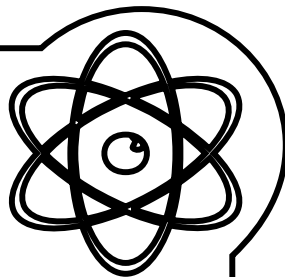


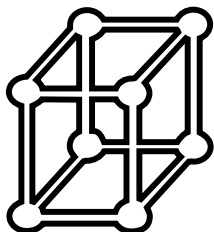
**EESTI FÜÜSIKA SELTS**



**EESTI  
FÜÜSIKA SELTSI  
AASTARAAMAT**

**2009**

**XX  
aastakäik**



**TARTU 2010**

Toimetanud: Anna Aret, Helle Kaasik, Piret Kuusk

Kujundanud ja küljendanud: OÜ Intelligent Design / Atko Rimmel

Autoriõigus Eesti Füüsika Selts 2010

ISSN 1406-0574

## SAATEKS

Pisut rohkem kui kakskümmend aastat tagasi algasid Kesk- ja Ida-Euroopas rahvaliidumised, mis lõpuks viisid NSV Liidu ja Varssavi Lepingu Organisatsiooni lagunemisele. Nende globaalsete ajalookäikude mõju oli mitmel viisil kohe tunda ka meie lokaalses igapäevases tegevuses. Kakskümmend aastat tagasi, 19. mail 1989, otsustati asutada Eesti Füüsika Selts. Umbes kakskümmend aastat on kestnud vägagi viljakas koostöö Tartu, Lundi ja Uppsala füüsikute vahel. Iseseisva Eesti teaduse rahastamine viimasel kahekümnel aastal on suurenenud ja vähenenud koos riigieelarveliste (ja hiljem ka Euroopa Liidu) vahendite suurenemise ja vähenemisega. Eesti teadus- ja arendusasutusi ning ülikooliharidust on kujundatud ja ümber kujundatud.

Eesti Füüsika Seltsi XX aastaraamatu avavad kaks artiklit Eesti ja Rootsi füüsikute kahekümne aasta pikkusest koostööst. Traagiliselt on need pühendatud selle koostöö ühe algataja, Lundi Ülikooli aatomifüüsika emeriitprofessori Indrek Martinsoni mälestusele, kes lahkus manalateele 14. novembril 2009, jõudmata lõpetada oma pooleliolevaid kirjatöid. Jõuluajal 2008 läks igavikuteele Andrus Ausmees, kes ühena esimestest siinsetest noortest füüsikutest sai kasutada võimalust töötada Lundi ja Uppsala laborites ja kelle töö oli väga tulemuslik.

Eesti XXXIX füüsikapäevadel ja XXXI füüsikaõpetajate päevadel Tartus 17. ja 18. märtsil 2009 esinenutest on oma ettekanded artiklikis kirjutanud EFS aastapremia 2009 laureaat Els Heinsalu (Difusioonist jõuväljades), Hannes Tammet ja Urmas Hörrak (Nanomeeterosakeste tekkimine vee pritsimisel) ning Matti Laan (ITER ja tuumaenergeetika). Avaldame ka 22. ja 23. märtsil 2010 toimuvate Eesti XL füüsikapäevade ja XXXII füüsikaõpetajate päevade kava, Peeter Saari artikli (Besseli impulssidest teoreetiku pilguga) ning ettekannete sisukokkuvõtted.

Aastaraamatu lõpetavad Eesti Füüsika Seltsi rubriik, 2009. aasta füüsikakroonika ning vihikute „Füüsika“ 1973–1987 ja Eesti Füüsika Seltsi aastaraamatute 1989/90–2009 koondsisukord.

Piret Kuusk,  
toimetaja

# SISUKORD

## **Svante Svensson**

Auger Resonant Raman Spectroscopy at MAX: A Finnish-Swedish-Estonian success story .....	6
--	---

## **Ergo Nõmmiste**

20 aastat koostööd Rootsi rahvusliku sünkrotronkiirguse keskuse MAX-lab'i ja Füüsika Instituudi vahel .....	16
---	----

## **Ilmar Ots ja Hannes Liivat**

Elementaariosakeste kiirendite olevikust ja tulevikust .....	37
--	----

## XXXIX EESTI FÜÜSIKAPÄEVAD ja XXXI FÜÜSIKAÕPETAJATE PÄEVAD

Kava .....	54
------------	----

### **Piret Kuusk**

Eesti Füüsika Selts 20 .....	59
------------------------------	----

### **Els Heinsalu**

Difusioonist jõuväljades .....	62
--------------------------------	----

### **Hannes Tammet ja Urmas Hörrak**

Nanomeeterosakeste tekkimine vee pritsimisel .....	93
--	----

### **Matti Laan**

ITER - tee energiaprobleemideta maailma? .....	105
--	-----

## XL EESTI FÜÜSIKAPÄEVAD ja XXXII FÜÜSIKAÕPETAJATE PÄEVAD

Kava .....	118
------------	-----

### **Peeter Saari**

Ülevalguskiirusega ja allavalguskiirusega, kiirenevaist ja aeglustuvaist Besseli impulssidest teoreetiku pilguga .....	122
--	-----

Ettekannete sisukokkuvõtted .....	134
-----------------------------------	-----

<b>EESTI FÜÜSIKA SELTS 2009</b>	
EFS aukirjad ja preemiad .....	140
EFS aukirjad ja preemiad 1990–2009 .....	142
EFS juhatuse 2009. aasta tegevusaruanne .....	145
Aasta pilt .....	147
EFS laiendatud juhatus 2009. aastal .....	147
Veebiajakiri .....	148
EFS uued liikmed .....	149
Täppisteaduste sügiskool 2009 .....	150
EFS füüsikaõpetajate suvekool 2009 .....	151
EFS füüsikaõpetajate sügisseminar 2009 .....	152
<b>FÜÜSIKAKROONIKA 2009</b>	
Töökorraldus .....	154
Väitekirjade kaitsmine .....	155
Õppetöö .....	158
Teadusüritused Eestis .....	164
Teadustöö .....	167
Raamatud ja kogumikud .....	175
In memoriam .....	176
Füüsikahariduslik tegevus .....	180
Vihikute „Füüsika“ 1973–1987 ja Eesti Füüsika Seltsi aastaraamatute 1989/90–2009 koondsisukord .....	197
SUMMARY .....	219
RAAMATUS KASUTATUD LÜHENDID .....	220

# **AUGER RESONANT RAMAN SPECTROSCOPY AT MAX: A FINNISH-SWEDISH-ESTONIAN SUCCESS STORY**

---

**SVANTE SVENSSON**

Department of Physics and Material Science  
Uppsala, Sweden

*To the memory of Andrus Ausmees and Indrek Martinson*

## **ABSTRACT**

A short and very personal review is made of the Nordic/Baltic cooperation in the field of Synchrotron Radiation Science. The start of the MAX laboratory in Sweden will be covered, as also the strong activity of the Finnish researchers from Oulu and Estonian researchers from Tartu, who under very difficult circumstances built up a completely new scientific field. My example is the startup of the Finnish beamline at MAX I (technically denoted beamline 51), which produced world leading results and contributed grossly to the motivation of the MAX II project, i.e. implicitly also to the present MAX IV project. It will be shown that the Finnish-Swedish-Estonian contribution was essential for this success.

One day, in May 1989 we had a visitor in the ESCA<sup>1</sup> laboratory in Uppsala. He presented himself as Professor Mart Elango from Estonia, and he was proud to tell us that his visit was not financed by the Soviet authorities in Moscow, but from funds given by the local scientific authorities in Tallinn. This was the last year of the perestroika, and it became gradually clearer that a Free and Independent Estonia was not only possible. It was almost already a reality. Mart was known in Uppsala as an expert on luminescence, and we also knew him since he had been here before, in the 1960ies. Actually he was acknowledged in the first volume of Kai Siegbahn's famous monographs on ESCA.

---

<sup>1</sup> ESCA - Electron Spectroscopy for Chemical Analysis.

We were talking about the new MAX facility in Lund and we presented the ideas we had for electron spectroscopy on gases. We had recently established contacts with Aksela's group in Oulu and we had started to discuss collaboration on such a project. It was more than obvious that we needed to coordinate our resources for the Synchrotron Radiation Science. Instead of working alone in our home laboratories, we realized that we would have to work on a larger scale. Using a Nordic/Baltic base was a natural step.

Mart pointed out that *Estonia* could contribute. Yes, he talked about *Estonia as if the independence was already a fact*. His laboratory in Tartu would not have large economical resources for the coming years, but the capital of trained researchers was large. We understood this very well and agreed.

Very soon after this we had a visit from Seppo Aksela in Uppsala, who told us that the planned undulator beamline at MAX I could be financed by Finnish funds. He planned for an SX-700 monochromator from Zeiss, of the same type as we had successfully put up at beamline 22 [1]. We started an exchange of students and soon after we had the pleasure to host Antti Kivimäki in our department, working with the simulation of the optics of the Finnish beamline at MAX [2, 3]. The long journey of joint Nordic atomic and molecular research had started. At this time I didn't realize that this should last for at least the next two decades.

It should be pointed out that the Finnish contribution to the MAX I project had a great impact on the synchrotron radiation research in Sweden. The Oulu group was (and is of course) very strong, very competent and with a solid international position. Both Seppo and Helena Aksela had long-term visions and, perhaps most important, was the stability of their engagement. This very large contribution from Finland, formalized in the Finnish Consortium at MAX, lifted the MAX I project from the Swedish level to a project with clearly Nordic/Baltic perspectives.

Indrek Martinson was the professor in Atomic Physics in Lund and he had taken the initiative to construct an "Astrophysics beamline" at MAX I. This beamline has now the more technical name BL 52 and is characterized on the MAX-lab homepage as a beamline for "Angular resolved photoemission, atomic and molecular spectroscopy, luminescence". The central component is a normal incidence monochromator and it has been operative since more than 20 years and is still going strong. The "Astrophysics beamline" was initiated by Indrek Martinson since

there was a growing interest for VUV atomic spectroscopy linked to astronomical problems.

Synchrotron Radiation beamlines created a new situation for the research council. I had worked together with Ralf Nyholm on the computer simulation of beamline 22 and the total cost for this project (something like 5–6 MSEK) was at the time of a new level. In the beginning it was not generally obvious for the decision makers in the Research Council that this was in fact not so costly per researcher. Synchrotron Radiation equipment is shared among many users and the cost per project is therefore manageable, due to the large synergy of utilizing common equipment. However, during the first years of SR most spectroscopists still worked at home laboratories and the advantages of pooling resources were not generally accepted. Today MAX-lab hosts over 800 users annually and the synergy is more visible.

Indrek Martinson and Dr. Rein Kink from Tartu had started projects on luminosity on beamline 52 and Indrek managed to rise Swedish funding for several crucial items. Mart Elango's group took up projects at beamline 22 where they soon presented world-class results concerning resonant Auger spectroscopy on ionic crystals. Indrek Martinson supported financially also this activity. Mart Elango had a young and very competent team: Ergo Nõmmiste, Arvo Kikas, Andrus Ausmees were the "older" ones. Marco Kirm was a research student, and one should also mention Edwin Kukk who during this period started PhD studies in Oulu.

In 1991 we met at the poster session at the User Meeting of MAX-lab. Of course we were standing in the corner where the Finnish beamline at MAX was under construction. I and Seppo Aksela were there, as also Mart Elango with his young researchers from Tartu and Indrek Martinson from Lund. We talked about the future research projects and what type of teams would be necessary for the new times. Mart put forward the idea that we should try to find temporary positions in Sweden and Finland for the young people from Tartu. The economic situation in Estonia was for the moment sad if not to say catastrophic, and it was important to save the competence of young researchers. If I remember correctly, he did not promise his young collaborators a paradise; rather he explained that hard work during beamtime periods was waiting possible candidates, as also a necessity of being away from the families for long times:



- *Do you agree on this?*

He asked his former students quite harshly and looked from face to face. And I don't remember that anyone said a word. We all understood what Mart meant.

But he was right of course. In 1991 the new independent Estonia was just established and the economical problems for the new state were gigantic. I soon realized that Indrek and Mart had a much longer national perspective, namely the *vision* to make a bridge for Estonian physics and here MAX-lab could play a role.

A couple of weeks later Indrek came to Uppsala to visit me. We discussed how to obtain funding for postdocs from Estonia and I wrote an application to the Academy of Science in Sweden and he managed to obtain a contribution from an "Estonian cooperation project" he had got approved at the University of Lund. On top I could add funding from something called "Östeuropa" funds at the University of Uppsala. We were happy to see that many initiatives were launched in this direction. With this economic background we could offer Dr. Andrus Ausmees to come to Uppsala to work in my group. At the same time Prof. Aksela was able to invite Dr. Ergo Nõmmiste to his group in Oulu and a research student Marco Kirm (now the director of the Institute of Physics in Tartu) started to work at beamline 52 with funding from Indrek. Happily enough Andrus' wife Nora Ausmees managed also to find a place in research at the Swedish Agricultural University in Uppsala. So in this case Andrus did not have to live, as Mart had said "a long time separated from his family". However, such an arrangement was not possible for all talented researchers from Estonia. These were very hard times.

What we now had achieved was a start of a very successful Nordic/Baltic cooperation. This has also been essential for obtaining the recent go (!) for the MAX IV project. And this project is presented from the start as a Nordic/Baltic project. One person remained for the moment in Tartu, Dr. Arvo Kikas, but he would also come over to us in Uppsala later for a period of almost a year. We used all networks and funding possibilities we could. The help, enthusiasm and guidance we got from Indrek Martinson were invaluable. I was quite young as a research leader and sometimes I despaired on how to manage the administrative work. But Indrek was always present, supporting, advising and encouraging. Without him I could have given up in some crucial moments. In connection to this period I should also mention the work done by Ralf Nyholm who

was responsible for beamline development at MAX and my colleague in Uppsala Nils Mårtensson who was leading the build-up of experimental equipment at the important beamline 22 during these years.

Finally in autumn 1992 Andrus Ausmees was on place as postdoc in Uppsala joining our team. One of my research students Dr. Arnaldo Naves de Brito had got a postdoc with Seppo Aksela and he was now installing the monochromator and building the Finnish beamline together with Antti Kivimäki and other young Finnish scientists. In Uppsala we were building a suitable high-resolution electron spectrometer. I had just recruited a fresh research student, Stuart Osborne. We had a long tradition of high-resolution electron spectroscopy and there was very solid know-how concerning this in the laboratory. We decided to go for a 144 mm spherical sector analyser and the construction engineer Ing. Jan Olof Forsell suggested the introduction of a new concept, using the electron lens as a differential pumping stage [4]. We had started the assembly of the instrument in November when I got an acute attack of a slipped disc in my back, resulting in a non-trivial medical operation, and I was convalescent without full capacity to move around or to sit during 2 months.

Catastrophy! A completely new postdoc and a very fresh research student and a joint Nordic project – the project of my life! And there I was locked to a bed, with great difficulties even to go to the bathroom.

But Andrus, Stuart and J.-O. Forsell fixed the situation. When I came back from hospital after Christmas the spectrometer was operative and we could start to optimize using an electron gun. Andrus was a very solid researcher, working carefully and with high ambition and he and Stuart formed a very nice team. Stuart was an intelligent, open-minded and talented student who really liked to build things. I was lucky.

After some discussions in the program committee at MAX we got beamtime together with Prof. Seppo Aksela for testing the electron spectrometer in the end of February 1993, at the Finnish beamline. We were a combined Finnish-Swedish team, for the first time working together on a real experiment at the new Finnish Undulator beamline at MAX-lab. Seppo had Arnaldo Naves de Brito, Antti Kivimäki and Olli-Pekka Sairanen working during this beamtime.

To my usual experience typically nothing works when a new experiment is started up. But this beamtime was different. We attached the spectrometer to the beamline, we decided to go for krypton for the first

tests, and we looked for the huge amount of electrons you normally find at zero kinetic energy.

No problems. Everything worked as it should. The detector was healthy, all the power supplies reacted as they should.

