, samuti on kaotatud õppetoolid. Seetõttu kuuluvad enne teoreetilise ja rakendusfüüsika õppetoolidesse kuulunud füüsikud TLÜ Matemaatika ja Loodusteaduste Instituuti.
- Jaanuaris valiti Tõnu Viik (Tartu Observatoorium) Eesti Looduseuurijate Seltsi presidendiks. Ta on läbi ajaloo teine astronoom selles ametis (esimene oli Grigori Levitski aastail 1901-1905).
- Kevadel loodi Tallinna Ülikooli juurde loodusteaduste tippkeskus „Loodus- ja tehiskeskkonna uuringud“. Loodusteaduste tippkeskuse loomise eestvedajaks oli Matemaatika ja Loodusteaduste Instituudi geoökoloogia professor ja Ökoloogia Instituudi vanemteadur Jaan-Mati Punning, kes koordineerib ka tippkeskuse tööd. Tippkeskuse töös osaleb 5 sihtfinantseeritavat uurimisrühma kolmest instituudist: kaks rühma Matemaatika ja Loodusteaduste Instituudist, kaks rühma Ökoloogia Instituudist ja üks rühm Ajaloo Instituudist. Tippkeskuse koosseisu kuulub 36 sihtfinantseeritavate teadusteemade põhitäitjate nõuetele vastavat teadlast.
- 3. märtsil kinnitas TO teadusnõukogu Tartu Observatooriumi arengukava aastateks 2008-2013.
- 31. märtsil valiti TO nõukogus vanemteaduriteks atmosfäärifüüsika erialal Andres Kuusk, Tiit Nilson ja Kalju Eerme. Vanemteaduriks astrofüüsika erialal valiti Kalju Annuk. Lili Sapar ja Alar Puss valiti teaduriteks astrofüüsika erialal ning Peeter Tenjes valiti 0,25 koormusega vanemteaduriks kosmoloogia erialal.
- 30. mail valis TÜ nõukogu Tartu Ülikooli audaktoriks Helsingi Ülikooli ja Soome Akadeemia professori Markku Tapio Kulmala, kes on aerosoolifüüsika klimatoloogilise suuna ülemaailmne liider ja

ökosüsteemide meteoroloogia kui teadussuuna rajaja. Audoktori promoveerimine toimus eestikeelse ülikooli 89. aastapäeval, 1. detsembril.

- Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut (KBFI) kaebas halduskohtusse haridus- ja teadusministri käskkirjad, mille kohaselt Tõnis Pehki juhitud sihtteema taotlus ei saanud finantseerimist. 10. juunil väljakuulutatud kohtuotsus jättis kaebuse rahuldamata.
- 6. juunil valiti prof Tiit Nilson Helsingi Ülikooli audoktoriks.
- 16. juunil sõlmisid Tartu Ülikool ja KBFI strateegilise koostöö lepingu, millega ühendatakse jõud teaduse ja õppetöö arendamisel. KBFI direktori Raivo Sterni sõnul soovib instituut koostöölepinguga suurendada oma panust Eesti kõrghariduse kavandamises ja arengus.
- Juunis langetas Sihtasutus Archimedes otsused 524 355 000 krooni struktuuritoetuste raha jagamiseks teaduse tippkeskustele programmi perioodil 2007–2013. Laekunud 24 taotlusest soovitas komisjon heaks kiita seitse projekti. Valitute hulka ei sattunud sel korral ei füüsikud, keemikud, materjaliteadlased ega ka keskkonna- ja atmosfäärifüüsikud.
- 20. juunil valis Tartu Ülikooli nõukogu oma istungil kuus professorit. Tagasi valiti anorgaanilise keemia professor Väino Sammelselg ning biofüüsika ja taimefüsioloogia professor Arvi Freiberg. Füüsikalise ja analüütilise keemia juhtivteaduriks valiti Ilmar Koppel.
- Septembris seati sisse uued traadita interneti pöörduspunktid TÜ füüsikamajade Riia 142 ja Tähe 4 ruumides. Tähe 4 ruumides täienes Eduroam võimalusega traadita võrgu leviala auditooriumides ja fua-jees. Riia 142 ruumides on nüüd neli Eduroam kasutuskohta: kohvik, saal, auditoorium ja raamatukogu.
- 2. dets valiti TO nõukogus vanemteaduriks 0,5 koormusega kaugseire erialal Mait Lang. Teadurina kaugseire erialal 0,75 koormusega jätkab Urmas Peterson, samuti jätkavad teaduritena astrofüüsika erialal Anna Aret ja Raivo Poolamäe ning teaduriks kosmoloogia erialal valiti Ivan Suhhonenko.
- 16. dets Eesti Teaduste Akadeemia juhatuse istungil valiti uueks uuri- ja-professoriks KBFI vanemteadur Martti Raidal.
- 19. dets valiti TÜ Füüsika Instituudi direktoriks Marco Kirm ja teadusdirektoriks Toomas Plank. Nende ametiaeg algab 5. jaan 2009.
- Dr Abdelaziz Kallel asus tööle kaheks aastaks järel doktorina TO taimkatte kaugseire töörühmas.

- Aasta jooksul valiti TÜ FI vanemteaduriteks Urmas Hörrak (aerosoolifüüsika), Marco Kirm (materjaliteadus), Jaan Aarik (materjaliteadus), Ilmo Sildos (optika ja spektroskoopia), Kaido Reivelt (optika), Arvo Kikas (röntgenspektroskoopia), Pavel Rubin (tahkiste teooria), Aadu Mirme (aerosoolifüüsika), Madis Noppel (aerosoolifüüsika teoreetilised probleemid), Viktor Seeman (kristallide füüsika ja EPR) ja Märt Aints (optika ja gaaslahendus) ning teaduriteks Aare Luts (matemaatiline modelleerimine), Küllike Rägo (väljateooria), Indrek Jögi (kile- ja plasmatehnoloogia) ja Tiia-Ene Parts (õhu keemiline füüsika).

II. VÄITEKIRJADE KAITSMINE

1. DOKTORITÖÖD

Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi nõukogu

- 28. märtsil kaitses **Küllike Rägo** doktoritöö „Superconducting properties of MgB_2 in a scenario with intra- and interband pairing channels“ (MgB_2 ülijuhtomadused tsoonisestest ja tsoonidevaheliste paardumiskanalitega stsenaariumis) PhD kraadi saamiseks teoreetilise füüsika erialal. Juhendajad: dots Teet Örd (TÜ FI) ja prof Nikolai Kristoffel (TÜ FI). Oponent: prof Sergei Kruchinin (Bogoljubovi-nim Teoreetilise Füüsika Instituut, Ukraina TA).
- 20. juunil kaitses **Els Heinsalu** doktoritöö „Normal and anomalously slow diffusion under external fields“ (Normaalne ja anomaalselt aeglane difusioon välistes väljades) PhD kraadi saamiseks teoreetilise füüsika erialal. Juhendaja: dots Teet Örd (TÜ FI). Oponentid: prof Igor Sokolov (Humboldti Ülikool, Berliin) ja dr Jaan Kalda (TTÜ KübI).
- 27. juunil kaitses **Kuno Kooser** doktoritöö „Soft x-ray induced radiative and nonradiative core-hole decay processes in thin films and solids“ (Röntgenergastuste kiirguslik ja mittekiirguslik lagunemine kiledes ja tahkistes) PhD kraadi saamiseks tahkisefüüsika erialal. Juhendaja: dr Arvo Kikas (TÜ FI). Oponent: prof Jan-Erik Rubensson (Uppsala Ülikool, Rootsi).
- 27. juunil kaitses **Vadim Boltruško** doktoritöö „Theory of vibronic

transitions with strong nonlinear vibronic interaction in solids“ (Tugeva mittelineaarse vibrooninteraktsiooniga tahkiste elektronsiirete teooria) PhD kraadi saamiseks teoreetilise füüsika erialal. Juhendaja: prof Vladimir Hižnjakov (TÜ FI). Oponent: prof Boris Tsukerblat (Ben-Gurioni Ülikool, Beer-Sheva, Iisrael).

- 26. aug kaitses **Andi Hektor** doktoritöö „Neutrino physics beyond the Standard Model“ (Standardmudeli järgne neutriinofüüsika) PhD kraadi saamiseks osakestefüüsika erialal. Juhendaja: dr Martti Raidal (KBFI). Oponent: dr Katri Huitu (Helsinki Ülikool, Soome).
- 26. sept kaitses **Raavo Josepson** doktoritöö „Photoinduced field-assisted electron emission into gases“ (Elektronide fotoindutseeritud väljaemissioon gaasikeskkonda) PhD kraadi saamiseks optika ja spektroskoopia erialal. Juhendaja: dots Matti Laan (TÜ FI). Oponentid: prof Mirko Černák (Comeniuse Ülikool, Bratislava, Slovakkia) ja prof Jean Paillol (Pau Ülikool, Pau, Prantsusmaa).
- 10. okt kaitses **Martti Pärs** doktoritöö „Study of spontaneous and photoinduced processes in molecular solids using high-resolution optical spectroscopy“ (Spontaansete ja fotoindutseeritud protsesside uurimine molekulaartahkistes kõrgselektiivse optilise lisandispektroskoopia meetoditega) PhD kraadi saamiseks tahkisefüüsika erialal. Juhendajad: prof Jaak Kikas (TÜ FI) ja dr Viktor Palm (TÜ FI). Oponentid: dr Yuri G. Vainer (Venemaa TA Spektroskoopia Instituut, Troitsk) ja dr Juhan Subbi (KBFI).
- 17. okt kaitses **Kristjan Kannike** doktoritöö „Implications of neutrino masses“ (Järeldused neutriinode massidest) PhD kraadi saamiseks teoreetilise füüsika erialal. Juhendajad: dr Martti Raidal (KBFI) ja dots Rein Saar (TÜ FI). Oponent: prof Jukka Maalampi (Jyväskylä Ülikool, Soome).
- 5. nov kaitses **Vigen Issahhanjan** doktoritöö „Hole and interstitial centres in radiation-resistant MgO single crystals“ (Auk- ja interstitsiaalcentrid kiirituskindlates MgO monokristallides) PhD kraadi saamiseks tahkisefüüsika erialal. Juhendajad: dr Tiit Kärner (TÜ FI) ja prof Aleksandr Luššik (TÜ FI). Oponent: dr Anatoli Popov (Tahkisefüüsika Instituut, Läti Ülikool).
- 11. nov kaitses **Veera Krasnenko** doktoritöö „Computational modeling of fluorescent proteins“ (Fluorestseeruvate proteiinide arvutimodelleerimine) PhD kraadi saamiseks tahkisefüüsika erialal. Juhendaja: dr Koit Muring (TÜ FI). Oponentid: dr Judit Fidy (Simmelweisi Ülikool, Budapest, Ungari) ja prof Toomas Tamm (TTÜ).

- 5. dets kaitses **Mait Müntel** doktoritöö „Detection of doubly charged Higgs boson in the CMS detector“ (Topeltlaetud Higgsi bosoni detekteerimine CMSi detektoril) PhD kraadi saamiseks teoreetilise füüsika erialal. Juhendaja: dr Martti Raidal (KBFI). Oponendid: dr Oxana Smirnova (Lundi Ülikool, Rootsi) ja dr Margus Saal (TO).

Tallinna Tehnikaülikooli teaduskondade nõukogud

Filosoofiadoktori teaduskraadi kaitsesid:

- **Johan Anton** „Integraalse fotoelastsuse tehnoloogia jääkpingete määramiseks telgsümmeetrilistes klaasobjektides“ (Technology of integrated photoelasticity for residual stress measurement in glass articles of axisymmetric shape). Juhendaja: DSc Hillar Aben (TTÜ Kübi). Oponendid: prof Emmanuel Gdoutos (Ateena Akadeemia korr.liige, Thrace Democrituse Ülikool, Kreeka), dr Jonathan Williams (Pilkington European Technology Centre, Suurbritannia). Kuupäev: 19.06.2008.
- **Dan Hüvonen** „Madalamõduliste spinnsüsteemide terahertsspektroskoopia“ (Terahertz Spectroscopy of Low-dimensional Spin Systems). Juhendajad: prof Jüri Krustok (TTÜ), dr Urmas Nagel (KBFI), dr Toomas Rõõm (KBFI). Oponendid: dr Ilmo Sildos (TÜ FI), dr Sergei Zvyagin (Dresden High Magnetic Field Laboratory, Forschungszentrum Rossendorf). Kuupäev: 17.06.2008.
- **Mario Kadastik** „Kahekordse laenguga Higgsi bosoni lagunemiste analüüs ja selle mõju neutriinofüüsikale“ (Doubly charged Higgs boson decays and implications on neutrino physics). Juhendajad: prof Rein-Karl Loide (TTÜ füüs.inst), dr Martti Raidal (KBFI). Oponendid: dr Margus Saal (TO), dr Oxana Smirnova (Lundi Ülikool, Rootsi). Kuupäev: 14.10.2008.

2. MAGISTRITÖÖD

TÜ FI teadusmagistritööde (4+2) kaitsmiskomisjon

Antud kraad: magister scientiarum

- **Olga Tarassova** „Исследование возможностей оценки коэффициента Старлинга желудочков сердца по Фуко-кардиограмме“ (Südame Starlingi koefitsiendi Foucault' kardigrammist määramise võima-

luste uurimine / Study of possibilities of Foucault cardiography-based estimation of Starling heart coefficient). Eriala: rakendusfüüsika. Juhendaja: dots biol.kand Jüri Vedru (TÜ FI). Oponendid: med.kand Kersti Jagomägi (TÜ füsioloogia instituut) ja Dr. habil. biol. Arved Vain (TÜ emeriitdotsent). Kuupäev: 31. 03. 2008.

- **Ivo Pruul** „Meditasiiniliste lamekuvarite kvaliteedikontrolli tarkvara rakendused ja DICOM kalibratsioon“. Eriala: rakendusfüüsika. Juhendaja: MSc Kalle Kepler (TÜ FI). Oponendid: f.-m.kand Andres Haav (SA TÜ Kliinikum) ja diplom. füüsik Andrus Aavik (SA TÜ Kliinikum). Kuupäev: 16.06.2008.
- **Vahur Zadin** „Foucault' kardiogrammi tekke uuringud südant sondeerivate pöörivoolude arvutamise abil“. Eriala: rakendusfüüsika. Juhendaja: dots biol.kand Jüri Vedru (TÜ FI). Oponendid: tehn.kand Rein Raamat (TÜ Füsioloogia Instituut) ja dr Heiki Kasemägi (TÜ Tehnoloogiainstituut). Kuupäev: 16.06.2008.
- **Semjon Galajev** „Degradation processes in $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ and $\text{BaMgAl}_{14}\text{O}_{23}:\text{Eu}^{2+}$ “ (Lagunemisprotsessid $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ ja $\text{BaMgAl}_{14}\text{O}_{23}:\text{Eu}^{2+}$ sees). Eriala: tahkisefüüsika. Juhendaja: prof f.-m. dr Aleksandr Luštšik (TÜ FI). Oponent: dr Vladimir Makhov (TÜ FI). Kuupäev: 16.06.2008.
- **Riho Vendt** „Temperatuuri riigietaloni väljaarendamine Eesti Vabariigis“. Eriala: rakendusfüüsika. Juhendajad: dr Mart Noorma (TÜ FI) ja dr Toomas Kübarsepp (AS Metrosert). Oponendid: f.-m.dr Lembit Pung (TÜ FI) ja dr Olev Saks (TÜ Keemia Instituut). Kuupäev: 16.06.2008.