We decided to change the monochromator setting to the Kr  $3d_{5/2} \rightarrow 5p$  resonance energy of 91.2 eV.

An intense (for this time) decay electron spectrum showed up on the computer screen, with very many narrow lines. We decided to lower the electron analyser pass energy in order to get better resolution. A new spectrum grew up on the screen – and we immediately saw that something great was under way.

- *Seppo, I asked, isn't the lifetime of the 3d about 90 meV?*

- *I think so, Seppo replied.*

- *But these lines seem to be narrower than 90 meV?*

- *It seems so.*

Almost everybody in Sweden, Finland and Estonia understands such a conversation. We belong to the same kind.

We had observed the Auger Resonant Raman Effect (ARRE) for the first time in the VUV and it was time for some champagne in plastic mugs (from the bathroom at MAX I) and then we continued to produce the measurements for a paper [5] on the subject.

In Fig. 1a we show the main result of this study. It had earlier been discussed if the resonant Auger process should be described as a two-step or a one-step process. In the former case one separates the excitation from the decay. The creation of the core-excited state is considered as the first step. This excitation step is then supposed to be subsequently followed by the deexcitation (Auger decay) process. Fig. 1a from these experiments 1993 immediately shows that this view is wrong. The linewidth of the normal 4s photoelectron line is determined by the monochromator bandwidth. One can see how it follows the size of the monochromator slit. For *the resonant Auger* lines at lower kinetic energies in the figure, the situation is more complex. For a fully open monochromator the linewidth is essentially the same as for the 3d core hole state. Note it is not as broad as the 4s photoelectron line. *The resonant Auger* lines become narrower and narrower when the photon resolution is increased. For the sharp excitation the linewidth is determined by the exciting source, just as in the case of normal photoionization. Indeed a very complex behaviour.

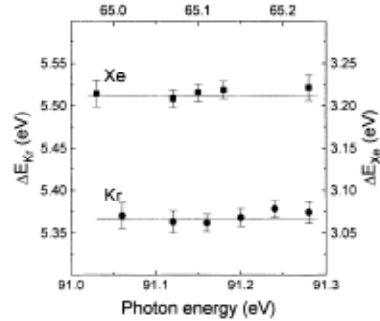
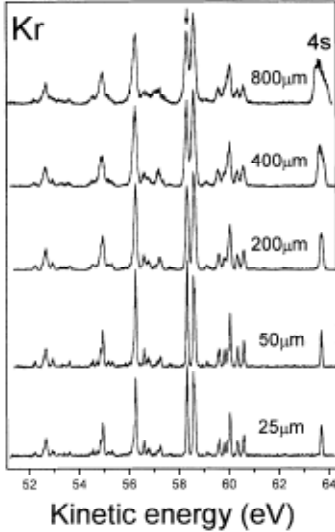


Fig. 1b. Illustrates that the resonant Auger lines disperse in the same way with the photon energy as the normal photoelectron lines. This is a sign of the Resonant Auger Raman Effect.

Fig 1a. The resonant Auger Raman spectrum of Kr excited at the Kr  $3d_{5/2} \rightarrow 5p$  resonance photon energy of 91.2 eV. At the highest kinetic energy we see a normal photoelectron line from single ionization of 4s electrons. At lower energies we see the peaks originating from the resonant Auger decay. Note how the lines are affected by the change in monochromator slit width, i.e. to the bandwidth of the exciting radiation.

Also, as shown in Fig. 1b the resonant Auger lines do not stay at a fixed kinetic energy. They disperse with photon energy as the normal photoelectron lines do.

This illustrates that the excitation cannot be separated from the deexcitation. The problem has to be treated as one single scattering process: Resonant Anomalous Radiationless X-Ray Scattering.

A very intense research period followed. It was interesting to note that our Nordic/Baltic cooperation was able to produce better results than at most international laboratories. Nobody outside MAX-lab had expected this. MAX (at this time there was no MAX II) was a very small storage ring of 550 MeV, built with the aim of getting reasonable performance for lowest possible cost. However, we used a very small in-vacuum undulator (built by Meinanders team in Helsinki) with an almost incredible (for the time) lowest gap of about 7 mm, in combination with the efficient modified and optimized SX 700 monochromator, carefully matched to our high resolution electron spectrometer. And the total output of all

these components in combination was better than what was achieved in far more costly, prestigious and famous laboratories.

We had fun. And this fun has lasted very many years. In fact, we still have fun together after almost two decades.

In Figure 2 I show how it could look like at this beamline. We look at an exhausted team of Estonian postdocs at the Finnish beamline. To the left one can identify tired Andrus Ausmees. Sitting at the computer we see Ergo Nõmmiste, and in the door opening Arvo Kikas is standing.

Indrek Martinson was not directly taking part in these experiments. But he cared for our project and he showed frequently up during the measurements, to find out if we got the support from the lab as we wished, and he always had some encouraging comments.

Of course there were also some conflicts. The most frequent reason was the very small gap of the undulator. This had a devastating effect on the lifetime of the beam; it went down to something like 40 minutes when we closed the undulator. The machine group worked very efficiently and made an automated injection system enabling injection times of about 5–10 minutes. But nevertheless we were disturbing the work of other groups and we tried to solve this by friendly agreements of course. However, late evenings when people were tired, it could happen



Fig. 2. Three young researchers from Tartu at Beam Line 51 at MAX. From the left to the right: Andrus Ausmees, Ergo Nõmmiste and Arvo Kikas.

that the voices went up by a *terzo* or so. I would like to mention that Ulf Karlsson – now professor at KTH – in such cases often showed up with a bar of chocolate and some reconciling words.

During this pioneering period of synchrotron radiation research at MAX Andrus Ausmees developed his skills and talents. In total he produced as first author or co-author 58 articles from the results at MAX lab. Almost 44 of these papers are from the period 1993–2001 when he worked in our group in collaboration with our Finnish colleagues. But he also took part in the joint measurements of the Tartu group, mainly at beamline 22. Five of the reports from this period were published in *Phys. Rev. Lett.* In total he reached a very respectable so called H-index of 23, in very few years!

The pioneering period at the Finnish beamline at MAX I continued when MAX II was constructed. Here the Swedish-Finnish beamline I411 was funded from both Finnish and Swedish sides (with also a small contribution from Norway). The Nordic/Baltic cooperation was formalized to a Nordic Network in Synchrotron Radiation Research, still active today (2009). Information about this can be found on <http://www.maxlab.lu.se/nordforsk/index.html>. There are 8 nodes in Sweden, Finland, Norway and Estonia and the network is funded by Nordforsk.

However, tragically, Andrus Ausmees could not take part in most of the work at MAX II. When we just were in the construction and commissioning phase of the Swedish-Finish beamline Andrus had his first attacks of an illness that very soon made his scientific work impossible. The last years he was leading a quiet life in Tartu and in Uppsala where he had his family. On Christmas Eve 2008 he passed away after a massive heart attack.

We, his colleagues and friends, mourn him sadly and his contributions to the Nordic/Baltic synchrotron radiation research will remain for times to come. By this article I have tried to put in a little piece to all that will be written about this fascinating period of science in our countries and about the MAX laboratory. I have deliberately made the text focussed on experiments where Andrus Ausmees participated.

Science is long term – life is short.

Just before this article was finished I got the message that also Indrek Martinson has passed away. Mart Elango and Olli Pekka Sairanen passed away several years ago.

I have only tried to make a sketch of the situation 1991–1995 and a small

portrait of Andrus, Indrek and Mart and their context. I would like to thank them all for friendship, scientific excellence and scientific collaboration.

I would also want to thank all collaborators and friends not presented here. There are many of them, and if someone feels he/she is not mentioned correctly he/she is right! If I get time I will come back in more detail. However, will still be many persons feeling their role not properly accounted for, but in order to make the balanced story one should be a professional scholar in history of science and one would have to spend much more time than I have been able to squeeze out.

An active Nordic/Baltic synchrotron radiation researcher doesn't have all this time after all. We will during the next four years concentrate on the largest scientific project in the Nordic/Baltic region ever: *The MAX IV project*. But I hope that my friends will find time to write from their perspectives. Our stories are worth telling. All pieces of light reflected by our different views are important. The history of such an amazing thing as the development of Nordic/Baltic synchrotron radiation research at MAX should have many voices.

In writing this article I have had generous help from Ergo Nõmmiste and Arvo Kikas who have given views on the manuscript and corrected my weak memory on several points and I would also like to thank the Oulu group: Seppo Aksela, Helena Aksela and Edvin Kukkk for a long friendship and collaboration.

## REFERENCES

- [1] R. Nyholm, S. Svensson, J. Nordgren and A. Flodström. Nucl. Inst. and Meth. A246, 267 (1986)
- [2] S. Aksela, A. Kivimäki, R. Nyholm and S. Svensson. Rev. Sci. Instrum. 63, 1252 (1992)
- [3] S. Aksela, A. Kivimäki, A. Naves de Brito, O. P. Sairanen and S. Svensson. Rev. Sci. Instr. 65, 831 (1994)
- [4] S. J. Osborne, A. Ausmees, J. O Forsell, B. Wannberg, G. Bray, L. B. Dantas, S. Svensson, A. Naves de Brito, A. Kivimäki and S. Aksela. Synchrotron Radiation News 7, 25 (1994)
- [5] A. Kivimäki, A. Naves de Brito, S. Aksela, H. Aksela, O.-P. Sairanen, A. Ausmees, S. J. Osborne, L.B. Dantas and S. Svensson. Phys. Rev. Lett. 71, 4307 (1993)

# 20 AASTAT KOOSTÖÖD ROOTSI RAHVUSLIKU SÜNKROTRON- KIIRGUSE KESKUSE MAX-LAB'I JA FÜÜSIKA INSTITUUDI VAHEL

---

**ERGO NÕMMISTE**

TÜ Füüsika Instituut

*1989. a jaanuaris külastasid esimest korda MAX-lab'i Lundis Füüsika Instituudi töötajad prof Mart Elango ja dr Rein Kink. Sealt algas tihe koostöö MAX-i ja FI vahel ja võib öelda, et vaadates tagasi käidud aastatele on see olnud üks suur edulugu, mis poleks kindlasti realiseerunud ilma prof Indrek Martinsoni hoole ja abita, vähemalt mitte sellisel kujul. Pühendan selle loo meie fantastilise patrooni, sõbra ja kolleegi akadeemik prof Indrek Martinsoni mälestusele.*

Kui meil paluti teha ettekanne 2009. aasta füüsikapäevadel ja ka artikkel EFSi aastaraamatusse 2009, siis oli just Indrek see, kes asjast suure entusiasmiga kinni hakkas. Ta kirjutas mitmeid lehekülgi oma mälestusi sellest, kuidas see koostöö tema mäletamist mööda algas, ja ta oli lahkesti nõus seda kõike ka teistega jagama. 2009. a novembri alguses, olles iga-aastasel MAX-lab'i kasutajate konverentsil Lundis, leppisime kokku, et ta tuleb Tartusse emakeelse Tartu Ülikooli 90nda aastapäeva üritustele mõned päevad varem, et saaksime selle artikli kondikava ja ka mõningad detailid täpsustada. Kui olin just talle helistamas, et paika panna hotellide broneeringud ja saabumiskuupäevad, sain kõne Indreku abikaasalt Evilt, kes teatas, et Indrekut ei ole enam...

Selle artikli ettevalmistamisel kasutasin peamiselt nii enda kui ka kolleegide mälestusi, samuti mõningaid väheseid kirjalikke meenutusi, mida Indrek jõudis kirja panna. Seetõttu võib antud kirjatükis esineda mõningaid vigu, mille eest juba ette vabandan.



## INDREK MARTINSON MEENUTAB

Lundi Ülikooli professor Bengt Edlén (1906–1993) oli mitu aastat Rootsi Teaduste Akadeemia (KVA) liige ja ühtlasi ka Nobeli preemia komitee (füüsika alal) esimees. Aastal 1964 otsustas see komitee, et füüsika preemia jagatakse kolme teadlase vahel: Charles Hard Townes (MIT, Boston) ning Nikolai Bassov ja Aleksandr Prohhorov (Moskva). See valik meeldis Venemaa teadusele ja Edléni hakati väga hindama. Kui aus olla, siis ka mina leian, et see oli õige otsus. Siis ma veel KVA liige ei olnud, sain sinna aastal 1986.

Edléni hinnati N. Liidus ja ta sai palju kutseid. Esimest korda oli ta N. Liidus 1976, seoses oma 70nda sünnipäevaga. Teda võeti väga hästi vastu ja järgmistel aastatel olid mõned vene füüsikud nagu V. Shevelko ja A. Urnov Lundis. Ka mina sain kutse N. Liitu ja esimene visiit oli sügisel 1980. Pidasin ettekandeid Lebedevi instituudis Moskvas, Teaduste Akadeemia instituudis Troitskis ning ülikoolides Riias ja Vilniuses. Järgmine kutse tuli 8 aastat hiljem ning siis olin kõigepealt Moskvas ja Leningradis, millele järgnes Eesti ja Leedu külastamine. Kui öörong Leningradist jõudis Tallinnasse, siis kohtasin esimest korda Mart Elangot. Tema füüsika-alaseid artikleid olin siiski varem näinud. Jalutasime veidi linnas ja siis hakkas auto meid viima Tartu poole. Seal kohtasin füüsikuid Flst, vaatamata pühapäevale oli kohal kaunis palju teadlasi. Öhtul hakkasime pealinna tagasi sõitma. Ja autos ütles Mart Elango umbes nii: „Teil on seal Lundis väga hea sünkrotron, ei tea kas oleks võimalik ka Eesti teadlastel seda kasutada?“ See oli just siis, kui sõitsime üle Kärevere silla. Ma olin tol ajal, 1984–89, MAX-labori juhatuses ja võisin rahulikult vastata: „Tulge ainult, kui teile sobib.“ Ja tagasi Rootsis sain kohe esialgset toetust, 45 000 SEKi, ja esimesed kutsutud olid Mart Elango ja Rein Kink. Nad saabusid Lundi jaanuari lõpul 1989 ja veetsid seal umbes neli nädalat. Siis kirjutasime alla ka koostöölepingule FI-ga, mis peaks veel praegugi

kehtima. Juba oktoobris tulid Lundi Andrus Ausmees ja Ergo Nõmmiste Tartust. Ka nemad olid siin mitu nädalat ja tutvusid MAX-labori kiirekanaliga 22. Veidi hiljem, novembris, olid siin Ants Lõhmus ja Peeter Vaino, et projekteerida luminesentsi mõõtejaama kanalile 52. Juba jaanuaris 1990 olid Mart, Andrus ja Ergo uuesti Lundis ning valmistasid ette katseid kiirekanalil 22. Suvel 1990 olid siin ka Ants Lõhmus, Heldur Niedrais ja Rein Kink, kes alustasid Tartus valmistatud aparatuuriga madalatemperatuursete eksperimente kanalil 52. Ning sügisel jälle Mart Elango, Andrus Ausmees ja Arvo Kikas taas kanalil 22.

Jah, nüüd hakkas töö hästi minema ja ilusaid tulemusi tuli peaaegu järjest. Saime ühel korral toetust ka Rootsi NFRi (*Naturvetenskapliga Forskningsrådet*) poolt, aga see fond ei olnud eriti vastutulelik. Kuna rootslased ei tegele kristallide füüsikaga, siis nad nähtavasti leidsid, et see ala pole eriti huvitav. Siin maal tundus pinnafüüsika tähtis olevat. Kunagi 1992. a olin ühes Rootsi Teaduste Akadeemia (KVA) komitees, kus oli ka üks autofirma SAAB kõrge direktor. Ta oli natuke ülbe ja ütles, et „ega need eesti füüsikud midagi ei oska“. Ma vastasin, et ta võiks natuke veel oodata. Ja nüüd polegi vaja küsida, et „kellel läheb praegu paremini, kas Tartu Ülikoolil või SAABi firmal?“ – SAAB on vaevu pääsenud likvideerimisest. Meie koostöö aga edenes tõesti ja saime igal aastal toetust Crafoordi sihtasutuse poolt. Ma ei teagi, kuidas ilma selle abita, mis kattis reisis Riia tn – MAX – Riia tn, üürid Lundis ja elamise siin, oleks olnud võimalik üldse edasi jõuda. Vahel saime ka Kungl. Fysiografiska Sällskapet poolt head toetust.

Jah, kui vaatan külalisraamatut, siis leian veel palju nimesid, nt 1992: Ergo Nõmmiste, Andrus Ausmees, Arvo Kikas, Edwin Kukk, Rein Kink, Ants Lõhmus, Heldur Niedrais, Elve ja Lembit Pung, Mart Elango, Valdur Tiit jne jne.

## SÜNKROTRONKIIRGUS JA MAX-LAB

Ma usun, et selle artikli lugejale ei ole vaja seletada, mis on sünkrotronkiirgus ja miks seda kasutatakse erinevates (füüsikalistes) eksperimentides. Populaarteaduslikke materjale, ka eesti keeles, on ilmunud piisavalt. Siiski paar sõna ajaloost. Esimese Eesti füüsikuna kasutas sünkrotronkiirgust prof Mart Elango 1969. aastal USA-s. Tema eestvedamisel hakkasid Füüsika Instituudi teadlased süstemaatiliselt kasutama sünkrotroni kiirgusallikana seitsmekümnendate aastate teisel poolel Novosibirskis VEPP-2 kogujaringil. Kuna antud seade oli mõeldud peaaesjalikult tuumafüüsikalisteks eksperimentideks, oli selle kasutamine spektroskoopilisteks eksperimentideks vaevaline ja episoodiline. Samuti oli sünkrotronkiirguse kasutamise kogemus R. Kingu grupil, kes koos TA SKBga ehitas Moskva sünkrotronile Siber-1 spektroskoopia-kanali ja alustas eksperimente 1980ndate keskel. Kuid ka see allikas polnud töökindel ja rekonstrueerimise käigus lõpetas töö. Samuti oli juba 1980ndate aastate lõpus selge, et Nõukogude Liit sellisel kujul lõ-



Esimest korda MAX-is. Jutuhoos prof Indrek Martinson, Andrus Ausmees, Ergo Nõmmiste ja prof Bengt Ey Svensson.

petab oma eksistentsi ning kogu oma teadustegevus tuleb orienteerida lääne suunas. Seetõttu tuli telefonikõne 1988. a sügisel Moskvast ülimalt sobival ajal. Nimelt küsiti sealt, kas FI on nõus vastu võtma Rootsi füüsikut Indrek Martinsoni, kes ise avaldas soovi Tartut külastada. Kuigi sellel ajal täpset teavet prof Martinsoni teadusliku tegevuse kohta nappis, oli Mardile meelde jäänud seos MAX-lab'i ja Indreku vahel. Seega oli see visiit meile lausa „taeva kingitus“. Arvestades Eesti finantsilist situatsiooni 1980ndate lõpus ja 1990ndate alguses, oli selge, et ilma tuntava Rootsi-poolse toetuseta ei oleks olnud FI füüsikutel MAX-lab'i kasutamine eksperimentides võimalik. Tänu Indreku kogemustele ja diplomaatile ka see probleem lahenes.

Nagu juba märgitud, külastasid esimestena Lundi ja MAX-lab'i Mart Elango ja Rein Kink 1989. a alguses. Meie kord saabus 1989. a oktoobris. Kui Mart ja Rein pidid paika panema nn MAXi-FI koostöö teaduspoliitilise poole, siis meile Andrus Ausmehega sai ülesandeks tutvuda kiirekanali 22 võimalustega ja valmistada seal ette meie esimesed eksperimendid. Kui tänapäeval on sünkrotronid kiirgusallikatena kasutusel üle maailma ja neid ehitatakse aina juurde, siis üheksakümnendate alguses oli see buum veel algamata ning ka mõõteaga oli võimalik saada suhteliselt lihtsalt, nn tutvuste poolest. Seetõttu polnud järgmiste eksperimendiaegade saamine ja paikapanek väga keeruline.

Saabusime Stockholmi 15. oktoobril 1989. a „Silja Line“ laevaga Helsingist, kuna see oli ainus võimalus osta piletid rublade eest (ja peale rublade ei tohtinud nõukogude inimene muud raha omada). Nimelt oli võimalik hankida rongipilet Leningrad–Malmö, mis sisaldas rongipiletit Leningrad–Helsingi, „Silja Line“ laevapiletit Helsingist Stockholmi ja sealt edasi rongiga Lundi. Indrek oli meil sadamas vastas, aga kuna ta pidi ise minema Nobeli preemiate komitee istungile, siis palus ta meid aidata oma emal, kes juhatas meid raudteejaama ja aitas leida õige rongi. (Indreku matuste ajal 2009. a detsembris, kui mul õnnestus Indreku emaga põgusalt vestelda, oli tal see episood mitmete humoorikate üksikasjadega veel hästi meeles). Kui me Lundi jõudsime, oli Indrek juba meil vastas, sest tema tuli Stockholmist lennukiga. Seega olime me heades kätes ja olmeprobleemid said kõik lahendatud.

Natukene veel tänapäeva noortele nõukogude tegelikkusest.

Selleks et Rootsi sõita, tuli saada viisa. Õnneks oli konsulaat meile „lähedal“ – Leningradis – ja sinna käis Tartust mitu bussi päevas. Soome transiitviisa sai Tallinnast, nii et seegi ei olnud teab mis suur prob-

leem. Ühel järgnevatest reisidest aga otsustasime kasutada äsja avatud otselendu Tallinna ja Kopenhaageni vahel. Et nautida õhusõidu kiirust ja mugavust, tuli kõigepealt sõita täiskiilutud bussiga Leningradi Rootsi viisa järele, siis aga seista tunde sabas, et saada lennukipiletid Moskvasse Taani transiitviisa saamiseks. Alles siis said ette võtta poolteist tundi kestva aegavõitva õhusõidu. Arvestades kommunaalsituatsiooni enne rahareformi, soovitas Indrek Lundis külastada algul väikesi „Seven-Eleven“ tüüpi toidupoode, et mitte šokki saada. ICA-Tuna tüüpi poodides oli valik nõukogude inimesele alguses liiga ränk taluda (tänapäeva võrdluses on need poed oma kaubavaliku ja suurusega kordades väiksemad Tartu vastavatest poodidest). Nii et ka olmealal oli palju õppida.

Vaadates tagasi eelnevale kahele aastakümnele, on ilmselt võimatu kogu koostööspektrit detailselt kajastada, seega proovin edasised arengud märksõnade tasemel kokku võtta.

## ETTEVAATLIK ALGUS: AASTAD 1990–1992

Esimesed eksperimendid MAX-I kogujaringil teostasime kiirekanalil 22. Esimestel aastatel osalesid nendes eksperimentides Mart Elango, Andrus Ausmees, Arvo Kikas, Agu Saar, Rein Ruus ja allakirjutanu. Ka kiirekanal 52 võeti kiiresti kasutusele Rein Kingu juhitud töörühma poolt. Lisaks temale olid seal aktiivsed katsetetegijad ka Marco Kirm, Ants Lõhmus, Peeter Vaino ja Heldur Niedrais. Nende poolt käivitati luminesentsmetoodika vedela He temperatuuridel MAX-lab'is juba suvel 1990. Tasub märkida, et need olid üldse esimesed vedela heeliumiga eksperimendid MAX-lab'is. Kiirekanalil 22 olid esimesed katsed pühendatud sekundaarelektronide energijaotuste mõõtmistele, s.t jätkasime sama uurimissuunda mis Tartus. Kui kiirekanalile installeeriti üks esimesi Scienta elektronspektromeetreid, tuli Arvo Kikasel idee proovida mõõta resonantseid Auger' spektreid leelishalogeniididest. Esimesena mõõtsime spektrid  $K^+$  kui Ar sarnase elektronkonfiguratsiooniga ioonidest ning võib öelda, et saadud tulemused olid nii huvitavad, et sekundaarelektronide emissioon tahkistest vajus röntgenspektroskoopia laboris tahaplaanile. Esimene ajakirjas *Physical Review B* avaldatud artikkel sai suure tähelepanu osaliseks ja on kogunud juba üle kuuekümne viite. Resonantse Auger' spektroskoopiaga (kuigi peaausjalikult gaasidest) tegelesid ka Svante Svenssoni juhitud töörühm Uppsala Üli-



Esimesed katsed kiirekanalil 52. Pildil Heldur Niedrais, Ants Lõhmus ja Rein Kink.

koolist ja Seppo Aksela juhitud rühm Oulu Ülikoolist. Tänu Mardi heale suhtlemisoskusele löime sidemed mõlema grupiga. Kuna üheskoos planeerisid nad välja ehitada undulaatoril baseeruva gaasfaasi kiirekanali MAX-I kogujaringile, oli neil abijõude hädasti tarvis. 1992. a sügisel suundus järel-doktorina Uppsalasse Andrus Ausmees ja Oulusse allakirjutanu, doktorandina alustas oma teadlasteed Oulus Edwin Kukk. Lundis jätkas doktorandina Marco Kirm, kellest kujunes mittekooesiseuline kiirekanali 52 teadlane. Vaatamata selle kiirekanali piiratud tehnilistele võimalustele õnnestus uurijate ühiste pingutustega seal mit-

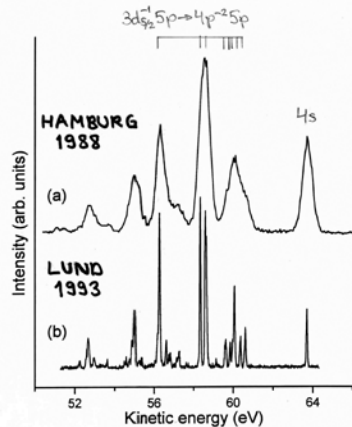
meid ilusaid teaduslikke ideid realiseerida ja publitseerida tulemused juhtivates füüsika-ajakirjades.

## **HARGNEMINE JA LAIENEMINE, AGA TEADUSTÖÖ SIISKI MAX-I BAASIL: AASTAD 1993–1997**

1993. a valmis nn soome kiirekanal – üks esimesi undulaatoril baseeruvaid kiirekanaleid II põlvkonna kogujaringidel maailmas. Kuna MAX-I elektronide energia oli madal (550 MeV) ning ring ise oli väikese raadiusega, polnud seal ka pikki sirgeid lõike, kuhu undulaatorit paigutada. Seepärast sai undulaatori (mis konstrueeriti ja ehitati VTT-s Helsingis) pikkuseks umbes 1 m ning lühilainelise kiirguse saamiseks pidi tema magnetpilu olema millimeetrites. Seetõttu konstrueeriti ta osana kogujaringist (tänapäevased rivimagnetseadmed asuvad üldjuhul kogujaringi vaakumkambrist väljaspool ning ei mõjuta tugevalt elektronikiire käiku), nii et undulaatori magnetpilu vähendamisel vähendati ka elektronikiire

vaakumkambri läbimõõtu (suruti vaakumkamber kokku). Selline tehniline lahendus oli nendel aastatel originaalne kogu maailmas. Saadud kiirgus oli oma maksimumides piisavalt ere, et teostada väikese kvantväljundiga gaasfaasi eksperimente. Lisaks sisaldas kiirekanal efektiivset diferentsiaal-pumpamise sõlme, mis võimaldas gaasi rõhku gaasirakus hoida suurusjärgus  $10^{-3}$  mbar, samas kui monokromaatoris oli vaakum  $10^{-9}$  mbar skaalas. Undulaatorist kiiratud ja monokromaatori läbinud kiirgus kvandi energiaga 70–700 eV oli lineaarselt polariseeritud, mis võimaldas alustada elektron-spektrite nurgasõltuvuste uuringuid. Esimese elektron-spektromeetriga oli kasutusel Scienta SES-144, mis oli firma endagi jaoks katsekempeplar ja kommertskasutusse ei tulnudki. Siiski andis kiirekanal koos seal paikneva aparatuuriga välja niivõrd head parameetrid, et seda võis siis kutsuda maailma parimaks ultrapehmes röntgenipiirkonnas töötavaks kiirekanaliks, ning aktiivse ühistöö tulemusena valmis Oulu ja Uppsala gruppidel esimestel aastatel mitu *Physical Review Letters* tasemel artiklit aastas. Kuna allakirjutanu oli aastatel 1994–1995 soome kiirekanali teadlane (*beam-line scientist*), oli ka temal tagasihoidlik panus kiirekanali 51 (nagu teda ametlikult nimetati) heas töös.

Kiirekanali teadlase töö on kõike muud kui kerge. Sisuliselt oled sa „sünkrotroni ori“. Kui ring töötab (ja üldjuhul töötab ta kuus päeva nädalas 24 tundi ööpäevas), pidid sa osalema eksperimentides või olema vähemalt kättesaadav ööpäevaringselt, kui oli kiirekanalil vaja midagi parandada. Mäletan, et 1993. a kevadel oli situatsioon, kus ma olin 2,5 kuud järjest rakkes sisuliselt pausideta. Kodus käisin ainult mõni tund magamas ja lapsi ei näinud nädalate kaupa. Kuigi üldjuhul kiirekanali teadlast ei pandud tööle öövahetuses



The resonant Auger spectrum of Kr at the  $3d_{5/2} \rightarrow 5p$  resonance ( $h\nu = 91.2$  eV)

Lahutuste võrdlus. Resonantne Auger' spekter krüptonist, mõõdetud 1988. a Hamburgis DESY-s ja 1993. a kiirekanalil 51.



Uus võimas lõppjaam, mille põhikomponendiks on pööratav elektron-spektromeeter Scienta SES-200, on installeeritud kiirekanalile 51. Pildil Andrus Ausmees ja Ergo Nõmmiste.



Kiirekanali 51 ehitamisel ja justeerimisel osalesid teadlased maadest, mille lipud selle kohal rippusid.



(mõõtmised käisid 24 tundi ööpäevas), tuli tihedalt ette öiseid telefonikõnesid, kus paluti kohale tulla ja mingi probleem lahendada. Siis ikka ratta selga ja minema... Samal ajal oli kiirekanali 52 teadlane Marco Kirm ning kuna meie töökohad olid kõrvuti, saime seda vatti ja vilet üksteisega jagada. Naljaga pooleks võib öelda, et sõpradega, kes on töötanud kiirekanali teadlasena, võib julgelt luurele minna.

Kuna paigalseis tähendab üldjuhul tagasiminekut, alustati uue ja võimalusi tunduvalt laiendava mõõtejaama projekteerimist ja ehitamist kohe, kui olid selgunud kiirekanali suurepäraseid omadused. Uus mõõteseades sisaldas suurema võimsusega elektronspektromeetrit Scienta 200, mida sai pöörata ümber oma telje. Lisaks olid seadmesse integreeritud ka võimalused mõõta elektronspektreid mitte ainult gaasidest, vaid ka vedelikest ja tahkistest. Et vedelikud ja gaasid saastavad mõõtekambrit, hakati seda seadet kutsuma „*dirty materials station*“. Hiljem täienes mõõteseades veel ioonide lennuaja spektromeetriga, mis andis võimaluse laiendada gaasfaasi eksperimentide amplituud. Tänu sellisele võimsale kompleksile algasid kiirekanalil 51 elektronspektrite nurgasõltuvuste uuringud, mis andsid mitmeid uusi põhjapanevaid tulemusi aatomi- ja molekulaarfüüsikas. Antud seade töötab praeguseni kiirekanalil I411 MAX-II kogujaringil, kuhu ta pärast MAX-II valmimist siirdati. Selle lõppjaama justeerimine oli äärmiselt keeruline ja vastuoluline ülesanne, kuna mitmed tehnilised lahendused, mida seadmes kasutati, moonutasid tugevalt elektronspektreid. Nende vigaste sõlmede leidmine ja uute tehniliste lahenduste väljapakumine oli keeruline ja konfliktiderikas protsess, mis murendas tugevalt siiani hästi töötanud Oulu–Uppsala koostööd. Samuti selgus, et selline universaalne, nii gaasfaasi kui tahkiste mõõtmiseks kasutatav seade saastab tugevalt tahkiste pindasid ning lõpuks ka sealt tulnud elektronspektreid. Seetõttu on edaspidi välditud selliste universaalsete mõõtejaamade ehitamist ning just orgaanilisi molekule ja tahkiseid proovitakse mitte samas mõõteseadmes segada. Aga nende järel dusteni jõudmiseks kulus palju energiat, aega ja ka närve. Kogu selle projektiga olid eestlastest seotud lisaks eelpoolmainitud Andrus Ausmehele, Edwin Kukele ja allakirjutatule ka Arvo Kikas, kes ühines aastaseks perioodiks Uppsala grupiga. Projektiga seotud rahvusvahelisse gruppi kuulus veel soomlasi, rootslasi, inglasi ja brasiillasi. Nende riikide lipud rippusid ka kiirekanali 51 kohal kuni selle sulgemiseni 1997. aastal.