TTÜ matemaatika-loodusteaduskonna tehnilise füüsika õppesuuna magistrikomisjon

Loodusteaduste magistrakraadi (tehniline füüsika, 4+2 õppekava) kaitsesid:

- **Heli Rennik** „Solving Modeling, Analysis and Synthesis Problems for Nonlinear Control Systems Using webMathematica“. Juhendaja: dr Ülle Kotta (TTÜ Kübi). Retsensent: dots Mati Väljas (TTÜ matem. inst). Kuupäev: 09.06.2008.
- **Madis Tuul** „Seade pooljuhtmaterjalide eritakistuse temperatuurilise sõltuvuse mõõtmiseks“. Juhendaja: dots Aleksei Gavrilov (TTÜ füüs. inst). Retsensendid: dots Mihhail Klopov (TTÜ füüs.inst) ja dots Arvo Mere (TTÜ füüs.inst). Kuupäev: 09.06.2008.

III. ÕPPETÖÖ

- TÕ doktoriõppesse võeti:
 - füüsika erialal: Meelis Eller, Kaarel Kimmel, Karl Kruusamäe, Ivar Kuusik, Deivid Pugal, Mihkel Rähn, Jevgeni Šablonin, Anna Šugai, Viktor Vabson, Riho Vendt;
 - materjaliteaduse erialal: Kelli Hanschmidt, Ivan Netšipailo, Viljar Palmre;
 - keskkonnatehnoloogia erialal: Jaanus Hallik, Eva-Stina Kerner, Riina Klais, Ave Kodar, Roomet Leiger, Martin Liira, Hiie Nõlvak;
 - tehnika ja tehnoloogia erialal: Heilo Altin, Kristiina Laanemets, Taavi Lehto, Indrek Remmel, Anastasia Selyutina, Evgeniy Shepel, Vahur Zadin, Janno Torop, Margus Varjak, Rainis Venta, Piret Villo.
- TÕ magistriõppesse võeti:
 - füüsika erialal: Tanel Ainla, Siim Ainsaar, Priit Jaanson, Joosep Kepler, Riho Kägo, Martin Lind, Madis Lõhmus, Heli Lätt, Mihkel Pajusalu, Grigori Palamartšuk, Tarmo Rasmann, Riho Reinthal, Artur Tamm;
 - arvutitehnika erialal: Taavi Ilves, Kristjan Nurmela, Aire Olesk, Aron Ott, Alo Peets, Ramon Rantsus, Hannes Tamme, Teet Tilk, Veiko Vunder;
 - materjaliteaduse erialal: Ilja Domaškin, Talis Raak, Madis Umalas, Raul Välbe;
 - füüsikaõpetaja erialal: Taavi Adamberg, Ahto Alas, Anne Anier, Andres Juur, Olga Leontjeva, Aliisi Lokotar, Kerli Mikk, Maret Ney;
 - keskkonnatehnoloogia erialal: Kadri Aljas, Julia Aprelkova, Liis Astover, Irina Biduljak (Krivonožko), Galina Danilišina, Polina Degtjarenko, Reelika Eiche, Liis Eres, Lauri Joosu, Marko Kaarna, Margarita Kagan, Hannes Keernik, Elo Kibena, Piret Krillo, Laur Kõiv, Mari-Liis Lepisk, Merle Mandel, Mihkel Mäesaar, Christina Mürk, Taavi Paal, Tanel Palusoo, Inna Perelejeva, Kadi Rammul, Scheila Schulz, Heidi Silvet, Kristo Säde, Indrek Talpsep, Ave Uustal, Annika Vilem, Oliivia Võrk;
 - rakendusliku mõõteteaduse erialal: Dana-Maria Bunaciu, Klodian Dhoska, Urmas Joost, Madis Juurma, Liina Kruus, Kerli Lauk, Jigang Li, Mbu Eyong Samson Nchor, Michael Madueke Obi, Evelyn Pelska, Gert Suurkuusk, Piret Truusalu.

- Tartu Ülikooli 3-a. bakalaureuseõppe lõpetasid:
 - füüsika erialal: Taavi Adamberg, Tanel Ainla, Siim Ainsaar – *cum laude*, Vladislav Belous – *cum laude*, Grete Belõi, Konstantin Gussev, Priit Jaanson, Andres Juur, Joosep Kepler, Heli Lätt (Kuuseorg), Riho Kägo, Martin Lind, Andre Lipand – *cum laude*, Madis Lõhmus, Mihkel Pajusalu – *cum laude*, Regina Pala, Tarmo Rasmann, Riho Reinthal, Artur Tamm, Kristjan Veskimäe;
 - materjaliteaduse erialal: Tõnis Arroval, Ilja Domaškin, Anna Jeršova, Urmas Joost, Arko Kesküla, Talis Raak, Janno Saar, Madis Umallas, Raul Välbe;
 - keskkonnatehnoloogia erialal: Kadri Aljas, Julia Aprelkova, Maria Isabel Aro, Liis Astover, Galina Danilišina, Reelika Eiche, Liis Eres, Kristel Evardi, Lauri Joosu, Karmen Juhkam, Margarita Kagan, Kadri Kalda, Hannes Keernik, Gea Kiudorf, Piret Krillo, Irina Krivonožko, Laur Kõiv, Eve Leis, Mari-Liis Lepisk, Jaanis Lodjak, Merle Mandel, Mihkel Mäesaar, Maiken Mölder, Christina Mürk, Liselle Mürk, Monika Ozolina, Taavi Paal, Evely Pelska, Inna Perelejeva, Age Pork, Sander Proosväli, Marili Pruuns, Triin Rospel, Scheila Schulz, Sven Siir, Kristo Säde, Indrek Talpsep, Mario Topasia, Ave Uustal, Annika Vilem, Oliivia Vörk;
 - infotehnoloogia erialal: Andres Anderson, Dmitri Danilov, Ruslan Divonin, Tiit Ginter, Murad Kamalov, Arni-Shoel Leibovitš, Peeter Niinepuu, Aron Nurk, Kristjan Nurmela, Alo Peets, Andres Piibeleht, Ramon Rantsus, Veiko Vunder.
- Tartu Ülikooli magistriõppe (3+2) lõpetasid:
 - fundamentaalfüüsika erialal: Mihkel Rähn – *cum laude*;
 - materjaliteaduse erialal: Kelli Hanschmidt (Keevend), Ivan Netšipailo, Viljar Palmre, Jevgeni Šablonin – *cum laude*, Mari Šavel, Anna Šugai, Janno Torop;
 - keskkonnatehnoloogia erialal: Anu Arak, Olga Buhvestova – *cum laude*, Liis Edenberg, Merli Hass, Tiit Kaasik, Eva-Stina Kerner, Ave Kodar, Meelis Mark, Merli Nagel, Kaire Noodla, Hiie Nõlvak – *cum laude*, Annette Sedman, Peep Siim, Olga Veresova;
 - infotehnoloogia erialal: Heilo Altin, Jaas Ježov, Karl Kruusamäe, Tarvo Kärberg – *cum laude*, Aleksander Tõnnisson, Hannes Vaher;
 - füüsikaõpetaja erialal: Aleksandr Borissov, Sigrid Kaju, Raido Koppel, Maris Mäeotsa, Liidia Pogorelova – *cum laude*, Ella Pöder, Jelena Ragni, Heli Toit;

- rakendusfüüsika erialal: Meelis Eller, Ivar Kuusik – *cum laude*, Marje Prank, Deivid Pugal – *cum laude*.
- Tallinna Ülikoolis uue õppekava statuudi moodustamisega seoses on suurendatud füüsika õppekavades nii erialaste kui ka üldiste valikainete hulka.
- Tallinna Ülikoolis kaitsesid magistrikaadi füüsikaõpetaja erialal (3+2 õppekava) Katrin Laas, Gerrit Kanarbik, Alge Ilosaar, Nadia Leitsenok, Kristi Juuse ja Veroonika Pelõhh.
- TLÜ füüsika doktorandid: Jaanis Priimets (juh Ülo Ugaste), Anna Šeletski (juh Anne Tali), Oksana Labanova (juh Anne Tali), Tarmo Metsmägi (juh Andi Kivinukk), Natalja Timohhina (juh Valdur Saks), Katrin Laas (juh Romi Mankin), Veroonika Pelõhh (juh Tõnu Laas).
- TLÜ füüsika magistrandid (3+2 õppekaval, füüsikaõpetaja erialal): Marin Grüning (juh Tõnu Laas), Andrus Niiterberg (juh Priit Reiska), Kalle Kebbinau (juh Kalle Truus), Kristi Koosa (juh Anneli Roode).
- TLÜ lõpetas füüsikaõpetaja erialal (5 aastane õpe): Märt Umbleja, juhendaja Ako Sauga.
- Tallinna Tehnikaülikooli füüsikainstituudis õppisid:
 - tehnilise füüsika doktorantuuris: Veljo Sinivee (juh prof R.-K. Loide), Mario Mars (juh van.teadur V. Harvig), Mario Kadastik (juh prof R.-K. Loide ja KBFi van.teadur M. Raidal), Tõnis Oja (juh prof R.-K. Loide), Dan Hüvonen (juh KBFi van.teadur U. Nagel, KBFi van.teadur T. Rõõm), Jaak Toomela (juh dots M. Klopov).
 - tehnilise füüsika magistrantuuris:
 - * (4+2 õppekaval) Ahto Kuusk (juh dots M. Klopov), Heli Rennik (juh Ülle Kotta), Madis Tuul (juh dots A. Gavrilov).
 - * (3+2 õppekaval) Ahti Bloom, Irina Jelissejeva, Tanel Joon, Andres Kaalep, Dmitri Kartofelev, Kaspar Kevvai, Kristi Kibuvits, Erki Kärber, Martin Laasmaa, Indrek Mandre, Merike Martsepp, Marion Murumaa, Egris Mõttus, Margo Müller, Nelli Norit, Radu Prekup, Reio Pöder, Taavi Raadik, Rait Rand, Margit Rästas, Ivan Sertakov.
- TTÜ tehnilise füüsika magistriõppe (3+2) lõpetasid loodusteaduste magistri kraadiga tehnilise füüsika erialal Tanel Joon (rakendusfüüsika) ning Villu Kikas ja Taavi Liblik (füüsikalised maateadused).
- TTÜ tehnilise füüsika õppekava lõpetasid loodusteaduste bakalaureuse kraadiga tehnilise füüsika erialal Tom Arula, Ahti Bloom, Erkki Kask, Kaspar Kevvai, Merike Martsepp, Marion Murumaa, Styna Randmaa, Joonas Rihma ning meditsiinifüüsika erialal Eirik Lepp.

- Metsade kaugseire alaste magistritöödega lõpetasid 3+2 magistriõppe Anton Kardakov (EMÜ metsandus- ja maaehitusinstituut) ja Kadri Kiis (TÜ ökoloogia ja maateaduste instituut).
- TTÜ füüsikainstituudi tehnilise füüsika bakalaureuse õppekavasse lisandusid uued ained: „Introduction to Space Flight“ (inglise keeles), lektor van.teadur V.-V. Pustõnski; „Sissejuhatus astrofüüsikasse“, lektor van.teadur V. Harvig.
- Haridus- ja teadusminister premeeris järgmisi üliõpilaste teadustööde riikliku konkursi 2008 laureaate loodusteaduste ja tehnika valdkonnas:
 - rakenduskõrgharidusõppe ja bakalaureuseõppe üliõpilaste astmes:
 - * I preemia (15000 kr) Madis Lõhmus (TÜ), konkursitöö „Ülilühikeste optiliste impulsside mõõtmise FROG-ga“ eest;
 - * I preemia (15000 kr) Jaanika-Maria Seinberg (TÜ), konkursitöö „Hapniku elektroredutseerumine antrakinooniga modifitseeritud klaassüsinikelektroodidel“ eest;
 - * II preemia (10000 kr) Eha Kulper (TTÜ), konkursitöö „Mittemetalsete lisandite määramine metallograafilisel meetodil“ eest;
 - * II preemia (10000 kr) Jaan Vajakas (TÜ), konkursitöö „Topoloogilise ruumi kujutuste kogumite poolt määratud laiendid“ eest;
 - * III preemia (5000 kr) Tõnis Arroval (TÜ), konkursitöö „Titaanoksiidkilede röntgenanalüüs“ eest;
 - * III preemia (5000 kr) Mehis Rohtla (TÜ), konkursitöö „Avamere tuuleparkidest ja nende võimalikest mõjudest kalastikule“ eest;
 - * Diplomid: Karli Jaason (TTÜ), Urmas Joost (TÜ);
 - magistriõppe üliõpilaste astmes:
 - * I preemia (25000 kr) Mihkel Rähn (TÜ), konkursitöö „Üksikute kiirgusentrte kasutamine ühe footoni allikana“ eest;
 - * I preemia (25000 kr) Konstantin Tretjakov (TÜ), konkursitöö „G=MAT: meetod geeniekspressiooni ja DNA seondumisandmete ühendamiseks“ eest;
 - * II preemia (20000 kr) Villu Kikas (TTÜ), konkursitöö „FerryBox mõõtmised — vahend mesomastaapsete protsesside uurimiseks Soome lahes“ eest;
 - * III preemia (10000 kr) Juri Belikov (TTÜ), konkursitöö „Mittelineaarsete diskreetaja mudelite identifitseerimine ja süntees mudelil põhinevaks juhtimiseks“ eest;
 - * III preemia (10000 kr) Rainer Küngas (TÜ), konkursitöö „Tahkeoksiidkütuseelemendis kasutatavate materjalide optimeerimine

- katseplaneerimise meetodil“ eest;
- * Diplomid: Aljona Aranson (TTÜ), Taavi Liblik (TTÜ), Merit Oss (TÜ);
 - doktoriõppe üliõpilaste astmes:
 - * I preemia (25000 kr) Els Heinsalu (TÜ), konkursitöö „Normaalne ja anomaalselt aeglane difusioon välistes väljades“ eest;
 - * I preemia (25000 kr) Agnes Kütt (TÜ), konkursitöö „Happe-aluse tasakaalude uurimine mittevesikeskkondades“ eest;
 - * II preemia (20000 kr) Niina Kulik (TTÜ), konkursitöö „Fentoni protsesside rakendamine reovete ja pinnaste töötlemiseks“ eest;
 - * II preemia (20000 kr) Ave Sarapuu (TÜ), konkursitöö „Hapniku elektrokeemiline redutseerumine kioonidega modifitseeritud süsinikelektroodidel ning õhukestel plaatina- ja kuldkatetel“ eest;
 - * III preemia (10000 kr) Ilona Oja Acik (TTÜ), konkursitöö „Titaandioksiidi kiled sool-geeli meetodil“ eest;
 - * III preemia (10000 kr) Andrus Seiman (TTÜ), konkursitöö „Kaasaskantav kapillaarelektroforeesi seade koos kontaktita juhtivusdetektori ja ristsisendseadmega“ eest;
 - * Diplomid: Martti Pärs (TÜ), Kaja Sõstra (TÜ), Hannes Tõnisson (TLÜ).
 - Eesti Teaduste Akadeemia üliõpilastööde konkursi II auhinna 8000 krooni said füüsikaga seotud tööd:
 - Villu Kikas (TTÜ), magistritöö „FerryBox mõõtmised — vahend mesomastaapsete protsesside uurimiseks Soome lahes“ (juh prof Urmas Lips);
 - Taavi Liblik (TTÜ) magistritöö „Temperatuuri ja soolsuse vertikaalse jaotuse iseärasused Soome lahes suvekuudel“ (juh prof Urmas Lips);
 - Eva Roos-Sildre (TÜ) magistritöö „Tsüklobutadieeni ja tema lämmastikderivaatide potentsiaalse energia pinnad“ (juh prof Peeter Burk).
 - TÜ Füüsika Instituudi üliõpilasstipendiumi erakordselt osavõturohkel konkursil jaotati 40 000-kroonine stipendiumifond 12 kandidaadi vahel.
 - Bakalaureuseõppes sai esikoha ja stipendiumi 6000 kr Urmas Joost (3. a materjaliteadus; juh van.teadur Vambola Kisand), järgnesid 4000 kr saanud Martin Lind (3. a füüsika; juh erak teadur Martti Pärs) ning 2000 kr saanud Tõnis Arroval (3. a. materjaliteadus;

juh van.teadurid Jaan Aarik ja Hugo Mändar), Vladislav Belous (3. a füüsika; juh van.teadur Matti Selg) ja Artur Tamm (3. a füüsika; juh insener Fred Valk). Ergutusstipendiumi 1000 kr pälvis Aleksei Vorobjov (3. a keemia; juh teadurid Tanel Tätte ja Valter Kiisk).