Kiirekanali 52 kasutajate ring laienes tunduvalt. Lisandusid Tšeslav ja Aleksandr Luštšik ning Eduard Feldbach, Vitali Nagirnõi, Sergei



Eduard Feldbach, Rein Kink, Ilmar Kink ja Marco Kirm planeerivad järgmist eksperimenti kiirekanalil 52.



Edukad katsed kiirekanalil 22 on selleks korraks lõppenud. Poseerivad Andrus Ausmees, Ergo Nõmmiste, Agu Saar ja Arvo Kikas.



Osa oma doktoritöö materjalidest sai Ilmar Kink ka kiirekanalilt 52.

Dolgov jt, kes alustasid sekundaarergastuste sünni tagajärjel defektide tekke uuringuid VUV ergastusel kristallides ja määrasid erinevate ainete elektroonseid omadusi luminescentsentsmeetodite abil. Jätkusid resonantse Auger' spektroskoopia eksperimendid tahkistes kiirekanalil 22. Lisandus võimalus teha kontrollitavate omadustega tahkiste kilesid kohapeal *in situ* tingimustes. 1996. a algas koostöö Tampere Tehnoloogiaülikooli pinnafüüsika grupiga üliõhukeste kontrollitud omadustega nanokilede saamiseks ja uurimiseks.

1995. a tuli Lundi Indrek Martinsoni juhendamisele doktorantuuri Ilmar Kink, natuke hiljem asus Hamburgis doktorantuuri Vambola Kisand, kellest mõne aastaga kujunes ka tihe MAX-lab'i külalastaja. Samal aastal kaitses edukalt doktorikraadi Marco Kirm, kes pärast aastat Tartus Füüsika Instituudis siirdus järeldoktoriks Hamburgi Ülikooli prof Zimmereri töörühma (prof Zimmerer oli Marco oponent kaitsmisel). Samas töörühmas jõudis PhD kraadini ka Vambola Kisand, kes uuris elektronergastuste dünaamikat krüptooni kristallides. 1995. a kaitses edukalt oma doktorikraadi Oulus Edwin Kukk, kes selle järel siirdus järeldoktoriks Ameerikasse Berkeley'sse ALS sünkrotroni juurde.



Indrek ja Evi Martinson Marco kaitsmispeol.

Peab mainima, et aasta 1995 oli mitmeski mõttes murranguline. Mitte ainult selle poolest, et mitmed eelpoolmainitud noored teadlased oma kraadid edukalt kaitsesid, vaid ka sellepärast, et 1995. a avas Rootsi kuningas pidulikult MAX-II kogujaringi. Uue kolmanda põlvkonna ringi ehitus otsustati positiivselt aastal 1991 ning paari aasta pärast alustati MAX-I endise autoparkla kohale uue hoone ehitust. Kui MAX-I on nn teise põlvkonna kogujaring, kus elektromagnetkiirgus saadakse peasjalikult kallutusmagnetitest, siis kolmanda põlvkonna ringid, nagu ka MAX-II, on optimiseeritud rivi-magnetseadmete, undulaatorite ja viglerite kasutamisele. Õnneks uue



Marco Kirm on nüüd õnnelik doktori-diplomi omanik.

ringi ehitus eksperimente MAX-I ringil palju ei seganud, ainult kiirekanal 51 suleti MAX-II valmimisel, kuna see siirdati täielikult uuele kogujaringile. Modifitseerimiseks lisati mõned kiirekanali optika sõlmed, et soojuskoormust vähendada, ning monokromaatori võre vahetati välja vesijahutusega võre vastu.

1995. aastal MAX-lab'i kasutajate konverentsil oli meiega veel Mart Elango, kes aga 1996. a veebruaris oli kahjuks sunnitud alla vanduma pikaajalisele raskele haigusele.

## **MAX-I VAIKSELT HÄÄBUMAS, MAX-II (JA HILJEM MAX-III) ASUMAS TEMA KOHALE: AASTAD 1997–2009**

Pärast MAX-II kogujaringi valmimist läks veel aega, enne kui saadi uued kiirekanalid valmis ehitatud ja installeeritud. Selles protsessis oli üks kiiremini edenenuid kiirekanal I411, mis oli uuendatud kiirekanal 51, nagu



MAX-II on küll valmis, aga kiirekanaleid ei ole. Esimene, mis valmib, on kiirekanal I411.



Kiirekanal 22 on muutunud kiirekanaliks D1011 MAX-II ringil. Arvo Kikas demonstrib, et tegu on kõrgetasemelise teadustööga.

eelpool sai ka mainitud. MAX-II ringi ümbermõõt oli suurem kui MAX-I oma (97,2 m vs. 32,4 m), samuti ka elektronkimbu energia (1,5 GeV vs. 550 MeV). Ka ei pidanud uued undulaatorid olema integreeritud ringi vaakumsüsteemi, seega nende mõju elektronkimbu parameetritele oli tunduvalt väiksem kui MAX-I juures. Tänu elektronide suuremale energiale ringis suurenes ka kiirekanali I411 spektraalne ulatus – eksperimente sai teha footonitega energiaga 40–1500 eV. Kui MAX-II töö stabiliseerus, koliti ka kiirekanal 22 sinna – sellest sai kiirekanal D1011. Täht D nimetuses ütleb, et see kiirekanal sai footonid kallutusmagneti-



Kiirekanalil I511 on aktiivselt kristallide röntgenfluorestsentsi mõõtnas Tanel Käämbre ja Kuno Kooser.

test (dipoolmagnetitest, D), mitte ringi sirgetele löikudele seatud rivi-magnetseadmetest (*insertion devices*, I kiirekanali nime ees) nagu I411. Kuigi mõlemad, nii I411 kui D1011, omasid statsionaarseid mõõtejaamu (kiirekanalil I411 juba eespool kirjeldatud multifunktsionaalne spektromeeter kiirekanalilt 51, D1011 sai aga mõõtesüsteemi kiirekanalilt 22), jäeti kiirekanalile I411 1 m pikkune „vaba ruum“ enne statsionaarset lõppjaama ning sinna sai iga kasutaja paigutada soovi korral oma spektromeetri. Tänu sellisele lahendusele, mis algselt leidis küll tugevat vastuseisu, on võimalik kiirekanalil I411 teostada eksperimente, mis statsionaarse lõppjaamaga poleks olnud võimalikud.

Üheks uueks seadmeks MAX-II kogujaringil oli I511: kahe haruga kiirekanal, kus monokromaatorist tulnud kiirgus suunati peegliga ühte kahest erinevast eksperimendiseadmest. Üks nendest harudest oli varustatud röntgenfluoretsentsspektromeetriga, mis võimaldas registreerida ainet pärast primaarsete footonitega ergastamist väljunud röntgenikiirgust. Selle kiirekanali installeerimises ja käiku laskmises oli suur panus Tanel Käämbrel, kes Uppsala doktorandina suunati spetsiaalselt selle ülesandega MAX-lab'i, kus ta sulandus MAX-i kasutajate sõbralikku perre.

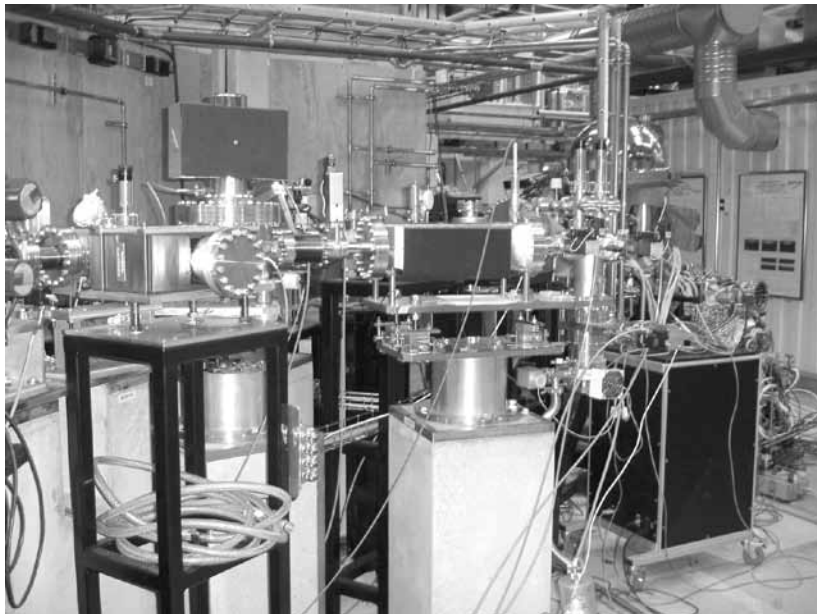
1999. a kaitses doktorikaadi aatomispektroskoopias Ilmar Kink, kes suundus pärast seda järel doktoriks Washingtoni.

Kanalil D1011 jätkusid eksperimendid, mis hakkasid üha rohkem keskenduma pinnafüüsikale. Koos Tampere pinnafüüsika grupiga (kes on eksperdid atomaarsel tasemel kiledes saamisel) jätkasime resonantse Auger' protsesside uurimist õhukestes kiledes ja kile ning substraadi vaheliste vastastikmõjude uurimist.

Aga ka tegevused MAX-I ringil ei lakanud. Prof Väino Sammelselja juhtimisel alustati eksperimente kiirekanalil 31, mis on skaneeriva fotoelektronmikroskoopia kiirekanal footoni energiaga 15–150 eV ja kiirekimbu suurusega 1,5  $\mu\text{m}$ . Seal asuti uurima muuhulgas  $\text{ZrO}_2$  ja  $\text{HfO}_2$  kiledes omadusi sõltuvalt kiledes moodustamise temperatuurist aatomkihtsade stuse reaktoris.

Kiirekanalil 52 alustasime koostööprojekti Oulu Ülikooli elektron-spektroskoopia töörühmaga molekulaarfaasis leelishalogeniidide (aurude) fragmentatsiooniprotsesside uurimiseks nii ioon- kui ka elektron-spektroskoopia meetoditega.

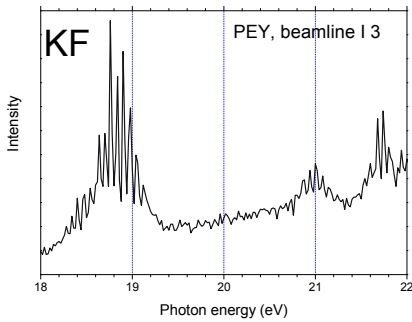
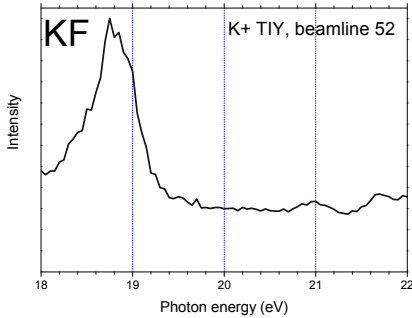
2008. aastal valmis MAX-is kolmas kogujaring MAX-III. Selles tiirlevate elektronide energia on 700 MeV, seega on see lähedane MAX-I ringi



MAX-III kogujaringil valminud kiirekanal I3 koos lisaharuga FINEST.

energiale. Selle ringi ehitamise motivatsioone oli mitu, üks nendest oli seotud tolelaegse tulevikuprojektiga MAX-IV. Nimelt otsustati katsetada selle ringi konstrueerimisel ja ehitamisel maailma mastaabis unikaalset magnetite monoliit tehnoloogiat, tänu millele on ringist väljunud kiirgus kontsentreerunud üliväikesesse ruuminurka, mis võimaldab saada ülimalt suure ereduse ja koherentsusega kiirgust nanofookusesse. Kuna ideed uue, neljanda põlvkonna kogujaringi konstrueerimiseks olid MAX-II valmimisel juba idanenud, kasutati seda ringi nende ideede praktiliseks testimiseks ja sobivate tehniliste lahenduste arendamiseks. Siin tuleb järjekordselt õnnitleda MAX-lab'i sünkrotronifüüsikuid, kes prof Mikael Erikssoni juhtimisel oma innovatiivsed ideed edukalt on suutnud realiseerida. MAX-III ringile siirdati ka MAX-I kiirekanal 33, mis oli välja ehitatud nurgasõltuvusega elektronemissiooni mõõtmisteks vaakum-ultraviolettpiirkonnas tahkistest. Nimeks sai uus kiirekanal I4. Kiirekanal I3 aga ehitati välja, et asendada suhteliselt tagasihoidlike võimalustega kiirekanal 52 MAX-I ringil. Sinna installeeritud normaallangemisega monokromaator kindlustab oma kolme





Lahutuste võrdlus kiirekanalite 52 ja I3 vahel. Mõõdetud on  $F^- 2p$  fotojoont  $K^+ 3p \rightarrow nl$  ergastusel KF molekulides.

Lahutuste võrdlus kiirekanalite 52 ja I3 vahel. Mõõdetud on  $F^- 2p$  fotojoont  $K^+ 3p \rightarrow nl$  ergastusel KF molekulides.

võreaga fotonite voo energiaga 5–50 eV ning lahutusvõimega rohkem kui 100 000. Nende parameetritega ületas ta kiirekanalit 52 mitme suurusjärguga ning pärast tema valmimist on eksperimendid kiirekanalil 52 praktiliselt lõppenud. I3 valmimisel oli kaalukas sõna öelda ka Oulu, Turu ja Tartu füüsikutel. Nimelt oli algselt kavandatud kiirekanalile I3 lõppjaam tahkiste mõõtmiseks (mitmete pooljuhtide tööstuses kasutatavate tehnoloogiliste seadmetega), eelpoolmainitud kolme ülikooli poolt moodustatud konsortsiumi ettepanekul ja finantseerimisel ehitati I3 juurde aga lisaharu, kuhu kasutaja saab paigutada omaenda eksperimendiseadme, olgu see siis gaasfaasi või luminesentsi mõõteseadme.

Selle lisaharu nimi tuletati projektis osalenud riikide nimedest – selleks sai FINEST. Antud lahendus on leidnud juba suurt positiivset vastukaja erinevate kasutajagruppide poolt ning esimesed mõõdetud spektrid on paljulubavad.

## MIDA TOOB TULEVIK?

Kui me alustasime oma töödega 20 aastat tagasi, oli sünkrotronide kasutamine kiirgusallikana suhteliselt vähe levinud ja episoodiline. Viimase kahekümne aasta jooksul on pilt totaalselt muutunud – sünkrotronikiirguse kasutamine teaduslikes eksperimentides on suurenenud plahvatuslikult. Hetkel töötab maailmas üle 75 sünkrotroni rohkem kui 20 000 kasutajaga aastas ja need arvud kasvavad pidevalt. Kui möödu-

nud sajandi üheksakümnendatel kasutasid sünkrotronkiirgust oma eksperimentides peaaesjalikult füüsikud, siis tänapäeval on kasutajate hulka lisandunud keemikud, materjaliteadlased, bioloogid, arstiteadlased, keskkonnateadlased, geoloogid, arheoloogid, kunstiteadlased jt. See tähendab, et pole eluvaldkonda, mida sünkrotronkiirgus ühel või teisel moel ei mõjutaks.