- Magistriõppes pälvis esikoha stipendiumi 8000 kr Mihkel Rähn (2. a fundamentaalfüüsika; juh erak teadur Martti Pärs), 2. koha ja 6000 kr said Kristjan Kunnus (1. a materjalitehnoloogia; juh van.teadur Eduard Feldbach ja teadusdirektor Marco Kirm) ja Tiit Sepp (1. a fundamentaalfüüsika; juh erak van.teadur Ilmar Ots).
- Ergutusstipendiumi 1000 kr said Kertriin Paabo (1. a keemia; juh van.teadur Raivo Jaaniso, teadur Tea Avarmaa ja dots Uno Mäeorg), Anna Šugai (2. a materjalitehnoloogia; juh prof Aleksandr Luštšik ja v.-teadur Jevgeni Vassiltšenko) ja Hardi Veermäe (1. a fundamentaalfüüsika; juh van.teadur Stefan Grootte).

Kõik stipendiaadid said ka diplomi ja medali „Füüsika Instituudi väike briljant“.

- Septembris sai Skype'i ja Eesti Infotehnoloogia Sihtasutuse (EITSA) koostöös väljaantava Eesti suurima magistritoetuse Kaupo Voormansik (TÜ), kes asub saja tuhande kroonise stipendiumi abil õppima Rahvusvahelises Kosmoseülikoolis Strasbourgis. Kolmandat aastat eraldatava Skype'i magistristipendiumi eesmärgiks on toetada andekate noorte õpinguid välismaal ning edendada interdistsiplinaarsust reaal- ja humanitaarvaldkondade vahel.
- 22. septembril määras Tartu Observatooriumi teadusnõukogu Ernst Julius Öpiku nimelise stipendiumi Tartu Ülikooli doktorandile Elmo Tempelile ja Juhan Rossi nimelise stipendiumi Tartu Ülikooli doktorandile Kadri Kiisale. Mõlema stipendiumi suurus oli 12 000 kr.

IV. TEADUSÜRITUSED EESTIS

- 19.-20. veebr toimus Käärikul Tartu Ülikooli materjaliteaduse ja materjalide tehnoloogia doktorikooli (MMTDK) teaduskonverents. Doktorikooli projekt tegutses 31. oktoobrini. Doktorikooli raames toetati doktorantide tööd ja välissõite, toimusid ekspertide loengud.
- 11. märtsil toimus Eesti Teaduste Akadeemia saalis akadeemik Anto Raukase modereerimisel seminar sarjast „Teadus ühiskonnale“: „Kliima dünaamika ja energieetika“. Peale moderaatori esinesid et-

tekannetega veel prof Jaan-Mati Punning (TLÜ) ning prof Rein Vaikmäe ja Inge Roos (TTÜ). Enne seminari toimus professor Sergej S. Zilitinkevich'i loeng „Atmospheric Boundary Layer Feedback in Climate System and Triggering“.

- 18.–19. märtsil toimusid Tartus TÜ füüsikahoone suures auditooriumis (Tähe 4–160) XXXVIII Eesti füüsikapäevad ja XXX füüsikaõpetajate päevad. Ettekandeid oli 19, osalejaid ligi 200. Traditsiooniliselt kuulusid füüsikapäevade programmi meie füüsikute viimase aja uurimistulemusi tutvustavad ettekanded. Sel aastal oli tavalisest enam ülevaatlikke, üldarusaadavaid ja populaarseid ettekandeid, mis tutvustasid laiemat huvi pakkuvate uurimissuundade arengut meil ja mujal maailmas, nii füüsikast kui füüsikaga piirnevatest valdkondadest. Lisaks sellele arutati füüsika ja füüsikaharidusega seonduvaid probleeme. Eesti Füüsika Seltsi aastapreemia sai firma LDI (Laser Diagnostics Instruments AS). Füüsikapäevade ajal toimus ka EFSi üldkogu. Füüsikapäevade korraldustoimkond: Ilmar Kink, Jaak Jõgi, Kaido Reivelt.
- 17.–18. apr korraldas TO vanemteadur A. Reinart Pühajärvel projekti EstSpacE avaürituse – Eesti kosmoseuuringute ja tehnoloogiavõrgustiku seminari. Seminaril osales 27 teadlast ja spetsialisti Tartu Observatooriumist, Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudist, Tartu Ülikooli Füüsika Instituudist, Ettevõtluse Arendamise Sihtasutusest ja Invent Baltics OÜ-st. Osavõtjad kuulasid 6 ettekannet ning võtsid osa kahest töötoast – noorteadlaste ambitsioonid ja ootused ning projekti EstSpacE tegevuste arutelu.
- 23. apr toimus Tartu Ülikooli aulas Eesti Teaduste Akadeemia üldkogu aastakoosolek. Esines Endel Lippmaa teemal „Eesti energeetika võimalused ja perspektiivid“.
- 30. apr–2. maini korraldas TÜ Füüsika Instituudi tahkiseteooria labor Tartus Eesti-Saksa ühisseminari „Tugevad mittelineaarsed võnke- ja elektroninteraktsioonid tahkistes“ (*1st Bilateral Estonian-German Workshop on Strong Nonlinear Vibronic and Electronic Interactions in Solids*). Osalejaid oli 44: Eestist (TÜ, KBFI), Saksamaalt (Brandenburgi Tehnikaülikool, Stuttgarti Ülikool, Max Plancki Instituut, Leipzigi Ülikool) ja Leedust, esitati 20 suulist ja 15 posterettekannet. Vastutavat korraldustoimkonda juhtis Vladimir Hižnjakov, liikmed olid R. Stern ja T. Rõõm (KBFI), G. Seibold (BTU, Cottbus), M. Dressel (Univ. Stuttgart). Kohalik korralduskomitee töötas koosseisus V. Hižnjakov,

- A. Šerman, I. Tehver, H. Kaasik, I. Rebane, M. Haas, P. Rubin, V. Bolt-ruško, A. Šelkan.
- 7. mail oli Tartu Ülikoolis ning Haridus- ja Teadusministeeriumis külas kõrgetasemeline Rootsi teadlaste delegatsioon laiendamaks koostööd Eesti teadlastega ning tutvustamaks Rootsi uut suurt teadusinfrastruktuuri projekti MAX-IV, mis käsitleb sünkrotronkiirguse kasutamist erinevates teadusvaldkondades. Külalised andsid ka loengu TÜ Füüsika Instituudis.
 - 16. mail toimus Tallinnas EL T&A 6. raamprogrammi projekti „Complexity-NET“ (vt www.complexitynet.eu) partnerite töönoupidamine. Septembris 2006 alustatud, kolm ja pool aastat kestva ning ERA-NET skeemi kuuluva projekti eesmärgiks on kompleksuuringute alaste teadusprogrammide sidustamine ja koostöö loomine Euroopa tasandil, osalevad 11 riiki: Suurbritannia (koordinaatorina), Belgia, Eesti, Hispaania, Holland, Iirimaa, Itaalia, Kreeka, Taani, Portugal, Ungari. Akadeemia esindab selles projektis Haridus- ja Teadusministeeriumi; teaduslikud huvigrupid on põhiliselt koondunud Mittelineaarsete Protsesside Analüüsi Keskusse (CENS) TTÜ Kübl juures. Nõupidamise eelüritusena toimus 15. mail teadusseminar CENSis.
 - 17. mail toimus Eesti Teaduste Akadeemias Patruse Ülikooli (Kreeka) professori Tassos Bountis'e loeng „Chaos and Order in Multidimensional Hamiltonian Systems“.
 - Juunis hakkasid TÜ ja TTÜ üliõpilased ehitama satelliiti eesmärgiga saata see Maa orbiidile. Vt www.estcube.eu
 - 20.-22. juunil toimus Nelijärve Puhkekeskuses EFSi täppisteaduste VI suvekool. Osales 59 tudengit TLÜst, TTÜst ja TÜst. Toimus 9 ettekannet, tudengid esinesid lühiloengute ja seminaridega. Teemadeks olid astronoomia, kosmosetehnoloogia, biofüüsika, holograafia, valguskuulid. Korraldustoimkonnas olid Maarja Grossberg, Andi Hektor, Ahto Kuusk, Kaido Reivelt ja Silver Lätt. Üritust toetasid KBFI, TTÜ, TÜ ja OÜ Rõõmulabor. Täpsem info www.fyysika.ee/kool
 - 1.-6. aug toimus Laulasmaa Spas kuues konverents seeriast „Füüsilised nähtused kõrgetes magnetväljades“ (PPHMF-6). Osalejaid oli Suurbritanniast 11, USAst 10, Jaapanist 10, Eestist 10 (sh 4 TÜ/TTÜ noorfüüsikut), Saksamaalt 6, Prantsusmaalt 5, Hollandist 2 ja nii Kanadast kui Ungarist 1. Teemad ulatusid tugevate magnetväljade tulevikuaengutest uute perspektiivsete tehnoloogiliste materjalide omaduste tutvustamiseni, nende hulgas ka vaid mõned kuud teada olevad

uued, FeAs kõrgtemperatuursed ülijuhid. Diskussioonid haarasid kõrgete magnetväljade uuringute ja eksperimentaalsete võimaluste laia piirkonda, püüdes identifitseerida ka lähituleviku lubavaimaid arenguid ja rakendusi. Konverentsi korraldasid Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi, Eesti „magnetlaboratooriumi“ teadlased Toomas Rõõm, Urmas Nagel ja Raivo Stern. Vt pphmf6.edu.ee

- 21. aug toimus Tallinnas termotuumaprogrammile pühendatud Eesti-Soome ühisnõupidamine. Nõupidamise eesmärgiks oli osalemine erinevates EFDA projektides. Põhitähelepanu pöörati plasma-reaktori seinte vastasmõjuga seonduvale. TÜ poolelt osalesid Madis Kiisk, Märt Aints, Peeter Paris ja Matti Laan.
- 26. aug korraldas EstSpace projekti meeskond TO vanemteaduri A. Reinarti juhtimisel Tartus rahvusvahelise seminari. 29 osavõtjat 6 riigist kuulasid 7 ettekannet, külastasid Tartu Observatooriumi Tõraveres ning Tartu Ülikooli Füüsika Instituuti ja Tehnoloogiainstituuti Tartus. Projektmeeskonna liikmed tutvustasid EstSpace projekti, Eesti kosmosepoliitika põhimõtteid, Tartu Observatooriumi arengukava ja võimalusi teadusasutuste ja ettevõtete koostööks Eestis. Neli EstSpace projekti nõuandva kogu liiget tutvustasid oma uurimistemasid astronoomia, vee kaugseire, maa kaugseire ja atmosfääri uuringute valdkonnas.
- 27.-29. aug toimus Tartus rahvusvaheline suvekool „Kaugseire rakendused ning kasutusvõimalused keskkonna ja julgeoleku jälgimiseks“, mille korraldas projekti EstSpace meeskond. Suvetoolis osales 59 noort 10 riigist. Osavõtjad kuulasid loenguid, said arvutiklassis praktilise väljaõppe kaugseire tarkvara BEAM kasutamiseks ning käisid tutvumas Eesti kaugseire katsealadega Järvel ja Peipsi järvel, kus neile tutvustati ka vastavaid mõõteriistu. Loengutes käsitleti nii maa-, vee- kui atmosfääri kaugseire teemasid. Suvetoolis osalejatele esinesid A. Reinart and T. Nilson (TO), T. Pyhälähti (Soome Keskkonna Instituut), H. Tork (Modesat Communications, Eesti), A. Rohrbach, (Leica Geosystems), P. Krusberg (Eesti Maa-amet), S. Kratzer (Stockholmi Ülikool, Rootsi), J. Praks (Helsingi Tehnikaülikool, Soome), C. Brockmann and K. Stelzer (Brockmann Consult, Saksamaa), H. van der Woerd (Amsterdami Vrije Ülikool, Holland) ja M. Laanen (Water Insight, Holland). Eesti, Läti ja Soome tudengid tutvustasid oma töid.
- 8.-10. sept toimus Pühajärvel XI Soome-Eesti aeroioonide ja atmo-

sfääriaerosooli ühisseminar „Uus osakeste põlvkond atmosfääris“. Osavõtjaid oli Soomest, Saksamaalt, Poolast, Rootsist ja Eestist, kokku 44 teadlast ja kraadiõppurit, kes kahe päeva jooksul esitasid 24 ettekannet. Esindatud olid Helsingi Ülikool, Soome Meteoroloogiateaduste Instituut, Lundi Ülikool, Poola Teaduste Akadeemia Geofüüsika Instituut, Leibnizi Troposfääriuurimise Instituut Saksamaalt, EMÜ, TO ja TÜ Füüsika Instituut. Seminari korraldas TÜ FI keskkonnafüüsika labor. Korralduskomiteesse kuulusid Urmas Hörrak (TÜ) ja Markku Kulmala (Helsingi Ülikool).