MAX-I käivitati aastal 1986 (ja on praeguseks sisuliselt amortiseerunud), MAX-II 1997, MAX-III 2008. Kuna kogujaringide eluiga tavatingimustes ei ületa 20–30 aastat, siis alustati uue kogujaringi projekteerimistöödega kohe, kui MAX-II oli käivitatud. Kuna oli selge, et praegusele asukohale uued osakeste kiirendid, mida hakati kutsuma MAX-IV kompleksiks, ära ei mahu, leiti uus krunt Lundi linna servas, umbes 1,5 km praegusest asukohast põhja suunas. Linnavalitsuse ja maaomanikega saavutati kokkulepped ammu enne rahastamisotsuse kinnitamist. 2005. a valmis mahukas kontseptuaalne konstrueerimisaruanne (*Conceptual Design Report*). Selle valmimisse kaasati MAX-lab'i kasutajate lai kogukond (ka allakirjutanu) ning seal esitati võimalike kiirekanalite ja lõppjaamade parameetrid ning adresseeritavad teadusprobleemid, mida on võimalik lahendada ainult selliste parameetritega kogujaringil. Selle dokumendi järgi valmib MAX-IV kompleksis kaks ringi: üks töötab elektronide energial 3,0 GeV ja teine 1,5 GeV. Esimene neist annab lühemalainelist, kalgimat kiirgust, mis on sobivam materia struktuuriuuringuteks, ja teine katab pikemalainelise piirkonna, mis on sobivam ainete elektroonsete omaduste määramisel. Tänu unikaalsele disainile, mis tagab elektronide kimbu eriti väikese ristlõike, omavad mõlemad nn nanofookuse omadusi, s.t sealt lähtuvat kiirgust on võimalik fokuseerida mõnekümnenanomeetrisesse piirkonda uuritaval objektil. Lisaks nii suurepärasele fokuseeringule on see kiirgus ka ülimalt koherentne, võimaldades efektiivselt teostada nanomeetriliste mõõtmega komplekside spektroskoopilisi uuringuid. Praegusel hetkel ei ole maailmas ühtegi analoogsete parameetritega ringi ja pole kuulda, et lähemal ajal ka tekiks.

Selle artikli kirjutamisega paralleelselt valmistasime ette taotluse MAX-IV kompleksile eesti kiirekanali konstrueerimise ja ehitamise lülitamiseks Eesti teaduse infrastruktuuri teekaardile (*road map*). Lootus on seda projekti rahastada Euroopa tõukefondide rahvusvahelisele koostööle suunatud vahenditest. Mis parameetritega ja milline kiirekanal täpselt ehitada, tuleb otsustada Eesti laiapõhjalise teadlasüldsuse poolt. Selles küsimu-



Selle pildi peale on jäänud osa FI töötajaid, kes on samal ajal ka aktiivsed MAX-lab'i kasutajad.

ses konsensuse saavutamiseks on plaanis korraldada mitmeid infopäevi ja ümarlaudu, mis kulmineeruksid suurema rahvusvahelise konverentsiga. Samuti tasub tähele panna, et Euroopa üks suurimatest teadusinfrastruktuuridest – neutronite allikas ESS (*European Spallation Source*) kogumaksumusega 1,5 miljardit eurot – on plaanis ehitada MAX-IV kõrvale. Sellega moodustub Põhja-Euroopa üks suurimaid tippteaduskeskusi koos teaduslinnakuga, kus hakkab oma uurimusi teostama tuhandeid tippteadlasi üle maailma. Omades sellises kompleksis oma teadusaparatuuri, paigutub väike Eesti väljapaistvale kohale Põhjala riikide peres. Loodame, et kõik need plaanid ka realiseeruvad.

Lõpetuseks suurimad tänud kõikidele kolleegidele, kes seda vankrit on vedanud.

Kõigepealt muidugi †Indrek Martinson;

Tartu füüsikud †Mart Elango, Rein Kink, Marco Kirm, Arvo Kikas, Vambola Kisand, Agu Saar, †Andrus Ausmees, Tanel Käämbre, Rein

Ruus, Ants Lõhmus, Kuno Kooser, Ilmar Kink, Aleksandr Luštšik, Vitali Nagirnõi, Eduard Feldbach, Sergei Dolgov jt;

Oulu Ülikoolist prof Seppo Aksela töörühm;

Uppsala Ülikoolist prof Svante Svenssoni töörühm;

Tampere Tehnoloogiaülikoolist prof Mika Valdeni töörühm;

Turu Ülikoolist prof Edwin Kuke töörühm

ja paljud teised. Samuti suurimad tänud prof Mikael Erikssonile, kes on need masinad disaininud ja ehitanud ja ilma kelleleta poleks seal ilmselt midagi sellist olnud.

# ELEMENTAAROSAKESTE KIIRENDITE OLEVIKUST JA TULEVIKUST

---

ILMAR OTS JA HANNES LIIVAT

TÜ Füüsika Instituut

## 1. SUURE HADRONITE PÕRGUTI HETKESEIS

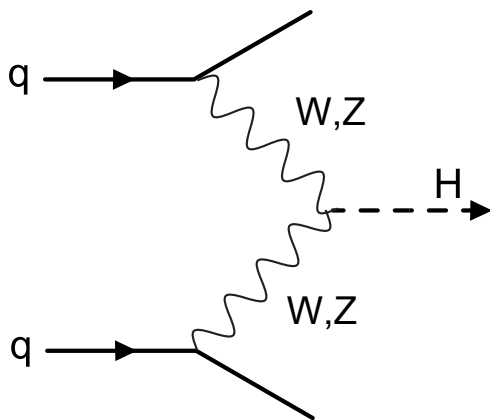
20. novembril 2009 käivitati Euroopa elementaarosakeste uurimise keskus CERN-is teistkordselt maailma võimsamaks projekteeritud tulevikukiirendi *Large Hadron Collider* (LHC) ehk, eesti keelde panduna, Suur Hadronite Põrguti. 27 kilomeetri pikkuses tunnelis pandi ringorbiitidele vastassuundades tiirutama kaks prootonite kimpu, esialgu küll veel üsna madala, viimasest eelkiirendist saadud 450 GeV-se (gigaelektronvoldise) energiaga kimbu kohta, mis annab pörkeenergiaks 900 GeV-i. 23. novembril registreeriti esimesed pörgete kandidaadid ja 6. detsembril, juba stabiilsete kimpude tingimusel, esimesed pörked. Teisipäev, 8. detsember oli ajalooline. Mõlema kimpu energia tõsteti 1,18 TeV-ni, millega LHC muutus maailma võimsaimaks kiirendiks, lüües senise suurima kiirendi, Chicago lähedal Fermilabis töötava prootoni-antiprootoni põrguti - Tevatroni - rekordi, mis on 0,98 TeV-i kimbu kohta. Samal päeval registreeriti ka esimesed pörkesündmused rekordilisel 2,36 TeV-sel pörkeenergial. 14. detsembril registreeriti juba hulgaliselt pörkeid. Selline oli LHC seis käesoleva artikli kirjutamise ajal.

Esimest korda pandi LHC tööle 10. septembril 2008, aga juba 17. septembril toimus avariid. Vale elektriühendus kahe osakeste trajektoore painutava magneti vahel viis rivist välja üle poolesaja magneti, kaotsi läks ka 6 tonni vedelat heeliumit. Osa magneteid õnnestus parandada, suur osa tuli välja vahetada. Avariid oli nii tõsine, et tagajärgede likvideerimisele kulus üle aasta. Aga see polnud ainus tagasilöökk LHC

ehitamisel. 27. märtsil 2007 kukkusid kokku fokuseerivaid magneteid hoidvad toed. Need olid projekteeritud liiga nõrkadena! Magnetite pa-randamine ja hoidetugede kindlustamine võttis peaaegu aasta ja lükkas 2007. aasta novembrisse plaanitud LHC stardi juba mainitud 10. sep-tembrini 2008. Nende tagasilöökide tõttu on LHC esialgselt ajagraafikust kaks aastat maha jäänud. Edaspidise ajakava järgi alustatakse käesoleva, s.o 2010. aasta algul operatsioon prootonite energia tõstmiseks 3,5 TeV-ni ja hiljem 5 TeV-ni jõudmiseks. Aasta lõpul pannakse kiirendi seisma ja algab töö kimpude energia tõstmiseks 7 TeV-ni. Selle, plaanitud täis-võimsusega saab LHC tööle hakata arvatavasti 2011. aasta keskpaiku. Tahaks loota, et suuri viperusi enam ei toimu. Sel juhul võib kiirendi anda usaldatavat teadusinformatsiooni juba käesoleval aastal, kuigi veel mitte maksimaalsete energiatega juures.

Elementaarosakeste füüsikud on LHC tööle hakkamist kaua ooda-nud. Suure võimsusega kiirendi puudumine on hakanud pärssima elementaarosakeste füüsika arengut. Teooria on eksperimendist ette jõudnud. Võimsamate kiirendite puudumine ei ole lubanud suurt hulka teoreetilisi mudeleid eksperimentaalselt testida. Nüüd oodatakse uuel-t kiirendilt, millel pörkuvad prootonid pörkeenergiaga 14 TeV-i, mis üle seitsme korra ületab senise parima pörnguti energiat, palju. Kõigepealt

loodetakse leida Higgsi välja kvant - Higgsi boson.



Joonis 1: Üks Higgsi bosoni tekkeprotsessidest LHC-l. Kvargid kiirgavad kas virtuaalsete erimärgiliste elektrilaengutega W-bosonite paari või neutraalsete Z-bosonite paari, millest tekib reaalne neutraalne Higgsi boson.

Tema avastamine kin-nitaks kehtiva elementaar-osakeste teooria - Stan-dardmudeli - üht oluli-semat väidet, nimelt hü-poteesi, et kõik osakesed, välja arvatud Higgsi bo-son ise, saavad oma mas-sid vastastikmõjust Higg-si väljaga. Kuna Higgsi bosoniga seotust teavad ühteteist ka teadusvälised ringkonnad, äratav see üldisemat huvi. Aga spet-sialistidele jagub veel hul-

ganisti põletavaid probleeme, mille lahtiharutamisel LHC-lt abi oodatakse: masside täpsem päritolu, miks alusosakesed on jaotatud kolme perekonda, elektronõrga sümmeetria rikkumise olemus, külma tumeaine koostis, Universumi barüonasümmeetria selgitamiseks vajalike uute CP-sümmeetria rikkumise allikate leidmine ja palju muud. Ühe lausega öelduna, loodetakse leida tuge paljudele Standardmudeli „taha“ minevatele teooriatele või siis nende ümberlukkamist.

Kuigi juba läinud sajandi 70-ndate alguses loodud Standardmudel on olnud kooskõlas kõigi seniste kiirendikatsetega<sup>1</sup> ja kuigi ka Higgsi boson võidakse leida, ei ole Standardmudel teooriana siiski rahuldav. Paarikümnet katses võetud parameetrit sisaldades on ta liialt empiiriline ega suuda vastust anda temast endast juhtuvatele olulistele küsimustele. Seetõttu on põhjust arvata, et LHC-le eelnevate kiirendite energiatest palju kõrgemal energiaskaalal eksisteerib hoopis fundamentaalsem, nn uus füüsika, millelt loodetakse saada vastuseid paljudele Standardmudelis vastuseta jäänud küsimustele. Standardmudel oleks siis selle uue füüsika lähend madalatel (seniste kiirendite) energiatel.

Uue füüsika olemasolu võib katses tuvastada kaheti – otseselt ja kaudselt. Uue füüsika olemasolu otseseks tõestuseks oleks kiirendiprotsessidest uue füüsika osakeste leidmine. Selleks peab osakeste pörkeenergia kiirenditel ulatuma uue füüsika energiaskaalasse. Aga õnneks võib uus füüsika ennast ilmutada ka juhul, kui pörkeenergiast jääb tema osakeste tekitamiseks vajaka. Uus füüsika võib endast märku anda väikeste kõrvalekalletena Standardmudeli poolt ennustatud suurustest kiirendiprotsessides, kus osalevad vaid senituntud, Standardmudeli osakesed. Nende pisikeste kõrvalekallete registreerimine eeldab kiirenditelt suurt katsetundlikkust. See, et seni töötanud või töötavad elementaariosakeste kiirendid pole kõrvalekaldeid Standardmudeli poolt ennustatust leidnud, lubab arvata, et nende katsetundlikkus on jäänud allapoole uue füüsika ilmingute leidmiseks vajaliku tundlikkuse künnist. Kuidas on lood LHC-ga? Oleks hea, kui tema 14 TeV-i suurusest pörkeenergiast piisaks uue füüsika energiamaailma tungimiseks ja seal mõne üliraske osakese kinnipüüdmiseks.

LHC katsetundlikkusega pole asjad nii head. LHC-l on küll tohutu suur statistika, nii suur, et selle töötlemiseks peavad arvutivõrgu GRID kaudu panuse andma tööühmad peaaegu üle terve planeedi, nende

1 Lahknevused Standardmudelist, nagu massiga neutriinode olemasolu ja mõned teised, ei ole seotud seniste kiirendikatsetega.

hulgas ka Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi töörühm Martti Raidali juhtimisel. Suur statistika tuleb katsetundlikkusele loomulikult kasuks. Kuid LHC-l, nagu ka kõigil teistel hadronite põrgutitel, on üks oluline puudus, mis katsetundlikkust tugevasti alla kisub. Selleks on kiirendiprotsesside algolekute suur määramatus. Väga kõrgetel energiatel, nagu see on LHC-l, ei pörku protonid kui tervikud, vaid nende koostisosad. Prootonid koosnevad teadupärast kolmest kvargist – kahest  $u$ - ja ühest  $d$ -kvargist. Nende, nn valentskvarkide seotud seisundina on proton „täidetud“ veel kvarke koos hoidvate virtuaalsete gluuonitega ja viimaste poolt tekitatud virtuaalsete kvargi-antikvargi paaridega. Nii võib protonite põrgatamisel sellest rohkete gluuonite ja kvarkide „supist“ ühe protoni mingi kvark pörkuda mingi teise protoni kvargiga, või kvark gluuoniga, või gluon gluuoniga. Millised on pörkuvate kvarkide või gluuonite liikumis-, spinn- või muud olekud, seda ei teata. Sellest siis ka määramatused.