- 10. sept toimus Tallinnas Akadeemia majas (Kohtu 6) akadeemik Tarmo Soomere avalik akadeemiline loeng „Märatsev meri“.
- 12. sept toimus TÜ füüsikahoones pidulik seminar TÜ hinnatud legendaarse meteoroloogia- ja füüsikaõppejõu Herman Mürgi 100. sünniaastapäeva tähistamiseks. Osavõtjaid oli 60 üle kogu vabariigi. Ettekandeid esitasid Piia Post (Eluloolisi fakte dotsent Herman Mürgist), Hanno Ohvril (Mürgi läbipaistvusvalemi saamisloost) jt. Orgkomitee: Piia Post, Jaak Jaagus, Hanno Ohvril.
- 1.–4. okt korraldas TO kosmoloogia osakond Waide motellis Tartumaal Tartu–Tuorla iga-aastase ühisseminari. Umbes 40 osalejat Turu Ülikooli Tuorla Observatooriumist, Oulu Ülikoolist, Potsdami Ülikoolist, Valencia Ülikoolist, KBFist, Tartu Ülikoolist ja Tartu Observatooriumist kuulasid 25 ettekannet.
- 9.–10. okt toimus TTÜs tuumaenergeetika-alane konverents. Esinejaid oli Soomest, USAst, Rootsist, Jaapanist ja mujalt.
- 9.–11. okt toimus TÜ matemaatikainstituudis 4. Baltimaade-Põhjamaade seminar algebrast, geomeetriast ja matemaatilisest füüsikast (Baltic-Nordic Workshop “Algebra, Geometry and Mathematical Physics”). Teemade hulgas olid ka supersümmeetrilised väljateooriad, stringiteooriad ja relatiivsusteooria. Osavõtjaid oli 48, kes esindasid 17 riiki. Kuulati ära 38 ettekannet, neist 9 TÜ, TTÜ, TÜ FI, TO ja EMÜ teadlastelt. Korralduskomiteed juhtis dots Viktor Abramov (TÜ).
- 31. okt–2. nov toimus Käärikul järjekordne EFS täppisteaduste sügiskool, milles osales rohkem kui 60 tudengit, teadlast ja õppejõudu. Toimus 9 ettekannet, teemadeks olid kvantkrüptograafia, tuumaenergia, kosmoloogia, valgustahkised jm. Korraldustoimkonnas olid Heli Kuuseorg, Aigar Vaigu, Kaido Reivelt ja Ahto Kuusk. Üritust toetasid TTÜ, TÜ, KBFi ja TTÜ Üliõpilasesindus. Täpsem info www.fyysika.ee/fyysika/nofy/

- 16.–18. nov toimus Tallinnas TTÜ korraldamisel Tallink Spa & Conference hotellis 26. rahvusvaheline konverents Norchip. Norchip on „Nordic Microelectronics event“, milles osaleb igal aastal üle 100 mikroelektronika ja telekommunikatsiooni valdkonna tippteadlase. Konverentsi programm on laia ulatusega, kattes mitmeid tuleviku elektroonika- ja arvutisüsteemide loomisega seotud teemasid. Käsitletakse järgmise põlvkonna mobiilside, lairiba raadioühenduste ning satelliitsidega seotud teemasid (nii tehnoloogiad kui ka arhitektuurid), vt www.norchip.org. Konverentsi raames toimus 18. nov ka Eesti teaduse tippkeskuse CEBE (Integreeritud elektroonikasüsteemide ja biomeditsiinitehnika tippkeskus, cebe.ttu.ee) esimene rahvusvaheline töötuba. Tippkeskus CEBE ühendab TTÜ arvutitehnika ja elektroonika instituutide ning Tehnomeedikumi teadlaste elektroonika, analoog- ja digitaalsidaini, diagnostika ning biomeditsiinitehnika alast interdistsiplinaarset uurimistööd missioonikriitiliste sardsüsteemide valdkonnas. Keskuse koosseisu kuulub ligi 80 teadurit ja doktoranti.
- 2. dets toimus Tähe 4 füüsikahoones TÜ audoktori prof Markku Tapio Kulmala loeng „The role of atmospheric aerosols in climate change“.
- 10. dets toimus Eesti Teaduste Akadeemia üldkogu istung. Üldkogu võttis vastu pöördumise Riigikogu ja Vabariigi Valitsuse poole, rõhutatades loodus- ja täppisteadusliku hariduse tähtsust.

V. TEADUSTÖÖ

- 7. jaan möödus 25 aastat heeliumi veeldamise seadme CTI-Cryogenics 1410 esmasest käivitamisest KBFI. 25 aastat tagasi oli seade tehnoloogia kõrgsaavutus ja esimene säärane Eestis. Ühes väikesete täiendustega on süsteem tänaseni efektiivselt töötav ning ainuke omasugune Eestis. Tähtpäevaks valmis uus heeliumi kompressorite kinnise tsükliga jahutussüsteem, mis võimaldab kokku hoida kompressorite jahutuseks vajaminevat vett. Praegusel hetkel on KBFI heeliumijaam ainus operatiivne veeldatud heeliumi tootmise üksus Eestis. Heeliumijaam varustab veeldatud heeliumiga KBFI seitset ülijuhtmagnetit, arvukaid madalatemperatuurseid eksperimente ning vajadusel teisi laboratooriume Tallinnas ja Tartus.
- 24. veebr anti kätte Eesti Vabariigi teaduspremiad (300 000 kr), need said ka Tartu Ülikooli teadlased

- mereinstituudi kaugseire ja mereoptika osakonna juhataja, vanemteadur Tiit Kutser täppisteaduste alal uurimuste tsükli „Optiline kaugseire veekeskkonna uuringutes“ eest;
- füüsikalise keemia professor Enn Lust tehnikateaduste alal uurimuste tsükli „Tahkeoksiidkütuseelementides ja elektrilise kaksikihi kondensaatorites ning kompaksete ja poorsete elektrodide ning elektrolüütide vahelisel piirpinnal toimuvate protsesside seaduspärasuste kompleksed uuringud“ eest.
- 7.-10. sept ETH Zürichis toimunud nanoosakeste toksilisuse teemalisel konverentsil „Nanotox2008“ valiti KBFI teadlaste K. Kasemetsa, M. Rometi, A. Ivaski ja A. Kahru ettekande „Comparative toxicity of nanosized and bulk form of ZnO and CuO to *Saccharomyces cerevisiae*“ (ZnO ja CuO nano- ja tavasuures osakeste toksilisuse võrdlev uurimine pärmile *S. cerevisiae*) teesid konverentsile esitatute seast viie parema hulka.
- TÜ FI teadlased osalevad Euroopa Liidu projektis STRING, mille eesmärk on välja töötada uut tüüpi tomograaf, mis muudab haiguste diagnostika patsiendisõbralikumaks ning funktsionaalsemaks. Projekti raames viivad füüsikainstituudi teadlased läbi uute valgustkiirgavate materjalide uuringuid. Projekti lõppeesmärk on välja arendada uuetüübilise positronide kiirgusel põhineva tomograafi (nn PET-tomograafi) prototüüp, mis võimaldaks parandada PET kujutise kvaliteeti, vähendada patsiendi eksponeerimist radioaktiivsusele ja suurendada PET-tomograafide kättesaadavust kogu maailmas.
- Tartu Observatooriumis toimusid regulaarselt astrofüüsika (kolmapäeviti kl 15.00) ja atmosfäarifüüsika (reedeti kl 10.00) seminarid.
- TÜ FI Tähe tn hoones jätkasid regulaarset tööd teoreetilise füüsika, keskkonnafüüsika, meditsiinifüüsika ja gaaslahenduse seminarid.
- TÜ FI Riia tn hoones jätkas tööd spektroskoopia ja materjalifüüsika seminar (toimkond: A. Freiberg, V. Hižnjakov, J. Kikas, M. Kirm, A. Luštšik, P. Saari, I. Sildos).
- Tallinna Ülikoolis olid täitmisel
 - NATO SfP teadusgrant (2005–2009): Nanosekundilised kiirgusimpulsid lõhkeainete ja radioaktiivsete elementide kiireks avastamiseks (Nanosecond radiation pulses for rapid detection of explosives and nuclear agents);
 - IAEA teadusgrant (2008–2009): Stohhastilised protsessid tiheda plasmajoa interaktsioonil konstruktsioonimaterjalidega.

TEADUS- JA ARENDUSASUTUSTE SIHTFINANTSEERITAVAID TEADUSTEEMASID 2008. AASTAL

Tartu Ülikool

- SF0182647s04 Stohhastilised protsessid mittetasakaalulistes füüsikalistes süsteemides
Tammelo, Risto 2004–2008, 1 521 000 kr.
- SF0182644Bs04 Biotehnoloogiliste ja makromolekulaarsete süsteemide molekulaardisain
Maran, Uko 2004–2008, 1 440 000 kr.
- SF0182732s06 Ökosüsteemi süsiniku ja veevoogude interaktsioon muutuv keskkonnas
Söber, Anu 2006–2011, 2 700 000 kr.
- SF0182747s06 Madalatemperatuurilise gaaslahendusplasma ja tahkise vastasmõju uurimine
Laan, Matti 2006–2011, 1 620 000 kr.
- SF0182724s06 Keerukate süsteemide modelleerimine stohhastiliste meetoditega
Kollo, Tõnu 2006–2011, 720 000 kr.
- SF0182712s06 Suuremahuliste ja keeruliste arvutusülesannete lahendamise meetodid, arvutuskeskkonnad ja rakendused
Vilo, Jaak 2006–2011, 1 764 000 kr.
- SF0180042s07 Infotehnoloogiliste ja nanoelektroniliste rakendustega tahkiskihstruktuurid
Kukli, Kaupo 2007–2012, 1 395 000 kr.
- Relevantse loodusteadusliku hariduse osa teadmistepõhises ühiskonnas: multidimensionaalse loodusteadusliku kirjaoskuse kujundamise modelleerimine ja rahvusvaheline evalvatsioon
- Rannikmäe, Miia 2008–2012, 378 000 kr.
- SF0180038s08 Numbrilise ilmaennustuse arendamine õhukeskkonna prognooside suunas
Rõõm, Rein 2008–2013, 1 602 000 kr.
- SF0180002s08 Protsessid modifitseeritud piirpindadel ja faasides ning nende rakendused uuetüübilistes energia allikates ning superkondensaatorites
Lust, Enn 2008–2013, 5 130 000 kr.
- SF0180135s08 Protsessid makro- ja mikroheterogeensetes ning nanomõõtmes süsteemides ning vastavad tehnoloogilised rakendused
Tenno, Toomas 2008–2013, 2 115 000 kr.
- SF0180127s08 Maastike aineriingi muutuvates kliima- ja maakasutuse tingimustes ning selle ökotehnoloogiline reguleerimine
Mander, Ülo 2008–2013, 3 600 000 kr.

TÜ Füüsika Instituut

- SF0180013s07 Kondenseeritud aine ja fundamentaalväljade teooria
Hižnjakov, Vladimir 2007–2012, 4 015 800 kr.
- SF0180037s07 Kiiritusnähtused laia keelutsooniga funktsionaalmaterjalides
Luštšik, Aleksandr 2007–2012, 4 140 000 kr.
- SF0180046s07 Pinnanähtused tahkisefüüsikas ja -tehnoloogias
Sammelselg, Väino 2007–2012, 4 590 000 kr.
- SF0180055s07 Bioloogiliselt oluliste molekulide ja molekulaarkomplekside füüsikalised uuringud
Freiberg, Arvi 2007–2012, 2 070 000 kr.

- SF0180058s07 Madaladimensionaalsed struktuurid ja nende rakendused
Kikas, Jaak 2007–2012, 5 715 000 kr.
- SF0180073s07 Uute optika- ja spektroskoopiameetodite arendamine ja rakendamine materjali- ja plasmauuringutes
Saari, Peeter 2007–2012, 2 340 000 kr.
- SF0180043s08 Nanomeeterosakeste tekkimine ja aerosooliosakeste mõõtmespektri kujunemine nõrgalt ioniseeritud atmosfääri keskkonnas
Hörrak, Urmas 2008–2013, 1 440 000 kr.

TÜ Eesti Mereinstituut

- SF0712699s05 Ranna- ja sisevete optika ning kaugseire
Kutser, Tiit 2005–2010, 1 800 000 kr.
- SF0180012s08 Keskkonna väikse- ja suuremastaabilise muutlikkuse interaktiivne mõju Läänemere ökosüsteemi protsessidele
Kotta, Jonne 2008–2013, 2 520 000 kr.
- SF0180104s08 Hüdrodünaamiliste protsesside ja nende mõju uurimine põhjelaestiku-
le kõrgtileda modelleerimise ning eksperimentaal mõõtmiste baasil
Suursaar, Ülo 2008–2013, 1 800 000 kr.

TÜ Tehnoloogiainstituut

- SF0180008s08 Ioonsed elektroaktiivsed polümeersed materjalid, nende juhtimine ja rakendused
Aabloo, Alvo 2008–2013, 1 620 000 kr.

Tallinna Tehnikaülikool

- SF0142628s04 Kütused ja kütuse komponendid, nende termodünaamilis-füüsikalised omadused
Oja, Vahur 2004–2008, 810 000 kr.
- SF0182644As04 Nanotehnoloogiliste süsteemide molekulaardisain
Karelson, Mati 2004–2008, 1 170 000 kr.
- SF0142687s05 Sünteetiliste ja looduslike polümeer materjalide omadused ja väärastamine
Viikna, Anti 2005–2010, 1 350 000 kr.
- SF0142684s05 Toodete ja tootmisprotsesside kiire teostamine — teooria ja metodoloogia
Küttner, Rein 2005–2010, 2 520 000 kr.
- SF0142737s06 Missioonikriitiliste sardsüsteemide elektroonsed komponendid ja alamsüsteemid
Min, Mart 2006–2011, 3 690 000 kr.
- SF0142714s06 Elektrit juhtivate polümeer materjalide omaduste uurimine ja modifitseerimine kasutamiseks funktsionaalsete materjalidena ning elektronseadiste komponentidena
Õpik, Andres 2006–2011, 3 060 000 kr.
- SF0142719s06 Tehnoloogiliste protsesside intensiivistamine aktuaalsete keskkonna-
probleemide lahendamiseks
Munter, Rein 2006–2011, 1 566 000 kr.
- SF0142722s06 Fossiil- ja taastuvkütuste ning orgaaniliste jäätmete termokeemilise
koostöötlemise alused
Luik, Hans 2006–2011, 1 530 000 kr.
- SF0140024s07 Energiaressursside säästlik kasutamine ja protsesside täiustamine
põletusseadmetes
Ots, Arvo 2007–2012, 4 005 000 kr.

FÜÜSIKAKROONIKA

- SF0140072s08 Vedeliku ja konstruktsiooni koostoime mehhaanika
Koppel, Tiit 2008–2013, 1 775 000 kr.
- SF0140041s08 Töökindlate sardsüsteemide disain
Ubar, Raimund 2008–2013, 4 297 500 kr.
- SF0140092s08 Õhukesekiliselised ja nanostruktuursed materjalid keemilistel meetoditel
Krunks, Malle 2008–2013, 1 890 000 kr.
- SF0140099s08 Uued materjalid ja tehnoloogiad tuleviku päikeseenergeetikale
Mellikov, Enn 2008–2013, 4 477 500 kr.
- SF0140090s08 Toidu süsteemibioloogia ja füüsika
Paalme, Toomas 2008–2013, 2 115 000 kr.
- SF0140070s08 Kolmemõõtmelised mudelid aerosoolsete kanal-, gradient- ja keeris-
vooluste modelleerimiseks ning lahendused tehnoloogilistes protsessides
Kartušinski, Aleksander 2008–2013, 2 160 000 kr.
- SF0140062s08 Mitmefaasiliste tribomaterjalide arendamine ja tehnoloogia
Kübarsepp, Jakob 2008–2013, 3 690 000 kr.
- SF0140091s08 Kõvapinded ja pinnatehnika
Kulu, Priit 2008–2013, 2 070 000 kr.
- SF0140113Bs08 Mehhatroonika- ja tootmissüsteemide proaktiivsus ja käitumismudelid
Tamre, Mart 2008–2013, 1 260 000 kr.

TTÜ Küberneetika Instituut

- SF0322709s06 Usaldusväärsed tarkvara- ja inimkeele tehnoloogiad
Uustalu, Tarmo 2006–2011, 2 852 400 kr.
- SF0140018s08 Keerukate mittelineaarsete juhtimissüsteemide süntees
Kotta, Ülle 2008–2013, 2 183 400 kr.
- SF014007s08 Mittelineaarne dünaamika ja kompleksüsteemid
Engelbrecht, Jüri 2008–2013, 5 134 000 kr.
- SF014083s08 Mittelineaarsed, puuduliku informatsiooni ja keeruka struktuuriga mate-
maatilised mudelid
Kangro, Inga 2008–2013, 1 530 000 kr.

TTÜ Meresüsteemide Instituut

- SF0140017s08 Läänemere vee- ja ainevahetusprotsessid muutuvate välismõjude
tingimustes
Elken, Jüri 2008–2013, 2 970 000 kr.

Tallinna Ülikool

- SF0132723s06 Mittelineaarsed stohhastilised protsessid nano- ja ökosüsteemides:
teooria ning rakendused materjaliteadustes ja ökoloogias
Mankin, Romi 2006–2011, 1 229 400 kr.
- SF0180178Bs08 Erinevate interdistsiplinaarsuse dimensioonide mõju loodusteadusli-
ku kirjaoskuse kujundamisel
Reiska, Priit 2008–2012, 648 000 kr.

Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut

- SF0180114Bs08 Integreeritud energeetilise metabolismi regulatsioonimehhanismid
lihasrakkudes
Saks, Valdur 2008–2013, 1 890 000 kr.
- SF0690063s08 Mehhanismid ja interaktsioonid toksikoloogias ja toksinoloogias: in
vitro mudelid
Kahru, Anne 2008–2013, 3 240 000 kr.

Tartu Observaatorium

- SF0060030s08 Evolutsiooni hilisfaasis tähtede ja nende ümbriste vaatluslik ja teoreetiline uurimine
Kipper, Tõnu 2008–2013, 5 040 000 kr.
- SF0060067s08 Tumeenergia, tumeaine ja struktuuride teke Universumis
Saar, Enn 2008–2013, 3 870 000 kr.
- SF0060115s08 Optiliselt keerukate keskkondade kaugseire
Kuusk, Andres 2008–2013, 1 080 000 kr.

**EESTI TEADUSFONDI 2008. AASTAL
ALANUD UURIMISTOETUSI**

Varasematel aastatel alanud ETF uurimistoetuste nimekirjad on eelmistes EFSi aastaraamatutes. Teemad on liigitatud vastavalt ETISE klassifikatsioonile (www.etis.ee). Toodud on grandi teema, grandihoidja ja asutus, grand number ja lõpuaasta.

4. Loodusteadused ja tehnika

4.2 Maateadused

- Ekstreemsete sademete ja põudade esinemine Eesti muutuvates kliimatingimustes: nende kujunemise põhjused, prognoositavus ning avaldused siseveekogude veerežiimis ja eluslooduses (Jaak Jaagus, TÜ) ETF7510 2011
- Kosmosetehnoloogia rakendused geoidi ja gravitatsioonivälja täpsustamiseks Eesti alal (Artu Ellmann, TTÜ) ETF7356 2010
- Läänemere lainetuse tingimuste ajalis-ruumiline muutlikkus muutuvates kliimatingimustes (Tarmo Soomere, TTÜ) ETF7413 2011
- Rannikulähedaste hüdrodünaamiliste protsesside eksperimentaaluuringud: jugahoo- vused Põhja-Eesti rannikumeres ning lainekliima Kelba maasääre lähedal (Ülo Suursaar, TÜ) ETF7609 2011
- Upwellingud Soome lahes ja nendega seotud toitainete transport (Jaan Laanemets, TTÜ) ETF7467 2011
- Ujulainete dünaamika ning lainetakistus nihketuule ja stratifitseeritud atmosfääri tingimustes (Rein Rõõm, TÜ) ETF7478 2011
- Tsüklonid Läänemere piirkonnas, nende seosed atmosfääri üldise tsirkulatsiooni ja Eesti keskkonnanäitajatega (Mait Sepp, TÜ) ETF7526 2011

4.3 Kosmoseuuringud ja astronoomia

- Atmosfäärisamba veeauru ja aerosoolisalduse füüsilise analüüsi meetodite arendamine läänemere piirkonna keskkonnaseisundi uurimiseks (Hanno Ohvril, TÜ) ETF7347 2011
- Füüsilised protsessid, statistilised omadused ja evolutsiooniline areng kuumade allkäübustähtedega kaksiksüsteemides (Vladislav-Veniamin Pustõnski, TO) ETF7691 2010
- Satelliitide tulemitte parandamine kasutamiseks suurte järvede kaugseires (Anu Reinart, TO) EMP1 2010

4.8 Elektrotehnika ja elektroonika

- Kõrgepingeliste IGBT transistoride lülitusomaduste uurimine ETF7425 2010
- Võimsad kõrgsagedusliku vahelüliliga alalispingemuundurid (Tõnu Lehtla, TTÜ) ETF7572 2011

4.10 Füüsika

- Ferroelekter ja ülijuhtivus oksiidides ja nende kiledes ning fotoindutseeritud faasisiirded (Peet Konsin, TÜ) ETF7389 2011
- Footonkristallide aktiveerimine ja nende luminesentsi uurimine (Mihhail Danilkin, TÜ) ETF7590 2011
- Foto- ja termostimuleeritud protsessid stsintillatsioonimaterjalides (Svetlana Zazubovitš, TÜ) ETF7507 2010
- Hapniku atomiseerimine kõrgsagedusplasma (Matti Laan, TÜ) ETF7462 2010
- Haruldaste muldmetallidega aktiveeritud metalloksiidide funktsionaliseerimine rakendusteks fosfoorides ja sensorites (Valter Kiisk, TÜ) ETF7456 2010
- Infrapunase termograafia rakenduste metrooloogiline kindlustatus (Mart Noorma, TÜ) ETF7431 2011
- Mitmekomponendiliste ülijuhtsüsteemide korrastuste ja kineetika iseärasused (Teet Örd, TÜ) ETF7296 2011
- Neutraalsete ja ioniseeritud eksimeeride dünaamika vääriskaasides, nende plasma ja kristallides (Matti Selg, TÜ) ETF7318 2011
- Päikesepaneelide energiareitingu uuringud (Andri Jagomägi, TTÜ) ETF7718 2011
- Raula ja ränioksiidil põhinevate katoodematerjalide modelleerimine liitumioonaku-mulaatorite tarbeks (Anti Liivat, TÜ) ETF7583 2009
- Resonantne pehme röntgenkiirguse Raman-hajumine: elektronstruktuur ning ülikire dünaamika tahkistes ning nanomaterjalides (Tanel Käämbre, TÜ)* ETF7615 2011
- Röntgenhajumine ja röntgenpeegeldus: arendus ja rakendus materjaliuuringutes (Hugo Mändar, TÜ) ETF7603 2011
- Statistilise füüsika kaasasegded meetodid: rakendused difusiooni protsessidele kompleks-süsteemides (Marco Patriarca, KBFI) ETF7466 2011
- Tahkete osakeste sadenemisprotsessi modelleerimine kahefaasilise keskkonna turbulentsel voolamise kanalis (Sergei Tisler, TTÜ) ETF7571 2010
- Termoluminesentsi mehhanismide ja optiliselt stimuleeritud järelhelenduse uurin-gud mõningate luminofooride dosimeetriliste karakteristikute täiustamiseks keskkon-nadosimeerias (Mihkel Kerikmäe, TÜ) ETF7623 2011
- Vertikaalsete kahefaasiliste vooluste turbulents difusiooni ja osakeste pörkumisprots-esside matemaatiline modelleerimine erinevate meetoditega (Aleksander Kartušinski, TTÜ) ETF7620 2010
- Värvilise müra konstruktiivne roll populatsioonide mittelineaarsete mudelite dünaa-mikas (Romi Mankin, TLÜ) ETF7319 2011
- Kõrgviskoossete vedelike mikrojoad (Medhat Hussainov, TÜ) * JD120 2011
- Nanoparticle-metaloxide compounds for optical and sensing applications (Leonid Dolgov, TÜ) JD102 2011
- Physics beyond the Standard Model (Luca Ferretti, KBFI) JD129 2011
- Taimkatte kiirguslevi modelleerimine: liitmismeetodi täiendamine ja kontroll (Abdelaziz Kallel, TO) JD107 2010

* osaliselt erialal 4.12: Protsessitehnoloogia ja materjaliteadus

- Uued odavad materjalid ja tehnoloogiad päikeseenergeetikale (Maxim Ganchev, TTÜ)* JD98 2011
- Üldistatud gravitatsiooniteooriate teoreetilised ja kosmoloogilised aspektid (Margus Saal, TO) JD131 2011

4.12 Protsessitehnoloogia ja materjaliteadus

- CdTe kile rekrustallisatsioon tahkes faasis ja legeerivate elementide mõju kile omadustele (Valdek Mikli, TTÜ) ETF7608 2011
- Anorgaanilistel fotoabsorberitel ja orgaanilistel funktsionaalsetel kiledel põhinevad päikeseelemendid (Sergei Bereznev, TTÜ) ETF7595 2010
- CuInSe₂ legeerimine võõrlisanditega ja alternatiivsed puhverkihid rakendamiseks monoterakihi päikeseptareides (Marit Kauk, TTÜ) ETF7678 2011
- Nano - ja mikroskoopilised oksiidsed fiiberstruktuurid (Tanel Tätte, TÜ) ETF7612 2011
- Termobituumeni moodustumine ja väärastamine vedelkütuseks (Ille Johannes, TTÜ) ETF7292 2011
- Uus komposiitplastjätmete taaskasutustehnoloogia (Jaan Kers, TTÜ) ETF7705 2010

4.13 Mehhanotehnika, automaatika, tööstustehnoloogia

- Elastsete ja mitteelastsete koorikute optimeerimine (Jaan Lellep, TÜ) ETF7461 2011
- Mehhatroonikasüsteemid modelleerimise metoodika arendus ja integratsioon (Raivo Sell, TTÜ) ETF7542 2009
- Pinna geomeetriat iseloomustavate suuruste mõõtemetodid, mõõtekompleksi arendus ja mõõtmiste jälgitavus (Rein Laaneots, TTÜ) ETF7475 2010

- 19. dets toimunud Eesti Teadusfondi nõukogu koosolekul otsustati 2009. aastal algavate ja jätkuvate projektide rahastamine. Reaalteaduste ja tehnika ekspertkomisjonile laekus kokku 101 taotlust 25 miljonile kroonile, granditaotlusi oli võimalik rahastada 32 kogusummas 6,52 miljonit krooni, lävehindeks kujunes 4,25.
- Euroopa Teadusfond on algatanud EUROCORES-i programmi „Maximizing the Impact of Graphene Research in Science and Innovation“ (EuroGRAPHENE), mille käigus soovitakse saavutada senisest parem arusaam grafeeni füüsikalistest omadustest. Euro GRAPHENE-i projektid võivad kesta 3–4 aastat ning neid finantseerivad rahvuslikud teadust rahastavad organisatsioonid. Programmi administreerib Euroopa Teadusfond. Eesti Teadusfond on kinnitanud, et rahastatakse ühte edukat Eesti osaprojekti kuni 1 miljoni krooniga aastas.

* osaliselt erialal 4.12: Protsessitehnoloogia ja materjaliteadus

- Algas Tartu Observatooriumi ja Tartu Ülikooli ühisprojekt „Eesti kosmoseuuringute ja -tehnoloogia võimekuse avamine partnerluse kaudu tipptasemel Euroopa teadusasutustega – EstSpace“, mille rahastajaks on Euroopa Liidu 7. raamprogramm. Projekti juhib TO vanemteadur A. Reinart. Lisainfo www.estspace.ee
- Tartu Observatoorium osales partnerina EL 6. raamlepingu projektis „Hüperspektraalne kaugseire Euroopas – spetsiaalsed toetusmeetmed (HYRESSA)“, mille TO koordinaator on vanemteadur M. Mõttus.
- Jätkus koostööprojekt „Metsade kaugseire füüsikalised alused (PHYSENSE)“, SamNordisk Skogsforskning, mida juhib TO vanemteadur T. Nilson.

VI. RAAMATUD JA KOGUMIKUD

- Aleksei Gavrilov. Üldfüüsika kursused I: klassikalise mehhaanika alused; molekulaarfüüsika ja termodünaamika alused (vene keeles). Informaatika ja Arvutustehnika Instituut, Tallinn, 2008.
- Henn Voolaid. Füüsika XI klassile: Optika. 3. parandatud ja täiendatud trükk. Koolibri, 2008, 112 lk.
- Mikhail Brik, Ilmo Sildos, Valter Kiisk. Introduction to spectroscopy of atoms, molecules and crystals. Tartu Ülikooli Kirjastus, 2008, 234 lk.
- Kaugseire Eestis: artiklikogumik. Toimetajad K. Väljataga, K. Kaukver. Tartu Observatoorium, Keskkonnaministeeriumi Info- ja tehnokeskus, Tallinn, 2008, 205 lk.

VII. IN MEMORIAM

- **Endel Aruja** 5. VII 1911 – 4. II 2008

4. veebruaril lahkus meie seast füüsikateadlane, ühiskonnategelane ja Eesti raamatukogude toetaja Endel Aruja.

Endel Aruja sündis 5. juulil 1911 Valgamaal Kuigatsi vallas. 1930. aastal asus ta õppima füüsikat Tartu Ülikoolis. Tema teaduslikuks juhendajaks sai teoreetilise ja tehnilise füüsika professor Harald Perltz, kelle juures töötades jõudis Endel Aruja 1938. aastal magistritöö „Au-Na sulandite, eriti ühendi Au_2Na ja naatriumi röntgenograafilisi mõõtmisi“ kaitsmiseni.