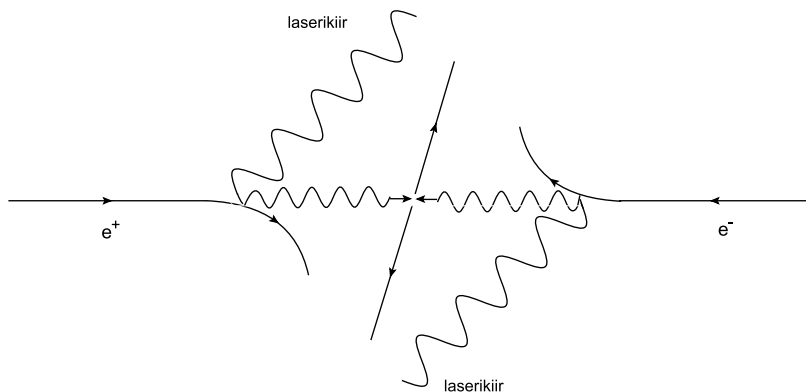
## 2. RAHVUSVAHELISEST LINEAARPÖRGUTIST

Eelpool vaadeldud hadronite põrgutite puudustest on vabad kiirendid, mis põrgatavad tõeliselt elementaarseid, struktuurita osakesi ehk alusosakesi, esmajärjekorras elektrone ja positrone kui ainukesi laetud stabiilseid vabas olekus eksisteerida võivaid alusosakesi. Sellepärast plaaniti lisaks Suurele Hadronite Põrgutile tulevikukiirendiks veel ka  $e^+e^-$  lineaarkiirendi – Rahvusvaheline Lineaarpõrguti, *International Linear Collider* (ILC). Hoolimata sellest, et temal plaanitud pörkeenergia on algetapil vaid 500 GeV ja seda saab tõsta ainult 1 TeV-ni, hoolimata sellest, et tema statistika jääb umbes 3 suurusjärku alla Suure Hadronite Põrguti omale, loetakse teda väga vajalikuks LHC-d täiendavaks kiirendiks. Sest kõrvuti ülalmainitud ja veel teistelegi allajäämistele on ILC-l võrreldes LHC-ga mitu olulist eelist. Esiteks, suure täpsusega saab määrata protsesside algolekuid. Suurt täpsust võimaldab asjaolu, et ILC-l pörkuvad puhtas keskkonnas täiesti vabad elektronid ja positronid. Teiseks on ILC-l toimuvaid elektronõrga vastastikmõju protsesse lihtsam arvutada kui LHC omi. Algolekute seotuse tõttu tuleb viimastes arvesse võtta tugeva vastastikmõju parandeid, aga tugevat vastastikmõju kirjeldava kvantteooria – kvantkromodünaamika – arvutused on üksjagu vaevanud. Kolmandaks, ILC-l on võimalik kasutada nii piki- kui ristpolariseeritud



elektronide ja positronide kimpe. Et polarisatsiooniefektid võivad teistega võrreldes olla tundlikumad nii Standardmudeli testimisel kui uue füüsika ilmingute suhtes, on ammu teada. Ja lisada tuleb veel üks ILC oluline eelis. Siin on mitu võimalust algkimpude valikuks. Peale elektroni ja positroni põrgatamist saab lisavarustuse ja ümberseadistamisega ILC-l põrgatada elektrone (positrone)  $\gamma$ -kvantidega või  $\gamma$ -kvante omavahel. See unikaalne võimalus saavutatakse laserite abil. Kui lasta kõrge energiaga elektronikimbule vastu laserikiirte kimp, põrkub see tagasi elektronkimbu liikumise suunas. Toimub protsess, mida nimetatakse Comptoni tagasihajumiseks. Elektron neelab footoni ja rikkudes sellega energia jäävuse seadust, muutub virtuaalseks. Et aga energia jäävuse rikkumise suurus ja aeg on määratud Heisenbergi määramatusega energia ja aja vahel ( $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ ), kiirgab ta selle peatselt jälle välja, aga juba võrreldamatult suurema energiaga. Neid  $\gamma$ -kvante võib põrgatada elektronidega ( $\gamma e$ -põrked) või omavahel ( $\gamma\gamma$ -põrked) (vt joonist 2).

Motivatsioon  $\gamma$ -kvantide põrgatamiseks on suur. Füüsika on siin rikas: kontrollida saab väga paljusid efekte.  $\gamma\gamma$ -põrkeenergia on  $e^+e^-$  põrgete energiast vaid 10–20% madalam (200 või isegi 225 GeV-sed  $\gamma$ -kvantide kimbud juba ILC algetapi 250 GeV-ste elektronkimpude korral!).  $\gamma\gamma$ -kiirendi heledus (ühikulist pinda läbivate osakeste arv ajaühikus) on küll  $e^+e^-$ -kiirendi omast natuke väiksem, vastavalt  $L_{\gamma\gamma} = 3,5 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



Joonis 2:  $\gamma\gamma$ -põrgete realiseerimine ILC-l. Kõrge energiaga  $\gamma$ -kiired saadakse laserikiirte Comptoni tagasihajumisel elektronkimpudelt.

ja  $L_{e^+e^-} = 2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , kuid samas on paljude  $\gamma\gamma$ -põrkeprotsesside ristlõiked  $e^+e^-$  omadest kuni suurusjärgu võrra suuremad. Nii et huvitavaid sündmusi on  $\gamma\gamma$ -põrkeprotsessides enamgi kui  $e^+e^-$  omades [1].

Tõepoolest, plaanitud ILC füüsika on erakordselt huvitav. Aga kahjuks on projekti elluviimine takerdunud. Plaanitud valmimisaega on edasi lükatud. Esialgse plaani kohaselt pidi kiirendi valmima selle sajandi teisel kümnendil. Nüüd räägitakse kolmandast aastakümnest. Isegi uue lineaarkiirendi asukohta pole veel kindlaks määratud. Ei teata, kas see peaks olema USA-s, Euroopas (CERN-is või Saksamaal) või Jaapanis. Ka ülemaailmne majanduskriis on jätnud oma jälje. Suurbritannia on oma osaluse ILC projektis juba peatanud. On karta, et projekti realiseerimine lükkub veel kaugemasse tulevikku või lihtsalt lõpetatakse. Eeskujusid on siin õige mitu, eeskätt Ülijuhtiva Superpõrguti nurjunud projekt.

### 3. ÜLIJUHTIVA SUPERPÕRGUTI NURJUNUD PROJEKTIST

Juba pikka aega arendatud Ülijuhtiva Superpõrguti (*Superconducting Super Collider* ehk SSC) projektile pani veto USA Kongress. Tööd selle kiirendi kallal algasid realselt 1988. aastal, kui tema asukohaõigus anti Texase osariigile. Sellest oleks saanud juba sajandivahetuseks maailma suurim, praegusest LHC-st palju võimsam kiirendi. 87,1-kilomeetrisel ringil oli kavandatud pörkuma panna kaks 20 TeV-st prootonite kimpu, mis oleks andnud peaaegu 3 korda suurema põrkeenergia kui LHC-l täie võimsuse juures. Kahjuks loobus USA Kongress 1993. a Superpõrguti ehitamisest. Peamiseks põhjuseks toodi liiga suur eelarve: esialgu plaanitud summa (4,4 miljardit USA dollarit) oli projekti lõpetamise momendiks paisunud peaaegu kolmekordseks. Oli aga palju muidki põhjuseid, nende hulgas teiste teadusharude esindajate kartus rahastamise vähenemise ees ja ka suure konkurendi kadumine pärast Nõukogude Liidu kokkuvarisemist. Projekti käigus oli kulutatud juba kopsakas summa eelarvest. Kaevatud oli ligi veerandsada kilomeetrit tunnelit 17 maa peale tuleva šahtiga. Olid komplekteeritud juba detektorite juures olevad uurimisrühmad. Ka kaks Eesti elementaarosakeste füüsikut (Hannes Uiibo ja Ilmar Ots) kuulusid ühe detektori uurimisgrupi ligi tuhandeliikmelisse koosseisu. Kahju, et projekt nurjus – realiseerumise korral oleksid paljud elementaarosakeste füüsika olulised probleemid praeguseks juba lahendatud.

## 4. HIIGELKIIRENDITE KRIIS

On huvitav, et peagi pärast SSC projekti lõpetamist hakati rääkima veelgi võimsamast hadronite põrgutist, mida nimetati Väga Suureks Hadronite Põrgutiks (*Very Large Hadron Collider*). Variante oli ja on mitmeid ning soovitud pörkeenergiate väärtused varieeruvad. Enamasti lähtutakse SSC energiast, aga seda tahetakse suurendada sadade TeV-deni. Tunnelite pikkused jõuavad pooltuhande kilomeetri taha. Kõiki neid mudeleid nimetatakse esialgu veel teoreetilisteks. Nendega tahetakse kontrollida selliste ülikiirendite tehnoloogilist võimalikkust ja projekteerimise teid. Et nendes mudelites pole põhimõtteliselt palju uut, võrreldes LHC või ebaõnnestunud SSC-ga, siis me neil pikemalt siin ei peatu. Meid huvitab vaid küsimus, kui kaugele võib selliste prootonite põrgutitega minna. Kus tuleb piir ja mis sellele piiri paneb?

Kiirendusega liikuv elektrilaenguga osake kiirgab elektromagnetilisi laineid, mida nimetatakse pärsskiirguseks. Kuna ära kiiratakse elektromagnetilised lained vähendavad kiirendatava osakese energiat, on sõna „pärskkiirgus“ omal kohal. Tegelikult on väga kõrgetel energiatel osakeste kiirendamisel kiiruse kasv üliväike. Toimub peamiselt vaid energia pumpamine osakestele. Nii on LHC-s prootonite kiirus 7 TeV-se energia korral 99,9999991% valguse kiirusest ja energia edasisel tõstmisel jääb kiirusele väga vähe kasvuruumi. Laetud osake liigub kiirendusega mitte ainult siis, kui tema kiiruse absoluutväärtus muutub, vaid ka siis, kui osakese kiiruse suund muutub. Seetõttu kasutatakse pärsskiirguse asemel ka terminit „sünkrotronkiirgus“. Nii emiteerib laetud osake pärsskiirgust ka liikudes kiirendiringil ühtlase kiirusega. Pärsskiirguse koguenergia ajahihikus ultrarelativistlike kiiruste korral on siis antud valemiga [2]

$$W = \frac{2}{3} \frac{e^2 c}{R^2} \left( \frac{E}{mc^2} \right)^4,$$

kus  $e$  on laengu suurus,  $E$  – osakeste energia,  $m$  – osakeste mass,  $c$  – valguse kiirus ja  $R$  – kiirendiringi raadius. Valemist näeme, et osakeselt ära kiiratud energia kasvab energia suurenemisega, kuid on seda väiksem, mida pikem on ringkiirendi tunneli raadius ja mida suurem on kiirendatava osakese mass. Sellepärast pikenevadki põrgutite tunnelid ja nendes kiirendatakse raskemaid osakesi – prootoneid ja ioone. Aga igal projekteeritaval kiirendil on oma piir. See tuleb seal, kus osakestele energia juurde pumpamisel pole

enam mõtet, sest pärsskiirgus viib selle pea täielikult ära. Mainigem siin, et Suur Hadronite Põrguti CERN-is kasutab oma eelkäija, Suure Elektroni-Positroni Põrguti (*Large Electron-Positron Collider* ehk LEP) kiirenduskanalit. Et pärsskiirguse energia on pöördvõrdeline kiirendatava osakese massi neljanda astmega, tuli kergete elektronide ja positronide kiirendamisele siin piir üsna ruttu vastu: alates 209 GeV-sest pörkeenergiast ei anna osakestele energia juurdepumpamine enam „tulu“. Sellepärast siis ka ILC projekt.

Viimase poolsajandi jooksul on elementaarosakeste kiirendeid arendatud põhiliselt sarnaste tehnoloogiatega, suurendades enamasti vaid kiirendite mõõtmeid. Nüüd näib, et on jõutud sinnamaani, kust niimoodi edasi minna pole võimalik. Kui ka sadade kilomeetrite pikkuseid kiirenduskanaleid saaks veel kusagile paigutada, paneb siin piiri taoliste kiirendite hind. Senistest võimsamaid kiirendeid läheb elementaarosakeste uurijatel kindlasti küll vaja, kuid need peavad olema palju väiksemad, odavamad ning sellega seoses ka kiiremini ehitatavad.

## 5. VALGUSE RÕHK JA LASERKIIRENDID

Viimasel kolmel aastakümnel on hakatud arendama projekte, mis toetuvad laserkiirte kasutamisele osakeste kiirendamisel. Osutub, et teatud tingimustel on laserkiirenditel võimalik saavutada tavakiirenditega võrreldes tuhandeid kordi suuremaid kiirendusgradiente, mis võimaldaks kiirendite mõõtmeid oluliselt vähendada. Kiirendusgradiendi tõstmisele aitab teiste faktorite kõrval tõhusalt kaasa ka asjaolu, et energiakaod pärsskiirguse näol on laserkiirendite korral hoopis väiksemad või puuduvad üldse. Laserkiirendite võime osakesi kiirendada põhineb kiirgusrõhul. Ligi 400 aastat tagasi, 1619. aastal kirjutas Kepler esimesena, et valgusel võib olla rõhk [3]. Valguse rõhuga põhjendas ta, miks komeetide sabad suunduvad Päikesest eemale. Hilisem Newtoni valguse korpuskulaarteooria suures osas kirjeldas Kepleri hüpoteesi usaldatavust ja ärgitas valguse rõhku mõõtma. 18. ja 19. sajandi jooksul püütigi seda korduvalt teha, kuid kõik katsed ebaõnnestusid. Kui vahel juba arvatigi, et valguse rõhk on katsega tuvastatud, osutus, et mõõdetud oli tegelikult valguse soojusefektidest tingitud radiomeetrilisi jõudusid. Elektromagnetvälja Maxwelli teooria (19. saj teine pool) kinnitas valguse rõhu olemasolu ja andis võimaluse arvutada ka tema väärtus. Viimane osutus üliväikeseks, 4–5 suurusjärku pisemaks ülalmainitud katsetes mõõdetud radiomeetrilistest jõududest. 20. sajandi

algusaastatel õnnestus ameeriklastel Nicholsil ja Hullil [4] ning venelasel Lebedevil [5] valguse rõhk radiomeetristest jõududest isoleerida ja tema väärtust mõõta. See langes kokku Maxwelli teooria ennustusega. Imeväike valguskiirguse jõud ei väärinud edaspidi teadlaste tähelepanu – kuni 1960. aastani, mil leiutati laser. Laserikiir on harilikust valgusest palju koherentsem, monokromaatsem ja intensiivsem. Teda saab koondada täppi, mille raadius on lähedal võimalikule teoreetilisele piirile – laserivalguse lainepikkusele. Seal võib isegi üsna nõrga, mõnevõimsusega laseriga saavutada intensiivsuse, mis on 10 tuhat korda suurem kui vastav valguse intensiivsus Päikese pinnal [6]. Laserikiirguse rõhku mõõtis Ashkin tosin aastat pärast laseri leiutamist [7]. Lihtne arvutus näitas, et ka vaid võimsusega argoonlaseri kiir lainepikkusega  $\lambda=0,5145$  mikronit fokuseerituna ühikulise tihedusega dielektrilisele sfäärilisele kehale raadiusega  $\lambda$  ja peegeldumiskoeffitsendiga 0,1 annab Newtoni seaduse järgi kehale gravitatsioonikiirendusest  $g$  koguni  $10^5$  korda suurema kiirenduse. Selliste, teoreetiliste mudelite ennustatud tulemusteni pole reaalsetes katsetes võimalik jõuda, sest nendel tingimustel sulatab laserikiir osakese otsekohe ära. Tuli kasutada üpris nõrka laserit (10 millivati ringis) ja läbi paistvaid dielektrilisi mikroniliste mõõtmetega plastikust kuulikesi. Kuigi peegeldumiskoeffitsent selliste osakeste pinnalt on üliväike, piisas sellest täielikult arvestatavate jõudude tekitamiseks. Kui laserikiir juhiti sellistele mõne mikroni suurustele osakestele veetilgas, võis läbi mikroskoobi vaadates näha, kuidas osakesed kiire levimise suunas liikuma hakkasid.

Ashkini osakeste suurusi mõõdeti mikronites. Meid huvitab, kuidas mõjutab laserikiir tõelisi kiirendiosakesi – näiteks elektrone. Elektronile kui elektrilaenguga osakesele võivad laserikiired mõju avaldada meil juba jutu all olnud Comptoni hajumise kaudu. Et Comptoni protsessi

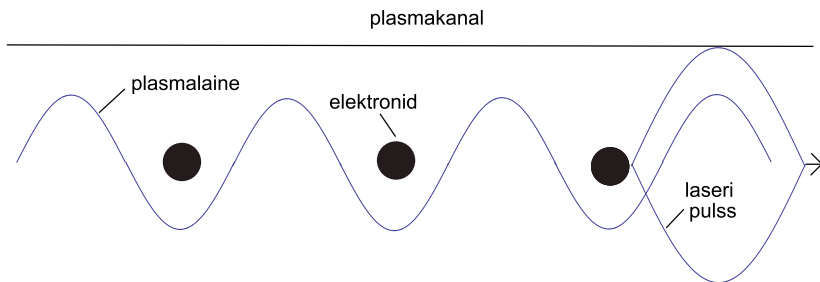
$$\gamma + e \rightarrow e + \gamma$$

lõppolekus on vaid üks  $\gamma$ -kvant, on selge, et sellise kiirendusmehhanismiga ei kaasne pärsskiirgust.

## 6. LASER-PLASMA KIIRENDID

Elektronide kiirendamine Comptoni protsessiga on võimalik, kuid vähemalt praegu arvatakse, et „kolides“ vaakumkiirendustorudest ainega

täidetud torudesse, võib leida palju efektiivsemaid kiirendusmehhanisme. Omal ajal tegi elektroonika pooljuhtidesse kolimisega tohutu arenguhüppe, drastiliselt vähenesid seadmete mõõtmed. Veel pool sajandit tagasi suuri ruume täitnud arvutihiiglaste asemel on meil praegu võrreldamatult võimsamad, kuid hoopis väiksemad lauarvutid ja laptopid. Nüüd arvatakse, et sarnase arengu võib teha ka kiirenditeadus, jõudes kümnete kilomeetrite pikkuste kiirendite asemel toa- või isegi lauakiirenditeks – *tabletop*-kiirenditeks. Perspektiivseks aineks, kuhu on kolitud, peetakse plasmata – ioniseeritud gaasi väga suure arvu vabade elektronidega. Plasmakeskkond on atraktiivne, kuna ta suudab hoida väga tugevaid elektrivälju. Plasma kasutamisel põhineva laserkiirendi kontseptsiooni lõi üle 30 aasta tagasi Tajima ja Dawson California Ülikoolist [8]. Plasmakiirendites muudetakse laserikiire elektromagnetiline energia plasma kaudu elektronide kineetiliseks energiaks. Tajima ja Dawson näitasid, et ergastades plasmata intensiivsete lühikeste laserpulssidega, võib analoogselt laevade kiiluveega nende pulsside taha plasmasse tekitada „kiiluplasma“ ehk „kiilulaine“. Need plasmalained – ruumlaengu ostsillatsioonid – genereerivad väga tugevaid elektrivälju, mitmeid suurusjärke tugevamaid kui tavakiirendite raadiosageduslikud väljad. Kiilulainete tekitamine saab alguse sellest, et laserpulsi ponderomotoorse jõu mõjul tõugatakse plasmaelektronid pulsi liikumisteelt ära. Samas jäävad raskemad ja seetõttu vähemobiilsed ioonid laserpulsi teele. Teatud kaugusel laserpulsi taga tõmbab nende ionide staatiline väli teelt välja löödud elektrone tagasi. Need kuhjuvad ja tulemusena kujunevad laserpulsi taha vahelduvad negatiivse ja positiivse laenguga alad – kiilulained (vt joonist 3).



Joonis 3: Kiirendamine plasmakeskkonnas. Elektronid laserpulsi järel kiilulainetel surfamas.

Plasmalained on ülirelativistlikud: nende faasikiirus, olles võrdne laserpulsi rühmakiirusega, on valguse kiirusele väga lähedal. Kiilulained tõmbavad endasse lõksu vabu plasmalektrone, mis siis relativistlikel lainel surfates võivad jõuda väga kõrgete energiateni. Tajima ja Dawson väidavad, et kasutades  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> võimsustihedusega lasereid, võib plasmatiheduse (vabade elektronide arv ruumalaühikus)  $10^{18}$  cm<sup>-3</sup> korral jõuda kiirendusgradientideni GeV-des 1 cm kiirendustee kohta. Sellise kiirendusgradiendiga (võtame konkreetselt 1 GeV/cm) võib vähemalt teoreetiliselt jõuda plaanitud tavakiirendi ILC pörkeenergiateni (500 GeV kimbu kohta), kasutades vaid 5 meetri pikkust kiirendustoru! ILC oma tavakiirenditele omase 10–15 MeV/m kiirendusgradiendiga nõuab 30–50 km pikkust kiirendusteed. Tajima-Dawsoni kiirendusmehhanismi kutsutakse inglise keeles *wake-field acceleration* ja kiirendeid *wake-field accelerator*. Eesti keeles võiks vasteteks olla vastavalt kiiluvälja kiirendus ja kiiluvälja kiirendi. On näidatud [9], et kiiluvälja kiirendus toimib praktiliselt ilma pärsskiirguslike kadudeta: pärsskiirgusega ära kiiratud energia hulk on

$$\gamma_f = 1 / \sqrt{1 - v_f^2 / c^2}$$

korda väiksem kui tava-lineaarkiirenditega kiirendades. Selles valemis on  $v_f$  plasmalaine faasikiirus. Et see, nagu juba öeldud, läheneb valguse kiirusele  $c$ , on  $\gamma_f$  väga suur ja pärsskiirgus vastavalt väga väike.

Tajima ja Dawson demonstreerisid kiiluvälja kiirendusmehhanismi arvutisimulatsioonidega. Kas aga reaalselt töötavate, elementaarosakeste füüsikutele vajalike väga kõrgete energiatega kimpe tootvate kiiluvälja laserkiirendite ehitamine on võimalik? Ja katsete jaoks ei piisagi pelgalt osakeste kõrge energiast. Katseks vajatakse tihedaid, paljudest osakestest koosnevaid kimpe, milles osakeste energiad on suure täpsusega võrdsed: kvaliteetses kimbus peaks olema umbes  $10^{10}$  osakest ja energiakõikumised peaksid jääma alla 1%. Niisuguste kvaliteetsete kimpude tekitamine osutus esialgsetes katsetes väga raskeks. Polnud küll raskusi Tajima-Dawsoni pakutud kiirendusgradientideni jõudmisega: mõne millimeetri pikkusel teel kiirendati elektrone 100–200 MeV-ste energiateni [10]. Kuid elektronkimbud olid pea 100% ( $\delta E / E = 1$ ) laiaili määratud, mis tähendas, et vaid väga väike arv kimbu elektronidest jõudis maksimaalse energiani. Ja ainult mõnemillimeetrilise kiirendusteeni jõudmine ei vastanud kindlasti ootustele. Edaspidi hakkasid elektronkimpude kvaliteedi tõstmiseks tehtud pingutused vilja kandma. Esmalt õnnestus paremaks

kohendada kimpude energijaotust. Osutus, et energijaotus sõltub suuresti laserikiirte ja plasma omadustest, täpsemalt nende omaduste vahekorrast. Olulisteks, omadusi määravateks parameetriteks on siin laserpulsi pikkus ja energia ning plasmalelektronide tihedus, mis määrab plasmalainete pikkuse. Varieerides parameetrite kombinatsioone ning kasutades muidki võtteid jõudsid kolm uurimisrühma – üks Suurbritanniast Kruschelnicki juhtimisel [11], teine USA-st Berkeley'st Leemansi juhatusel [12] ja kolmas Prantsusmaalt Malkaga eesotsas [13] – 2004. aastal murranguni. Kuigi kiirendamine toimus veel millimeetriskaalal ja vaid energiateni 70–200 MeV-i, kõikusid elektronide energiad kimpudes vaid mõne protsendi piires ja ka osakeste arv kimbub rahuldab katse vajadusi. Teine puudus – väga lühike kiirendustee – seisis selle taga, et ei suudetud tagada millimeetriskaalast kaugemale ulatuvat kvaliteetset laserikiirgust. Peab ütleva, et ka siiani puudub kindel kontrollitav meetod fokuseeritud laserpulsi millimeetritest oluliselt pikematele distantsidele edasi kandmiseks. Mõningat edu on siiski saavutatud. Et kiirendada elektrone GeV-Ste energiateni, läinuks vaja sentimeetrites mõõdetavaid kiirendusdistantse. Arvati, et selleks vajatakse petavatt-klassi lasereid. 2006. aastal näitasid aga Berkeley labori töötajad Leemansi juhtimisel, et piisab ka vähem võimsast laserist [14]. Kasutati 3,3 cm pikkust ja väga peenikest, 0,31 mm diameetriga, vesinikuga täidetud kiirendustoru. Läbi selle lasti elektrivool, mis tekitas torusse plasmakanali. Kanalisse suunatud 40 TW laseri kiirguse mõjul toimus kiiluvälja kiirendus, tekitades toru otsas 1 GeV-i energiaga ja katseks vajaliku kvaliteediga elektronide kimbub. Siit nõutavate energiateni jõudmine on küll veel pikk tee, kuid mööda seda tahetakse kindlasti edasi minna. Leemansi uurimisrühm sai selleks ka esialgse rahasüsti. Suuri lootusi eesmärkideni jõudmiseks pannakse võimsale petavatt-laserile BELLA, mida kavatakse ehitada. BELLA nime kannab ka kogu projekt (*Berkeley Lab Laser Accelerator*). Eesmärgid ei ole väikesed: BELLA-ga kavatakse 30–80 cm pikkusel kiirendusteel saada 10 GeV-seid elektronkimpe ja edaspidi on plaanis kümne sellise seadme abil jõuda 100 GeV-Ste kimpudeni.

## 7. ELEKTRON-PLASMA KIIRENDID

Siiamaani rääkisime laser-plasmakiirenditest, kus elektrone veavad kõrgete energiateni laserpulsid. Kuid kiiluvälja kiirenduse tekitamiseks plas-



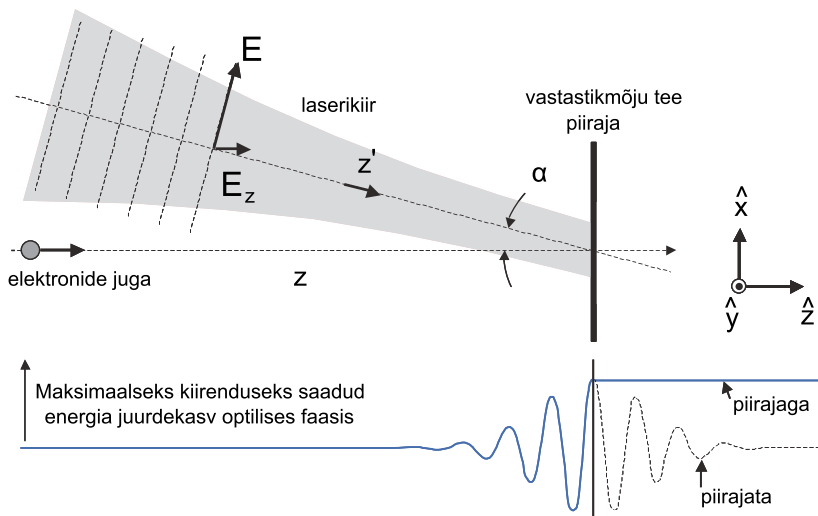
mas võib laserikiirte asemel kasutada ka kõrgete energiatega elektronkimpe. Elektronkimpude kasutamise idee tekkis väidetavalt laser-plasma kiirendi kontseptsiooni ühel loojal Dawsonil läinud sajandi 80-ndate aastate algul [15]. Artiklina vormistati idee mõned aastad hiljem [16]. Kiiluväljade tekitamise mehhanism on siin analoogne eespool kirjeldatud laser-plasma kiirendite omaga. Ainult et laserpulsside ponderomotoorsete jõudude asemel tõrjutakse plasmaelektronid kõrge energiaga elektronkimbu teelt selle kimbu ruumlaengu toimele. Kiilulainete faasiikiirus on siin võrdne plasmasse lastud elektronkimbu rühmakiirusega. Kui tavakiirendist tulev kimp on kõrge energiaga, nagu eeldatud, on selle rühmakiirus valguse kiirusele väga lähedal, mis tähendab, et ka selle meetodiga tekitatud plasmalained on ülirelativistlikud. Praegustest kõrge energiaga elektrone tootvatest kiirenditest on võimsaim USA-s Stanfordi kiirendikeskuses SLAC-is (*Stanford Linear Accelerator Center*) olev Elektroni-Positroni Lineaarõrguti, millel osakeste pörkeenergia küünib 90 GeV-ni. 2007. aastal juhtisid SLAC-i eksperimentaatorid mainitud kiirendiga tekitatud 42 GeV-se energiaga elektronkimbud 85 cm pikkusesse gaasiga täidetud kiirendustorusse, kus kiiluvälja mehhanismiga kiirendati plasmaelektronid kiirendustee lõpuks 85 GeV-ste energiateni [17]. Vähem kui meetrisel kiirendusteel oli 42 GeV-ste tavakiirendi elektronide asemel saadud kaks korda kõrgemate energiatega elektronkimbud. Oli püstitatud kaks plasmakiirendite rekordit, millest laser-plasmakiirendite omad jäävad üsna kaugele maha. Rekorditeks on kiirendustee pikkus (85 cm) ja sellel saadud plasmaelektronide energia (85 GeV). Ka kiirendusgradient, 1 GeV/cm oli hea. Mis aga hea polnud, oli kiirendatud elektronkimbu kvaliteet. Ainult väike osa kimbust jõudis mainitud 85 GeV-se energiani. Ülejäänud elektronide energia oli palju madalam. Aga uurimisrühm töötab edasi ja on selleks ka raha saanud. Projekt kannab nime FACET (*Facilities for Accelerator Science and Experimental Test Beams*). Lähemaks eesmärgiks ongi võetud kiirendatud elektronkimbu kvaliteedi parandamine.

## 8. VAAKUM-LASERKIIRENDID

Eespool tõdesime, et enamik uurijaid eelistab tulevikukiirendite arendamisel vaakumile plasmakeskkonda. Siiski on ka neid, kes uurivad laserkiirendite võimalusi elektronide kiirendamiseks vaakumis. Ka nemad on

mõningat edu saavutanud, kuigi mitte nii suurt kui plasmakiirendite arendajad. Kiirendusgradientidega on jõutud vaid tavakiirendite tasemeni ja elektronkimpude energiad on veel plasmakiirendite omadega võrreldes üsna väikesed. Stanfordini Ülikooli ja SLAC-i uurijad jõudsid [18] kiirendusgradiendini 40 MeV/m, millega kiirendati elektronkimpe mõnemillimeetriseel teel 30 keV-ni (kiloelektronvoldini). Tulemused näivad olevat väga tagasihoidlikud, kuid ometi on töö novaatorlik. Siin on demonstree-ritud uut kiirendusmehhanismi, milles on kaks tähtsat elementi. Esiteks on elektronide kiirendamiseks kasutatud laseri elektrivälja elektronide liikumisega paralleelset komponenti – pikikomponenti. Selleni jõutakse, kui lastakse laserpuls elektronkimbule nurga all (vt joonist 4).

Teise uudse elemendina kasutatakse laserikiire ja elektronide vastastikmõju tee piiramist. Asi on selles, et elektronidele antud energia vastab integraalile elektrivälja pikikomponendist (joonisel  $E_z$ ) üle laserikiire ja elektronkimbu vastastikmõju tee. Kuid on tõestatud, et viimase kulgemisel lõpmatuseni integreerub elektroni kiirendus nulliks [19]. Vastastikmõju piiramine, mida katses tehakse sobival kohal ülekullatud teibi abil, tagab nullist erineva energia ülekande laserilt osakesele. Katses kasutati laserit lainepikkusega 800 nm ning laserpulssi kestusega 4 ps.



Joonis 4: T. Plettneri jt [18] eksperiment elektronide kiirendamisest vaakumis. Vastastikmõju tee piiramine võimaldab energia ülekande kiirendatavatele elektronidele.

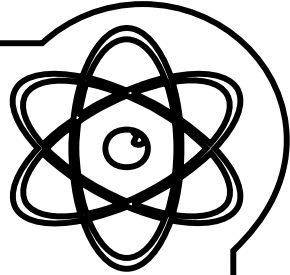
## 9. KOKKUVÕTE

Kõik siin kirjeldatud ja veel suurem hulk kirjeldamata jäänud eksperimente on kontrollitud teoreetiliselt arendatud võimalikke kiirendusprintsipi ja mehhanisme. Inglise keeles kutsutakse neid *proof-of-principle*-eksperimentideks. Need eksperimentid on näidanud, et teoreetilised printsipi ja mehhanismid töötavad ka tegelikkuses. Nad on kasvatanud teadlaste usku kompaktsete, kuid praegustest kiirenditest võimsamate ja palju odavamate tulevikukiirendite ehitamise võimalikkusesse. Siin-kirjutajad on lähtunud vaid elementaarosakeste ehk kõrgete energiatega füüsika seisukohtadest. Ja siingi rääkisime vaid tuleviku elektronide kiirenditest, kuigi pingutatakse ka kompaktsemate  $\gamma$ - ja ioonikiirendite loomise nimel. Aga võimsate, kompaktsete ja odavate tulevikukiirendite ehitamise võimalikkus pole pelgalt elementaarosakeste füüsika küsimus. Neid vajavad hädasti meditsiin, tööstus, bio-, materjali-, keskkonnateadused ja veel müriaad teisi alasid. Nii et üldsus ei tohiks nuriseda, kui tulevikukiirendite teooria ja katseseadmete arendamiseks esmapilgul nähtuna suuri summasid eraldatakse. Seda enam, et suur osa kompaktsete ja odavate kiirendite vajajate pikas reas rahuldub osakeste kimpudega, mille energiad ulatuvad vaid sadade MeV-deni, mitte sadade GeV-deni või TeV-deni. See tähendab, et projektide õnnestumise korral jõutakse neile vajalike *tabletop*-kiirenditeni hoopis varem kui elementaarosakeste füüsikas nõutavateni.