1939. aastal sai Endel Aruja Briti Nõukogu stipendiumi akadeemilise tee jätkamiseks Cambridge'i ülikoolis kristallograafia alal. Eesti okupeerimine takistas naasmist ning Briti Nõukogu otsustas stipendiumi pikendada. 1941. aastal asus Aruja tööle füüsika assistendi kohale King's College'is Newcastle-on-Tyne'is. Töö kõrvalt jätkas ta õpinguid ning kaitses 1943 Cambridge'i ülikoolis doktoriväitekirja „An X-ray study of silicates – crysotile, antigorite and gumbelite“. 1962 siirdus ta Kanadasse, kus töötas Ontario Research Foundation'is ning seejärel pidas kuni pensionini professoriametit Toronto Ryersoni Polütehnilises Instituudis. Olles erialalt küll eksperimentaalfüüsik, oli tema tegevus paljuski seotud aparaadiehituse ja tööstusprobleemidega.

Endel Aruja oli ühiskondlikult aktiivne. Tartu Ülikoolis õppides asus ta korp! Rotalia liikmeks. Hiljem oli ta kuus aastat Londoni Eesti Seltsi esimees ning 1984 Torontos toimunud ESTO korralduskomitee abiesimees.

Endel Aruja panustas Eesti ühiskonda olles kuni 2004. aastani Torontos asuva Tartu Instituudi sekretär. Ta oli liikumapanevaks jõuks instituudi arhiivi ja raamatukogu loomisel, mis 1997. aastast kannab Endel Aruja nime. Alates 1986. aastast hakkas Endel Aruja korraldama raamatute annetamist ja saatmist Eesti raamatukogudele. Aastast 1989 muutus raamatute saatmine juba suuremahuliseks ning kokku organiseeris ta üle 7000 kasti raamatute saatmise.

Endel Aruja ühiskondlik tegevus leidis igakülgset tunnustust. 1990 valiti ta Tartu Ülikooli auliikmeks, 1998 annetas vabariigi president talle Valgetähe V klassi ordeni, 2002 omistati talle Tartu Ülikooli raamatukogu teenetemärk ning 2003 sai ta korp! Rotalia auvärvipaela kavaleriks.

Endel Aruja elulugu on lühidalt tutvustanud Piret Kuusk ja Indrek Martinson artiklis „Eesti füüsikud võõrsil I“ (EFS aastaraamat 1996, lk 7–9).

• **Izold Pustõlnik** 17. III 1938 – 2. V 2008

2. mail 2008. a tabas astronoomilist üldsust raske kaotus – ravimatu haigus viis meie hulgast Tartu Observatooriumi vanemteaduri Izold Pustõlniku. Izold Pustõlnik sündis 17. märtsil 1938. a Odessas teenistuja perekonnas. Pärast keskkooli lõpetamist hõbemedaliga 1955. aastal astus ta Odessa Ülikooli füüsika-matemaatika teaduskonda, mille lõpetas 1960. aastal astrofüüsika erialal. Õpingud jätkusid 1962. a Eestis aspirandina ENSV TA Astrofüüsika ja Atmosfäärifüüsika Instituudi juures uues Tõravere observatooriumis, mis jäigi Izoldi töökohaks eluks ajaks. Pärast aspirantuuri lõpetamist kaitses Izold Pustõlnik 1968. aastal füüsika-matemaatikakandidaadi kraadi ja lisaks sellele 1994. aastal Peterburis veel doktorikraadi.

Izold Pustõlniku peamiseks uurimisobjektiks olid lähiskaksiktähed, nende komponentide kiirguslik ja gravitatsiooniline vastastikmõju ja evolutsioon. Ta defineeris isegi uue tähtede klassi – gaasvarjutusmuutlikud lähiskaksiktähed. Need on sellised lähiskaksikud, mis tiirlevad teineteise ümber ühises gaasikestas. Viimastel eluaastatel pühendas Izold eriti palju tähelepanu kataklüsmieelsete kaksiksüsteemide evolutsiooni uurimisele. Kuigi oma põhitöös oli Izold teoreetik, tegeles ta nooremana väga tõsiselt ka kaksiktähtede heleduskõverate vaatlustega ning saadud tulemuste töötlemise ja tõlgendamisega. Koos Tallinna tähetorni astronoomidega avaldas ta seal aastakümnete jooksul tehtud fotoelektriliste vaatluste andmed, andes omapoolse panuse saadud vaatlusandmete füüsilise tähenduse selgitamisse.

Izold Pustõlnik tundis sügavat huvi ka astronoomia ajaloo vastu. Olulisimaks panuseks sellel alal võib pidada koos moskvalase Vitali Bronšteniga kirjutatud monograafiat Eesti ühest kuulsaimast astronoomist Ernst Julius Öpikust. Izold tegeles aktiivselt ka arheoastronoomiaga. 2002. aastal oli ta SEACi (*European Society for Astronomy in Culture*) Tartus toimunud rahvusvahelise konverentsi üks peakorraldajatest ja põhiettekandjatest. Paljud Tartu Observatooriumi külastajad mäletavad Izoldi kui suurepärasest ekskursioonijuhti, kes oskas haaravalt rääkida nii tänapäeva astronoomiast kui ka selle ajaloost.

Aktiivse inimese ja hea suhtlejana, kes valdas paljusid Euroopa

keeli, tegi Izold Pustõlnik koostööd mitmete maade astronoomidega. Ta kuulus ka mitme rahvusvahelise organisatsiooni juhatusse, näiteks Euraasia Astronoomia Seltsi juhatuse liige oli ta peaaegu selle asutamisest alates. Izold Pustõlnik oli ka üleeuroopalise organisatsiooni „Euroscience“ Eesti regionaalsektsiooni üks asutajatest.

• **Andrus Ausmees** 16. X 1960 – 26. XII 2008

Teisel jõulupühal lahkus ootamatult manalateele üks andekamaid ja edukamaid keskmise põlvkonna Eesti füüsikuid Andrus Ausmees.

Andrus Ausmees kasvas ja õppis Saaremaal, kus lõpetas aastal 1979 Kuressaare Keskkooli. Aastal 1984 omandas ta tahkisefüüsiku diplomi Tartu Ülikoolist ja asus seejärel tööle tolleaegsesse Eesti Teaduste Akadeemia Füüsika Instituuti. Tema esimeseks teadustöö teemaks oli elektronemissiooni ergastusspektrite uurimine ja elektron-foonon-relaksatsiooni arvutimodelleerimine. Nende uuringute tulemusena selgus, et kõrgeenergeetiliste sekundaarelektronide termaliseerumisel tahkistes omab domineerivat rolli hajumine akustilistel foononitel. Eespoolnimetatut oli ka põhitulemuseks tema 1991 aastal kaitsitud taasiseseisvunud Eesti Vabariigi esimeses füüsikaalases doktoritöös „XUV induced electron emission and electron-phonon interaction in alkali halides“ („Röntgenelektronemissioon ja elektron-foonon-vas-tastikmõju leelishalogeniidkristallides“).

Aastal 1989 osales ta esimeses Eesti füüsikute eksperimendiseerias Lundi Ülikooli sünkrotronkiirguse laboris MAX-lab, millest on praeguseks välja kasvanud tihe koostöö Lundi ja Tartu füüsikute vahel. Sünkrotronkiirguse aktiivset kasutamist MAX-laboris jätkas ta ka pärast tööle asumist Uppsala Ülikooli 1992 aastal. See oli tema jaoks väga viljakas aeg, sest MAX-laboris oli just valminud uus rivimagnetseadmel põhinev kiirekanal, mis koos uute Uppsalas valmistatud elektronspektromeetritega moodustasid neil aastail maailma parima gaaside ja molekulide elektronspektroskoopia eksperimendiseadme. Temale omase põhjalikkuse ja korrektsusega osales ta eksperimendiseadmete häälestamisel, eksperimentide kavandamisel ja läbiviimisel, eksperimenditulemuste analüüsil ning artiklite kirjutamises, andes sel viisil märkimisväärse panuse röntgenkiirguse resonantse mitteelastse mittekiirgusliku (Auger' Ramani) hajumise uuringutesse. Nende tööde tähtsust näitab seegi, et sel perioodil ilmus teiste hulgas viis artiklit ajakirjas Physical Review Letters. Huvitavamad

tulemused sellest perioodist on kindlasti Auger' spektrites sisekihi loomulikust laiusest väiksemate spektrijoonte laiuste esmakordne leidmine pehme röntgenkiirguse piirkonnas ning võnkestruktuurile omaste spektrijoonte intensiivsuste tugeva varieerumise leidmine resonantsergastuste lähedastel ergastusenergiatel (tuntud kui võnkestruktuuri kollaps).

ISI Web of Science andmetel on Andrus Ausmees 60 teadusartikli autor, mis ilmunud aastatel 1986–2001. Neid artikleid on tsiteeritud 1481 korda (seisuga 2. veebr 2008) ning tema h-indeks on 23. Need numbrid, mis teevad au igale teadlasele, oleksid kindlasti olnud märksa suuremad, kui terviseprobleemid ei oleks sundinud teda liiga vara teadustööst loobuma.

Kolleegide mälestusse jääb Andrus Ausmees andeka ning äärmiselt korrektse ja põhjaliku füüsikuna, kes saarlasliku visadusega leidis lahenduse kõigile teadustöös ette tulnud probleemidele.

VIII. FÜÜSIKAHARIDUSLIK TEGEVUS

- 3. veebr eetrisse läinud Kuku Raadio teadussaade „Kukkuv Õun“ oli pühendatud KBFI tööde ja tegemiste tutvustamisele. Studios käisid kõnelemas KBFI direktor Raivo Stern ja instituudi vanemteadur Jüri Järvet. 8. juunil ja 16. nov esines samas saatesarjas TÕ FI prof Peeter Saari.
- 6. veebr avati Tartu Lastekunstikooli õuel (Tartus Kastani ja Tiigi tänava nurgal) valguskulptuur, mille ehitamisel olid abiks TÕ füüsikud.
- 22. veebr andis Tiigrihüppe Sihtasutus füüsikaportaalile fyysika.ee Tiigri Tegija 2008 tiitli.
- 26. veebr esines TÕ füüsikahoones Tähe 4 loengusaalis ettekandega Eesti Vabariigi kaitseminister akadeemik Jaak Aaviksoo. Teemaks olid Eesti kaitsepoliitika, riigikaitse teadus- ja arendustegevuse strateegia ja kübersõda.
- Veebruaris sõlmis Tartu Ülikool koostöölepe 8 üldhariduskooliga. Lepingu järgi soovib ülikool tõsta gümnaasiumihariduse taset, kaasates üldhariduskoolide õppetöösse oma õppejõude, üliõpilasi ja tehnilist baasi, populariseerida teadust, akadeemilist kõrgharidust ning teadlase ja õpetaja elukutset Eesti ühiskonnas. Ka pööratakse lepingus suurt tähelepanu loodus- ja reaalainete, eriti matemaatika ja tehnoloogiliste distsipliinide õppimise ja õpetamise populariseerimisele.

- 8. märtsil esinesid ETV saates „Bionina“ TÜ FI vanemteadurid Ants Lõhmus ja Ilmar Kink.
- 8.–9. märtsil toimus Tartu Ülikoolis Eesti koolinoorte 55. füüsikaolümpiaadi lõppvoor. Füüsikaolümpiaadi lõppvooru žürii otsus:
 - I Autasustada 1. järgu diplomiga
 - * Gümnaasiumi arvestuses: Andres Laan (Tallinna Reaalkool, 12. klass), Heiki Niglas (Tallinna 37. Keskkool, 12. klass), Taavi Pungas (Tallinna Reaalkool, 11. klass).
 - * Põhikooli arvestuses: Janno Jõulu (Tallinna Reaalkool, 9. klass), Eero Vaher (Pärnu Vanalinna Põhikool, 9. klass), Helen Liis (Tallinna Reaalkool, 9. klass), Ragnar Kriiska (Jõgeva Ühisgümn, 9. klass).
 - II Autasustada 2. järgu diplomiga
 - * Gümnaasiumi arvestuses: Stanislav Zavjalov (Narva Humanitaargümn, 11. klass), Uku Hämarik (Miina Härma Güm, 12. klass), Andrei Klevtsov (Tallinna Kesklinna Vene Güm, 12. klass), Ardi Loot (Hugo Treffneri Güm, 11. klass), Heino Soo (Hugo Treffneri Güm, 11. klass).
 - * Põhikooli arvestuses: Henri Rästas (Tallinna Reaalkool, 8. klass), Kaarel Tõnisson (Miina Härma Güm, 9. klass), Hans-Kristjan Kask (Miina Härma Güm, 9. klass), Kadi Liis Saar (Tallinna Inglise Kolledž, 9. klass), Kert Pütsepp (Tallinna Reaalkool, 9. klass), Siim Liiser (Tallinna Reaalkool, 9. klass), Sander Siim (Vanalinna Hariduskolleegeium, 9. klass).
 - III Autasustada 3. järgu diplomiga
 - * Gümnaasiumi arvestuses: Andreas Valdmann (Hugo Treffneri Güm, 12. klass), Fjodor Gainullin (Tallinna Tõnismäe Reaalkool, 12. klass), Siim Lepik (Tallinna Reaalkool, 12. klass), Josep Pata (Miina Härma Güm, 12. klass), Tanel Teinemaa (Tallinna Reaalkool, 12. klass), Kristjan Pöder (Pärnu Koidula Güm, 12. klass), Andrei Porõvajev (Paide Ühisgümn, 12. klass).
 - * Põhikooli arvestuses: Kaur Aare Saar (Tallinna Inglise Kolledž, 7. klass), Ants Remm (Miina Härma Güm, 9. klass), Tanel Kiis (C. R. Jakobsoni nim Güm, 8. klass), Kristjan Eimre (Tartu Kivlinna Güm, 9. klass).
 - IV Autasustada järguta diplomiga
 - * Gümnaasiumi arvestuses: Kaarel Siim (Hugo Treffneri Güm, 11. klass), Karen Atabekjan (Tallinna Tõnismäe Reaalkool,

12. klass), Jüri Aedla (Nõo Realgümn, 12. klass), Rait Ool (Saaremaa Ühisgüm, 12. klass), Siim-Ilmar Nopri (C. R. Jakobsoni nim Güm, 11. klass), Viktor Karabut (Ahtme Güm, 11. klass), Roland Matt (Hugo Treffneri Güm, 10. klass), Tiina Turban (Nõo Realgümn, 11. klass), Ly Orgo (C. R. Jakobsoni nim Güm, 12. klass), Olga Bulgakova (Narva Pähklimäe Güm, 12. klass), Andres Kaldvee (Pärnu Koidula Güm, 11. klass), Rauno Padari (Hugo Treffneri Güm, 10. klass), Ardo Kaurit (Gustav Adolfi Güm, 10. klass).
- * Põhikooli arvestuses: Andres Mihkelson (Koeru Keskkool, 9. klass), Erik Tamre 8 Tallinna Reaalkool, 8. klass), Ivo Adermann (Tallinna Reaalkool, 8. klass), Deiwin Sarjas (Tääksi Põhikool, 8. klass), Kaur Karus (Miina Härma Güm, 8. klass), Uku-Laur Tali (Tartu Kommertsgüm, 9. klass), Artjom Tšasovskihh (Narva Humanitaargüm, 9. klass), Dimitri Lanevski (Tartu Vene Lütseum, 9. klass).
 - V Eriauhinnad toetajatelt
 - * Füüsika Instituudi eriauhind – Andres Laan (Tallinna Reaalkool, 12. klass),
 - * Eesti Füüsika Seltsi eriauhind – Taavi Pungas (Tallinna Reaalkool, 11. klass),
 - * Hansapanga eriauhinnad – Heiki Niglas (Tallinna 37. Keskkool, 12. klass), Taavi Pungas (Tallinna Reaalkool, 11. klass), Helen Liis (Tallinna Reaalkool, 9. klass), Eero Vaher (Pärnu Vanalinna Põhikool, 9. klass), Ragnar Kriiska (Jõgeva Ühisgüm, 9. klass),
 - * Avita eriauhind – Roland Matt (Hugo Treffneri Güm, 10. klass), Janno Jõulu (Tallinna Reaalkool, 9. klass), Henri Rästas (Tallinna Reaalkool, 8. klass),
 - * MTÜ Loodusajakiri eriauhinnad – Tiina Turban (Nõo Realgüm, 11. klass), Helen Liis (Tallinna Reaalkool, 9. klass)
 - * Tarkade Klubi eriauhind – Kaur Aare Saar (Tallinna Inglise Kolledž, 7. klass).
 - VI Žürii avaldab tänu õpilaste hea ettevalmistamise eest õpetajatele Mart Kuurme (Tallinna Reaalkool), Kusta Rumma (Tallinna 37. Keskkool), Gennadi Medkov (Narva Humanitaargüm), Maire Piirimäe (Miina Härma Güm), Märt Kask (Hugo Treffneri Güm), Madis Reemann (Hugo Treffneri Güm), Tatjana Belousova (Tallinna Tõnismäe Reaalkool), Toomas Reimann (Tallinna Reaalkool),

Peet-Märt Irdt (Nõo Realgümn), Arvo Rüütel (Paide Gümn), Elmu Mägi (Pärnu Koidula Gümn), Endel Nöörleid (Pärnu Vanalinna Põhikool), Heli Toit (Jõgeva Ühisgümn), Helle-Kaja Möls (Miina Härma Gümn), Guido Vegman (Tallinna Inglise Kolledž), Daniel Kaasik (Vanalinna Hariduskolleegium), Erkki Tempel (Miina Härma Gümn), Eero Jävekül (C. R. Jakobsoni Gümn), Piret Pohla-Asikainen (Tartu Kivilinna Gümn).

- VII Vastavalt olümpiaadi statuudile arvata Eesti võistkonna liikmeks rahvusvahelisel füüsikaolümpiaadil Andres Laan (Tallinna Reaalkool, 12. klass).
- VIII Nimetada rahvusvahelise füüsikaolümpiaadi Eesti võistkonna kandidaatideks: Heiki Niglas (Tallinna 37. Keskkool, 12. klass), Taavi Pungas (Tallinna Reaalkool, 11. klass), Stanislav Zavjalov (Narva Humanitaargümn, 11. klass), Uku Hämarik (Miina Härma Gümn, 12. klass), Andrei Klevtsov (Tallinna Kesklinna Vene Gümn, 12. klass), Ardi Loot (Hugo Treffneri Gümn, 11. klass), Heino Soo (Hugo Treffneri Gümn, 11. klass), Andreas Valdmann (Hugo Treffneri Gümn, 12. klass), Fjodor Gainullin (Tallinna Tõnismäe Reaalkool, 12. klass), Siim Lepik (Tallinna Reaalkool, 12. klass), Josep Pata (Miina Härma Gümn, 12. klass), Tanel Teinemaa (Tallinna Reaalkool, 12. klass), Kristjan Pöder (Pärnu Koidula Gümn, 12. klass), Andrei Porõvavej (Paide Ühisgümn, 12. klass), Kaarel Siim (Hugo Treffneri Gümn, 11. klass), Karen Atabekjan (Tallinna Tõnismäe Reaalkool, 12. klass), Viktor Karabut (Ahtme Gümn, 11. klass), Siim-Ilmar Nopri (C. R. Jakobsoni nim. Gümn, 11. klass), Roland Matt (Hugo Treffneri Gümn, 10. klass), Tiina Turban (Nõo Realgümn, 11. klass).

Jaak Kikas, füüsikaolümpiaadi žürii esimees
Aigar Vaigu, füüsikaolümpiaadi komisjoni esimees
Tartus, 9. märtsil 2008. a.

- 17. märtsil toimus TÜ füüsikahoones (Tähe 4) seitsmes akadeemiline füüsikaolümpiaad. Lahendati teoreetilist laadi ülesandeid ülikooli üldfüüsika programmi teemadel. Võitjaks tuli eelmisel aastal teise koha saavutanud füüsikatudeng Siim Ainsaar. Teise koha sai Mihkel Heidelberg ja kolmanda Endel Soolo. Vt. http://www.fyysika.ee/fyysika/akad_oly/

- Koolivaheajal 17.–20. märtsil korraldasid AHHA-keskus ja Tartu Tähetorni astronoomiaring Tartu Tähetornis kõigile huvilistele vaatlusi, planetaariumietendusi ja populaarteaduslikke loenguid. Vaadeldi Tähetorni teleskoobiga Zeiss ja uue AHHA-keskuse teleskoobiga Meade nii Kuud, Saturni kui ka Marssi.
- 8.–12. apr toimus Tartus TÜ Tehnoloogiainstituudi saalis Nooruse 1 teadusteatri üle-euroopaline konverents ShowPhysics 2008. Konverentsi programmis vaheldusid loengud ja seminarid Euroopa parimate teadusteatri etendustega. Korraldasid Eesti Füüsika Selts ja EuroPhysicsFun. Vt www.fyysika.ee/EPFconference/
- 15. apr avaldati energeetika valdkonna ettevõtete ja spetsialistide liitude pöördumine haridus- ja teadusminister Tõnis Lukase poole. Pöördumine on ajendatud allakirjutanute murest loodus- ja reaalinete õpetamise taseme pärast Eesti üldhariduskoolides. Pöördumise tekst asub aadressil www.fyysika.ee/doc/elektriliidud_reaalhariduse_toetuseks.pdf
- 29. apr toimus Tallinnas Nordic Hotel Forumi konverentsikeskuses konverents „Teadus – tumm või tummine“. Konverentsi raames anti välja 2008. aasta Eesti teaduse populariseerimise auhinnad (vt www.archimedes.ee/teadpop). Konkursil osales 32 teadlast ja kollektiivi. Konkursi auhinnafond oli 320 000 krooni. Anti välja kolm I auhinda (á 40 000 krooni), viis II auhinda (á 26 000 krooni) ja seitse III auhinda (á 10 000 krooni), mille hulgas oli ka füüsikaga seotuid:
 - I auhinna pälvisid:
 - * ilmateadlane Ain Kallis, kes on aastate jooksul ajakirjanduse vahendusel tutvustanud nii ilmateadust, geograafiat, astronoomiat kui ka teisi valdkondi;
 - * astronoomide MTÜ Stellaarium ja selle juht Mare Ruusalepp, kes korraldab Tõraveres huvilistele ekskursioone;
 - II auhind anti SA-le Tallinna Tehnika- ja Teaduskeskus ehk Energiakeskus;
 - III auhinna said pikaajaline teaduse populariseerija Heldur Sander, füüsika populariseerija ja Horisoni hea autor Andi Hektor (vt nt Suur jaht Higgsi bosonile, Maailma suurim teadusaparaat jm), Tähe Perepäevade TäPe korraldaja Eesti Füüsika Selts, Rakvere Reaalgümnaasiumi Loodusteaduste huviklubi töö edendajad Kadri-Ly Trahv ja Tiina Sirelpuu ning teadus- ja tehnoloogiaauudiste portaal Novaator.

Lisaks andis žürii välja kaks aukirja, need läksid ajakirjadele Akadeemiake ning Tarkade Klubi.

- 12.–17. mail osalesid kaks Tartu Ülikooli Teaduskooli võistkonda VI rahvusvahelisel loodusteaduste olümpiaadil (EUSO) Küprosel Nicosias. Võistkond koosseisus Taavi Pungas (Tallinna Reaalkool), Katrin Kalind (Hugo Treffneri Gümnn) ja Stanislav Zavjalov (Narva Humanitaargümnn) pälvis 19 riigi võistkondade seas kuldmedali ja kristalse rändkarika. Hõbemedaliga lõpetas olümpiaadi teine Eesti võistkond koosseisus Roland Matt (Hugo Treffneri Gümnn), Harri Parker (Nõo Reaalgümnn) ja Uku Laur Tali (Tartu Kommertsgümnn). Võistkondi saatsid juhendajad Karin Hellat, Timo Kikas ja Illar Leuhin TÜ Keemia Instituudist. Võistlejate ettevalmistamist koordineeris TÜ Teaduskool ning osalemise võistlusel rahastas Haridus- ja Teadusministeerium.
- 22.–23. mail korraldasid Eesti Kirjandusmuuseumi folkloristika osakond, Tartu Tähetorni astronoomiaring ja Eesti Folkloori Instituut Tartu Tähetornis rahvusvahelise interdistsiplinaarse konverentsi „Eesti taevast II. Aeg ja ruum“, kus käsitleti rahvaastronoomia erinevaid valdkondi.
- 26. mail toimus „Tartu astronoomilise nurgakivi päev“ tähistamiseks 200 aasta möödumist Tartu Tähetorni nurgakivi panekust, Tartu Observatooriumi peahoone mahamärkimise 50. sünnipäeva ning AHHA keskkuse uue hoone ehitusplatsi avamist. Tõraveres peahoone ees avati uus päikesekell, Tähetornis toimus lühikonverents ning soovijad said võistelda planeedirajal – Tartu linnas olid maha märgitud päikesesüsteemi planeedid mõõtkavas üks miljardile (ehk üks meeter = miljon kilomeetrit). Päike asus tähetorni ees, Merkuur ja Veenus – Pirogovi pargis, Maa Raekoja taga, Mars Raekoja platsil, Jupiter Oeconomicumi juures, Saturn Peetri kiriku lähisel, Uraan Narva mnt kergliiklusteel Raadi mõisa väravas ning Neptuun Narva mnt kergliiklusteel.
- 30. mail istungil kinnitas TÜ nõukogu vastuvõtueeskirja muudatuse, mis võimaldab kõikidel gümnaasiumi kuld- või hõbemedaliga lõpetanutel astuda ülikooli loodus- ja reaalainete ning õpetajakoolituse õppekavadele ilma sisseastumiseksamiteta. Soodustus kehtib medalistidele matemaatika, füüsika, keemia, haridusteaduse (reaalained) ja haridusteaduse (loodusteaduslikud ained) õppekavadele sisseastumisel.
- 13. juunil algusega kell 10.00 toimus füüsika riigieksam gümnaasiumilõpetajatele. Füüsikaeksami olid valinud 712 õppurit, keskmine saadud punktide arv oli 63.

- 25.–27. juunil toimus Türi sealse kolledži baasil järjekordne füüsikaõpetajate suvekool, mille organiseeris EFS füüsikaõpetajate osakonna juhatus. Suvetool toimus TÜ Avatud Ülikooli egiidi all, osales 25 õpetajat. Loengukava vt käesoleva raamatu Seltsi rubriigis.
- 20.–28. juulini Vietnamis Hanois toimunud 39. rahvusvaheliselt füüsikaolümpiaadilt tulid Tartu Ülikooli Teaduskooli õpilased ühe hõbe- ja kahe pronksmedaliga, mis oli Põhjamaade ja Balti riikide arvestuses parim tulemus. Hõbemedali pälvis Andres Laan Tallinna Reaalkoolist. Pronksmedali väärilisteks tunnistati Uku Hämarik Tartu Miina Härma Gümnaasiumist ning Stanislav Zavjalov Narva Humanitaargümnaasiumist. Eesti võistkonda kuulusid veel Heiki Niglas (Tallinna 37. Keskkool) ja Andreas Valdmann (Tartu Hugo Treffneri Gümnaasium). Juhendajatena olid kaasas TTÜ vanemteadur Jaan Kalda ja TÜ professor Jaak Kikas.
- 1. aug korraldati Tartu Tähetornis huvilistele päikesevarjutuse vaatlused. Eestis oli päikesevarjutus nähtav osalisena.
- 9.–13. aug toimus Väike-Maarjas astronoomiahuviliste XIII üle-eesiline kokkutulek, osalejaid oli ligi 70. Kuna 2008 oli Rahvusvaheline Maa aasta, siis oli kokkutuleku juhtteemaks planeet Maa. Räägiti maa-mõõtmistest (kavas oli ka praktiline õppus Struve kaarel), Maa tekkest ja kujunemisest, tehnoloogilise tsivilisatsiooni mõjust Maa arengule. Toimusid ka tavapärased astronoomilised ettekanded ja taevavaatlused. Kokkutulekuga koos toimus koolinoorte rahvusvahelise astronoomiaolümpiaadi treeninglaager. Vt www.obs.ee/kokkutulekud
- 26. aug alates hakkasid esmaspäeviti ETV hommikusaates Terevisioon Tartu Ülikooli keemia- ja füüsikatudengid teadusuudiseid esitama ja kommenteerima ning eksperimente näitama.
- 26. sept korraldas Teaduskeskus AHHA koos ERR ja Teaduste Akadeemiaga järjekordse Teadlaste Öö. Tegemist oli üleeuroopalise projekti *Researchers' Night 2008* alamprojektiga, mida rahastab Euroopa Komisjon. Ühe öö(päeva) jooksul toimus palju erinevaid teadust ja teadlasi ühiskonnale tutvustavaid ja lähendavaid üritusi. Teadlaste öö raames esines TÜ Teadusbussi meeskond Tallinnas Von Krahli teatris valgusetendusega. TTÜs toimusid tutvustused ja ringkäigud, Energia-keskuses lahtiste uste päev. Tartus pidas prof Enn Lust loengu taastuv-energeetikast ja dots Henn Voolaid monumentaalfüüsikast, Tartu Tähetornis tutvustati astronoomiat, Raekoja platsil oli AHHA teadustelk. Teadusfestival kestis 28. septembrini.

- 20. ja 21. sept toimus Tartus Tähe tänava füüsikahoones kogupereüritus Tähe Perepäevad ehk TäPe 2008. Sarnaselt eelmiste aastatega sai näha teadusteatrit nii legendaarse füüsikaõpetaja Koit Timpmani kui ka keemikute esituses. Vaadata sai elektriautosid ning õppida neid ehitama. Õues tehti seebimulle ja pauke, sõita sai Segwayga ning vaadata UFO prototüüpi lendamas. Toimused erinevad töötoad. TäPet korraldavad TÜ füüsika, materjaliteaduse, keemia ja infotehnoloogia tudengid ning magistrandid.
- 13.-21. okt toimus Itaalias Triestes XIII Rahvusvaheline astronoomiaolümpiaad, kus osales ka Eesti viieliikmeline võistkond. Meie võistkonna kõige parema tulemuse saavutas nooremas (14-15 aastaste) vanuseklassis Tallinna Inglise Kolledži 8. klassi õpilane Kaur Aare Saar, kes teenis välja hõbemedali. Vanemas (16-17 aastaste) vanuserühmas said pronksmedalid Kadi Liis Saar Tallinna Inglise Kolledži 10. klassist ja Erik Tamre Tallinna Reaalkooli 9. klassist. Erik Tamre saavutas ka äramärkimist väärinud parima tulemuse vanema vanuseklassi vaatlusvoorus. Võistkonna juhtideks olid EMÜ dotsent Jaak Jaaniste (oli ka rahvusvahelise žürii liige) ja Tartu Ülikooli doktorant Tõnis Eenmäe. Olümpiaadi ametlik koduleht: www.issp.ac.ru/iao/2008/
- 31. okt toimus Tartu Ülikooli loodus- ja tehnoloogiateaduskonna (LOTE) õppehoones Tartus, Vanemuise 46 üritus „LOTE koolipäev“, kus Tartu Ülikool kutsus kooliõpilasi tutvuma õppimisvõimalustega loodus- ja tehnoloogiateaduskonnas.
- 27. okt-1. nov toimus Tartu Saksa Kultuuri Instituudis Tartu Ülikooli esimene, füüsikale pühendatud teaduslaager 2.-6. klasside õpilastele. Teaduslaager toimus kahes vahetuses, kummaski sai osaleda 30 õpilast. Kooliõpilased tegid laagris erinevaid katseid ja uurisid valgust, selle omadusi ning õppisid, kuidas on võimalik roboteid õpetada. Tartu Ülikooli teaduslaager toimus TÜ Teaduskooli eestvedamisel. Laagri tegemistesse olid kaasatud TÜ Füüsika Instituut, Eesti Füüsika Selts, TÜ Avatud Ülikooli keskus. Laagri tegevust toetas Haridus- ja Teadusministeerium.
- Novembri alguses korraldas Eesti Energia koostöös Tallinna Tehnikaülikooli, Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi ja üldhariduskoolide füüsikaõpetajatega füüsikaülesannete lahendamise võistluse „Energieline Energia 2008“, millest võttis osa 430 õpilast. Võistlusülesandeid lahendati novembri alguses 64 koolis, 11 erinevas Eesti linnas. Ülesanded puudutasid eelkõige kooli füüsikaõppe energetika valdkon-

da. Võistlus toimus kahes vanuserühmas: 8.–10. klass (noorem rühm) ning 11.–12. klass ja kutsekoolid (vanem rühm). Noorema vanuserühma üldvõitja on Ivar Kiitam, kes võitis võistluse peaauhinna juba teist aastat järjest. Vanema vanuserühma üldvõitja on Taavi Pungas, kes sai võistlusülesannete lahendamise eest maksimumpunktid. Mõlemad võitjad on Tallinna Reaalkooli õpilased. Kokku tunnustati võistluse 60 parimat osalejat ja nende õpetajaid.

- 14. nov esines TÜ prof Jaak Kikas ETV saates „Eesti teadlased“, 28. nov esines samas saates TÜ emeriitdotsent Arved Vain koos prof Mati Pääsukesega müomeetria teemal.
- 15. ja 16. nov ning 7. dets korraldasid Teaduskeskus AHHA ja Emajõe Lodjaselts täheteemalised lodjasõidud Emajõel. Kahetunnise sõidu jooksul õpetasid AHHA astronoomid tähtkujusid, rääkisid tavastest asjadest ja vastasid küsimustele.
- 29. nov jagati Tartus, Tähe 4 õppehoones välja füüsikaportaali fysika.ee füüsikavideote võistluse „Videojaht“ preemiad. Vt www.videojaht.ee
- 5. dets toimus Tallinna Tehnikaülikoolis traditsiooniline robotivõistlus „Robotex“. Esikoha sai ITK Robotikaklubi võistkond Tige Tigu (Katrin Loodus, Mart Mangus, Mikk Mangus, Kardo Kallis ja Janika Liiv; juhendas Margus Ernits), teiseks tuli ITK Robotikaklubi ja TTÜ Biorobotika Keskuse võistkond SuurSilm (Valdur Kaldvee ja Andres Ernits) ning kolmandaks ITK Robotikaklubi võistkond Nixie & Co (Kristjan Mölder, Katrin Kibbal, Allan Vein, Mauno Pihelgas, Tõnis Tiitsaar; juhendas Margus Ernits).
- 5. dets jagati Õpilaste Teadusliku Ühingu aastakonverentsil auhindu õpilasleiutajate konkursi tublimatele. SA Archimedese, SA Teaduskeskus AHHA ning Haridus- ja Teaduministeriumi poolt esmakordselt korraldatud konkursile saabus 608 tööd.
- 6. dets korraldas TÜ Teaduskool Tartus Tähe tänava füüsikahoones astronoomia avatud infopäeva, kus tutvustati õpilaste astronoomia-võistlusi.
- 6.–15. detsembrini Koreas Changwonis läbiviidud 5. rahvusvahelisel loodusteaduste olümpiaadil (IJSO) osales 44 riigi seas ka kuueliikmeline Eesti võistkond, kes pälvisid kokku kolm hõbemedalit. Võistkonna juhendajateks olid Tartu Ülikooli keemia instituudi lektor Karin Hellat, erakorraline teadur Timo Kikas ning loodus- ja tehnoloogiateaduskonna doktorant Liina Nagirnaia. Võistkond: Erik Tamre (Tallinna Reaalkool, 9. kl); Kaur Aare Saar (Tallinna Inglise Kolledž, 8. kl); Eva-Lotta Käsper

(Tartu Kivilinna Gümnn, 9. kl); Ralf Ahi (Tallinna Reaalkool, 9. kl); Rene Lomp (Tallinna Liivalaia Gümnn, 9. kl); Taivo Pungas (Tallinna Prantsuse Lütseum, 9. kl). Erik Tamre, Kaur Aare Saar ja Eva-Lotta Käsper said hõbemedalid ning Rene Lomp, Ralf Ahi ja Taivo Pungas pronksmedalid.

- Tallinna Energiakeskuse näitusetegevus täienes elektri ajaloo teemalise püsinäitusega „Elektrix“ ja Segway elektrisõidukiga, toimusid 2 perepäeva ja koostöö Tallinna koolidega. Valmistuti planetaariumi avamiseks. Vt energiakeskus.ee
- TÜ LOTE koolifüüsika keskuse teadustöö teemad 2008. a.
 - Füüsikaõppe efektiivsuse tõstmise võimalused põhi-, kesk- ja kõrghariduses:
 - a) VAK-õpetamis- ja õpistiilide toetamine füüsikaõppes (E. Pärtel),
 - b) Tütarlaste ja poiste erinevuste arvestamine füüsikaõppes (L. Sõõrd),
 - c) Uued meetodilised töötlused füüsikaõppes (O. Krikmann, E. Pärtel, J. Susi, H. Voolaid).
 - Füüsikaõppe efektiivsuse mõõtmine (S. Ganina, H. Voolaid).
 - Eesti õpilaste füüsikaliste väärarusaamade levik ning väärarusaamade detekteerimise meetodika (O. Krikmann, J. Susi, H. Voolaid).
- TÜ LOTE koolifüüsika keskuse projektid 2008. a.
 - Europrojekt *EU Train* õpetajakoolituse koordineerimiseks (O. Krikmann, J. Susi).
 - ESF projekt „Loodusteadusliku ja tehnoloogilise hariduse jätkusuutlikkuse tagamine kõigil õppetaseandidel“ (O. Krikmann, K. Tarkpea, K. Timpmann, H. Voolaid).
 - ESF kõrghariduse kvaliteedi arendamise programm „Primus“ (H. Voolaid, S. Ganina, K. Laansalu-Veskioja).
- Õpilaste teadustööde riikliku konkursi gümnaasiumiastme preemiad said:
 - I preemia Sander Siim Vaher (Tallinna Mustamäe Gümnn) töö „Keemiarelva laguproduktide määramine pinnases“ eest.
 - II preemia Gleb Široki ja Ivan Jakovlev (Tallinna Õismäe Vene Lütseum) töö „Miks anorgaanilises keemias toimub just nii“ eest (preemia summa jagati töö autorite vahel võrdsetes osades) ja Riinu Ots (Hugo Treffneri Gümnn) töö „Rabamänni juurdekasvu seosed mineraalsete toitainete inimtekkelise sissekandega atmosfäärist“ eest. Teise preemia pälvinud tööde autorid said võimaluse

esindada Eestit Euroopa Liidu Noorte teadlaste konkursil, mis toimus 2008. aasta septembris Kopenhaagenis.

- Läbi aasta peeti populaarseid ja harivaid loenguid mitmesuguste kuulajaskondade ees. Konkurentsituult kõige enam selliseid loenguid pidas TÜ prof Jaak Kikas (20 loengut, 1060 kuulajat), aktiivsed olid ka TTÜ õppejõud Arvo Mere ja Rein-Karl Loide.
- Tartu Ülikool avas LOTE tehnoloogiainstituudi ja füüsikainstituudi koostöös sõltumatu infoportaali www.tuumaenergia.ee, mille eesmärk on suurendada Eesti elanikkonna informeeritust ja teadmisi tuumaenergia ja tuumaenergeetika kohta.
- Populaarteaduslikke loenguid astronoomia ja astrofüüsika alal sai kuulata Tartu Tähetorni Astronoomiaringi koosolekutel, mis toimusid regulaarselt iga kuu esimesel, kolmandal (ja viiendal) teisipäeval algusega kell 17.15 Tähetorni auditooriumis. Jätkas ilmumist ka veebiajakiri „Vaatileja“, mis ilmub alates 2000. aastast, 6 numbrit aastas (vaatileja.obs.ee).
- Läbi aasta ilmusid ajakirja „Horisont“ rubriigis Elektropol TTÜ füüsikainstituudi elektroonikainseneri Veljo Sinivee artiklid.
- TTÜ korraldas ekskursioone Tallinna Tähetornis lasteaia- ja koolilastele ning organisatsioonidele, läbiviijateks Mario Mars ja Voldemar Harvig.
- Tallinna Tähetornis töötas 2008. aasta esimesel poolel traditsiooniline huviring (V. Harvig, M. Mars). Praeguseks hetkeks on ringi tegevus peatatud seoses tähetorni planeeritud remondiga.
- 2008. aastal külastas Tartu Observatooriumi 242 grupi koosseisus umbes 5300 inimest, kes said külastada Stellaariumit, viibida virtuaalses planetaariumis, vaadata 1,5-meetrist teleskoopi jne.
- Eesti korraldab 2012. a rahvusvahelise füüsikaolümpiaadi. Esimese sammuna oli haridusministri käskkirjaga moodustatud ministeeriumi, TÜ, SA Archimedes, Eesti Teaduste Akadeemia, KBFI ja TTÜ ekspertidest juhtkomitee, mille ülesandeks oli 2008. a lõpuks esitada HTMLle tegevuskava ja finantsplaan.

Kroonika koostasid Helle Kaasik (TÜ FI), Anna Aret (TO) ja Piret Kuusk (TÜ FI). Andmeid andsid Imbi Rauk (TÜ LOTE dekanaat), Kersti Roosimäe (TÜ õppeosakond), Vambola Kisand (TÜ FI magistrikomisjon), Henn Voolaid (TÜ koolifüüsika keskus), Jaak Jõgi (Lähte Ühisgümnaasium), Lehho Jõumees (Kohtla-Järve Järve gümnaasium), Tõnu Laas (TLÜ) ja Maarja Grossberg (TTÜ). Andmed ETF uurimistoetuste kohta

pärinevad ETISest (www.etis.ee). Andmed sihtfinantseeritavate teadusteemade kohta pärinevad ETISest ja Haridusministeeriumi koduleheküljelt www.hm.ee. Kasutatud on ka veebilehti www.ttkool.ut.ee, www.archimedes.ee, www.ut.ee, www.akadeemia.ee, www.fyysika.ee jt.

RAAMATUS KASUTATUD LÜHENDID

CENS	TTÜ Kübi mittelineaarsete uuringute keskus (Centre for Nonlinear Studies)
EFDA	European Fusion Development Agreement
EL	Euroopa Liit
EMÜ	Eesti Maaülikool
ERR	Eesti Rahvusringhääling
ETIS	Eesti Teadusinfosüsteem
FMI	Soome Meteoroloogia Instituut (Finnish Meteorological Institute)
HTM	Haridus- ja Teadusministeerium
ITK	Eesti Infotehnoloogia Kolledž
KBFI	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut
KHK	Tartu Kutsehariduskeskus
KVÜÕA	Kaitseväge Ühendatud Õppeasutused
LOTE	Tartu Ülikooli loodus- ja tehnoloogiateaduskond
REKK	Riiklik Eksami- ja Kvalifikatsioonikeskus
TLÜ	Tallinna Ülikool
TO	Tartu Observatoorium
TTÜ	Tallinna Tehnikaülikool
TTÜ GI	TTÜ Geoloogia Instituut
TTÜ Kübi	TTÜ Küberneetika Instituut
TTÜ MSI	TTÜ Meresüsteemide Instituut
TVK	Tartu Veeriku Kool
TÜ	Tartu Ülikool
TÜ FI	TÜ Füüsika Instituut
TÜTI	TÜ Tehnoloogiainstituut

SUMMARY

The 19th Annual of the Estonian Physical Society (EFS) starts with an article by Ilmar Ots and Hannes Liivat about builders of the Standard Model, Nobel Prize 2009 winners Yoichiro Nambu, Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa. It is followed by a short biography of Prof. Cheslav Lushchik on the occasion of his eightieth birthday by Henn Käämbre.

The second part of the Annual contains the programme of the 38th Estonian Days of Physics (Tartu, March 18–19, 2008) and three presentations given there. Hilja Iher writes about research at Tahkuse Air Monitoring Station, Peeter Saari about accelerating Airy pulsed light beams and Jaak Kikas about macro-, micro- and nano-tubes.

In the third part of the Annual, the programme of the 39th Estonian Days of Physics, to be held on March 17 and 18, 2009, together with the abstracts of the reports are published. Marko Kaasik and Svetlana Ganiina publish full articles on their presentations at the 39th Estonian Days of Physics.

The next part of the Annual presents official documents of the Estonian Physical Society. The EFS Annual Prize and the Medal of the Society 2008 were given to Laser Diagnostic Instruments Ltd, the Honorary Citations winner was Kalev Tarkpea. Dr. Piret Kuusk has been elected as an honorary member of the Estonian Physical Society. The High School Student Award was granted to a student of Tallinn Secondary Science School (*Tallinna Reaalkool*) Kaarel Mäearu, whose work was completed under the supervision of his teacher Mart Kuurme. The Society section includes also the Annual Report for the year 2008, changes of the Society Statute and the list of Board members of the Society. At the end of the section, the programmes of the EFS Summer and Autumn Schools of Exact Sciences and of the Summer School of Teachers of Physics for the year 2008 can be found.

The Annual ends with the physics chronicle, which lists the most significant events in the development of physics in Estonia in 2008.