## VIITED:

- [1] V.I. Telnov, arXiv:0712.3399 (2007).
- [2] A.A. Соколов, И.М. Тернов, Релятивистский электрон, Москва, Наука, 1974.
- [3] J. Kepler, De Cometis, Augustae Vindelicorum, Opera Omnia, 1619.
- [4] E.F. Nichols, G. F. Hull, Phys.Rev. 13 (1901), 307; 17 (1903), 26; 17 (1903), 91.
- [5] P. Lebedew, The Astrophysical Journal 31 (1910), 385.
- [6] A. Ashkin, Scientific American 226 (1972), 63.
- [7] A. Ashkin, Phys. Rev. Lett. 24 (1970), 156.
- [8] T. Tajima, J.M. Dawson, Phys. Rev. Lett. 43 (1979), 267.

- [9] T. Katsouleas, J.M. Dawson, *Phys. Rev. Lett.* 51 (1983), 392.
- [10] V. Malka, et al, *Science* 298 (2002), 1596.
- [11] K. Krushelnick, et al, *Nature* 431 (2004), 535.
- [12] W.P. Leemans, et al, *Nature* 431 (2004), 538.
- [13] V. Malka, et al, *Nature* 431 (2004), 541.
- [14] W.P. Leemans, et al, *Nature Physics* 2 (2006), 696.
- [15] C. Joshi, *Physics of Plasmas* 14 (2007), 055501.
- [16] P. Chen, J.M. Dawson, R.W. Huff, T. Katsouleas, *Phys. Rev. Lett.* 54, (1985), 693.
- [17] I. Blumenfeld, et al, *Nature* 445 (2007), 741.
- [18] T. Plettner, et al, *Phys. Rev. Lett.* 95 (2005), 134801.
- [19] J.D. Lawson, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 26 (1979), 4217.



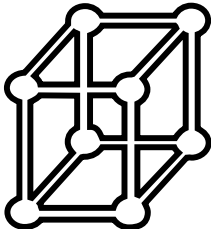
**XXXIX  
EESTI  
FÜÜSIKAPÄEVAD**

**JA**

**XXXI  
FÜÜSIKAÕPETAJATE PÄEVAD**

**17. JA 18. MÄRTS 2009**

**TARTUS**



**17.–18. MÄRTS 2009. A**  
**TARTU ÜLIKOOLI FÜÜSIKAHOONE**  
**SUUR AUDITOOORIUM**

**TÄHE 4, TARTU**

**TEISIPÄEV, 17. MÄRTS**

AVASESSIOON

Avasõnad . . . . .	10.15
EFS preemiate kätteandmine, aastapreemia laureaadi ettekanne . . . . .	10.30
<b>Els Heinsalu</b> (KBFI)	
Difusioonist jõuväljades ( <i>Kandis ette Andi Hektor (KBFI)</i> ) . . . . .	10.30
<b>Stefan Groote</b> (TÜ FI)	
2008. a Nobeli füüsikapreemia. . . . .	11.30
Stendiettekanded, lõunapaus, EFS juhatuse koosolek . . . . .	12.15
<b>Henn Käambre</b> (TÜ FI)	
Universum kui oksüümoron. . . . .	13.15
<b>Ergo Nõmmiste</b> <sup>1</sup> , <b>Indrek Martinson</b> <sup>2</sup> ( <sup>1</sup> TÜ FI, <sup>2</sup> Lundi Ülikool, Rootsi)	
20 aastat eksperimente MAX-lab'is. . . . .	13.35
<b>Andi Hektor, Yuji Kajiyama, Kristjan Kannike, Martti Raidal</b> (KBFI)	
Tumedad tegelased osakestefüüsikas ja kosmoloogias . . . . .	14.05
<b>Hannes Tammet, Urmas Hörrak</b> (TÜ FI)	
Nanomeeterosakeste tekkimine vee pritsimisel . . . . .	14.25
<b>Urmas Kvell, Ilmar Ansko, Tõnis Eenmäe, Siim Meerits, Priit Laes, Kaupo Voormansik, Katrin Tuude, Jüri Ruut, Silver Lätt, Mart Noorma</b> (TÜ FI)	
Tartu Ülikooli satelliitside keskuse raadioühendused . . . . .	14.55
<b>Raamatuesitlus:</b> Harald Keres „Sajandi seiklused: väljavõtteid autobiograafiast“ (Tartu: Ilmamaa, 2009)	
<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

- Daniel Kropman<sup>1</sup>, Tiit Kärner<sup>2</sup>, Ivo Heinmaa<sup>3</sup>, Tõnu Laas<sup>4</sup>, Arthur Medvid<sup>5</sup>** (<sup>1</sup>TTÜ, <sup>2</sup>TÜ FI, <sup>3</sup>KBFI, <sup>4</sup>TLÜ, <sup>5</sup>Riia Tehnikaülikool)  
 Interaktsioon punktdefektide ja lisandite vahel süsteemis Si-SiO<sub>2</sub> ja nende mõju piirpinna omadustele ..... 11.30
- Heli Valtna-Lukner<sup>1</sup>, Madis Lõhmus<sup>1</sup>, Peeter Piksarv<sup>1</sup>, Peeter Saari<sup>1</sup>, Pamela Bowlan<sup>2</sup>, Rick Trebino<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>TÜ FI, <sup>2</sup>Georgia Institute of Technology, USA)  
 Valgusimpulsside difraktsiooni ja ülevalguskiirusega levi uurimine femtosekundilise ajalise ja mikromeetrilise ruumilise lahutusega ..... 11.45
- Sander Mirme<sup>1</sup>, Andreas Minikin<sup>2</sup>, Toomas Bernotas<sup>1</sup>, Margus Eller<sup>1</sup>, Meelis Eller<sup>1</sup>, Aadu Mirme<sup>1</sup>** (<sup>1</sup>TÜ FI, <sup>2</sup>Saksa Öhu- 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<sup>1,2</sup>, Henn Voolaid<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>KVÜÕA, <sup>2</sup>TÜ 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)

Virtuaalõppesest . . . . .	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
<b>Märt Aints, Matti Laan, Peeter Paris</b> (TÜ FI)	
Laserindutseeritud plasmaspetspektroskoopia termotuuma- programm . . . . .	14.30
<b>Marko Kaasik<sup>1</sup>, Mikhail Sofiev<sup>1,2</sup>, Marje Prank<sup>2</sup>, Mirjam Paales<sup>1</sup></b> ( <sup>1</sup> TÜ FI, <sup>2</sup> FMI)	
Keemilise ilma mudelid ja prognoos . . . . .	14.55
<b>Ergo Nõmmiste</b> (TÜ FI)	
MAX-III kogujaringil asuva vaakumultavioletti kiirekanali I3 jätku- kanal FINEST – Oulu, Turu ja Tartu Ülikoolide ühisprojekt . . . . .	15.25

## STENDISESSIOON

<b>Priit Jaanson<sup>1,2</sup>, Riho Vendt<sup>1,2</sup>, Viktor Vabson<sup>1,2</sup>, Toomas Kübarsepp<sup>1</sup>, Mart Noorma<sup>2</sup></b> ( <sup>1</sup> Eesti Metroloogia Keskasutus – AS Metrosert, <sup>2</sup> TÜ FI)	
Termokaamera näidu sõltuvus mõõdetava objekti kaugusest	
<b>Dmitri Martila<sup>1</sup>, Risto Tammelo<sup>1</sup>, Romi Mankin<sup>2</sup>, Astrid Rekker<sup>2</sup></b> ( <sup>1</sup> TÜ FI, <sup>2</sup> TLÜ)	
Müra tasasuse poolt indutseeritud stohhastiline transport kallutatud tükkade lineaarsetel potentsiaalidel	
<b>Artjom Vargunin, Teet Örd, Risto Tammelo</b> (TÜ FI)	
Faasisiirde ja stohhastilise resonantsi komplementaarsus lõpliku ruumalaga süsteemides	
<b>Riho Vendt<sup>1,2</sup>, Viktor Vabson<sup>1,2</sup>, Toomas Kübarsepp<sup>1</sup>, Mart Noorma<sup>2</sup></b> ( <sup>1</sup> Eesti Metroloogia Keskasutus – AS Metrosert, <sup>2</sup> TÜ FI)	
Vee kolmikpunkti temperatuuri realiseerimise metrooloogiline jälgi- tavus Eestis	
<b>Kalle Kepler, Arvi Freiberg</b> (TÜ FI)	
Education and research in medical technology at the University of Tartu	
<b>Jüri Vedru, Olga Solntseva</b> (TÜ FI)	



Variation of magnetic induction plethysmogram on human thoracic surface

**Aile Tamm<sup>1</sup>, Kaupo Kukli<sup>1</sup>, Jakko Niinistö<sup>2</sup>, Mikko Ritala<sup>2</sup>, Markku Leskelä<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>TÜ FI, <sup>2</sup>University of Helsinki, Finland)

Characterization of high-permittivity oxide films grown by atomic layer deposition compatible to the applications on large-area substrates

**Arved Vain** (TÜ)

Tõhusamaks diagnoosimiseks

**Sven Lange<sup>1</sup>, Madis Kiisk<sup>1</sup>, Mikhail Brik<sup>1</sup>, Ilmo Sildos<sup>1</sup>, M. Hartmanova<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>TÜ FI, <sup>2</sup>Institute of Physics, Slovak Acad. Sci.)

Optical investigation of Sm-doped ZrO<sub>2</sub>

**Viktor Vabson<sup>1,2</sup>, Toomas Kübarsepp<sup>1</sup>, Riho Vendt<sup>1,2</sup>, Mart Noorma<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>Eesti Metroloogia Keskasutus – AS Metrosert, <sup>2</sup>TÜ FI)

Traceability of mass measurements in Estonia

**Eduard Feldbach<sup>1</sup>, Viktor Denks<sup>1</sup>, Marco Kirm<sup>1</sup>, Kristjan Kunnus<sup>1</sup>, Peeter Liblik<sup>1</sup>, Sung-Wng Kim<sup>2</sup>, Masahiro Hirano<sup>2</sup>, Hideo Hosono<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>TÜ FI, <sup>2</sup>Tokyo Institute of Technology, Japan)

New type of exciton like states in conductive C12A7 single crystals

**Nikolai Kristoffel, Pavel Rubin** (TÜ FI)

Multiband description of electron-doped cuprates

**Vitali Nagirnyi<sup>1</sup>, G. Geoffroy<sup>2</sup>, S. Guizard<sup>2</sup>, Marco Kirm<sup>1</sup>, Aleksei Kotlov<sup>1</sup>** (<sup>1</sup>TÜ FI, <sup>2</sup>CEA/CNRS École Polytechnique, France)

Relaxation dynamics of electronic excitations in CaWO<sub>4</sub> and CdWO<sub>4</sub> crystal studied by femtosecond interferometry technique

**Sebastian Vielhauer<sup>1</sup>, Vladimir Babin<sup>1</sup>, M. De Grazia<sup>2</sup>, Marco Kirm<sup>1</sup>, Vitali Nagirnyi<sup>1</sup>, A.N. Vasil'ev<sup>3</sup>** (<sup>1</sup>TÜ FI, <sup>2</sup>CEA Centre de Saclay, France, <sup>3</sup>Moscow State University, Phys. Dept.)

Ultrafast high-density XUV excitation of phosphors

**Ivar Kuusik<sup>1</sup>, Tanel Käämbre<sup>1</sup>, Kuno Kooser<sup>1</sup>, Arvo Kikas<sup>1</sup>, Vladimir Ivanov<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>TÜ FI, <sup>2</sup>Ural State University, Ekaterinburg, Russia)

Be 1s participator RIXS in beryllium compounds

**Martin Järvevälg<sup>1,2</sup>, Valter Reedo<sup>1,2</sup>, Ants Lõhmus<sup>1</sup>, Uno Mäeorg<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>TÜ FI, <sup>2</sup>TÜ KI)

Novel method for preparing tubular oxide structures by gel nano-sheet rolling

**Jaan Salm, Urmas Hörrak** (TÜ FI)

Diffusion of charged particles in DMA with inclined electric field: simplification of equations

**Sander Mirme, Meelis Eller, Margus Eller, Aadu Mirme** (TÜ FI)

High altitude measurements of air ion clusters and aerosol with NAIS

**Ülle Kikas, Aivo Reinart, Eduard Tamm, Igor Sherman** (TÜ FI)

Assessment of aerosol types in Baltic region from TOMS and AERONET data

**M. Kodu<sup>1</sup>, J. Raud<sup>1</sup>, M. Aints<sup>1</sup>, T. Avarmaa<sup>1</sup>, V. Denks<sup>1</sup>, J.S. Choi<sup>2</sup>, E. Feldbach<sup>1</sup>, R. Jaaniso<sup>1</sup>, M. Kirm<sup>1</sup>, A.-S. Lee<sup>2</sup>, A. Maaros<sup>1</sup>, Y.T. Matulevich<sup>2</sup>, H. Mändar<sup>1</sup>, V. Sammelselg<sup>1</sup>** (<sup>1</sup>TÜ FI, <sup>2</sup>Electronic Materials Development Team, Corporate R&D Center, Samsung SDI, Korea)

Structural and discharging properties of MgO thin films prepared by pulsed laser deposition

**Janek Uin, Eduard Tamm** (TÜ FI)

Assessment of the quality of electrically produced standard aerosols

## NÄITUS

Kirjastus Koolibri

Total Eesti OÜ

TÜ FI keskkonnafüüsika labor ja firma AIREL

# **EESTI FÜÜSIKA SELTS 20**

## **(AVASÕNA XXXIX EESTI FÜÜSIKAPÄEVADEL**

### **17. III 2009)**

---

**PIRET KUUSK**

TÜ Füüsika Instituut

Lugupeetud kuulajad, daamid ja härrad, füüsikud!

Kahe kuu ja kahe päeva pärast saab sellest kaksikümne aastat, kui paarsada füüsikut vastas algatusrühma üleskutsele tulla Tartu ülikooli aulasse Eesti Füüsika Seltsi asutama. Neist 190 pani end kirja uue seltsi asutajaliikmetena; see nimekiri on ära trükitud seltsi esimeses aastaraamatus 1989/90. Huvitaval kombel on seltsi liikmeskond kogu selle aja jooksul olnud statsionaarses seisundis (olgugi et muutuv) – juhatuse aruande kohaselt on praegu seltsi aktiivsete liikmete arv 195.

Mis jõud need siis olid, mis viisid seltsi asutamiseni, ja mis jõud need on, mis hoiavad liikmeskonda arvuliselt statsionaarsena? Minu hinnangul jagunevad jõud kaheks osaks – muutuvaks ja muutumatuks osaks.

Muutuv osa oli see, mis toimus eriti just seltsi asutamise juures 19. mail 1989. Tuletame meelde, et siis oli juba kuulutatud välja Eesti enesemääramisõigus tollase Nõukogude Liidu koosseisus (suveräänsuse deklaratsioon 16. nov 1988), vastu võetud keeleseadus (18. jaan 1989), heisatud sini-must-valge lipp Pika Hermannini torni Eesti Vabariigi aastapäeval 24. veebr 1989. Meie naabrid keemikud, kes olid oma seltsi Eestis asutanud juba 1919, kuid alates 1941 olid pidanud tegutsema Mendelejevi nimelise Üleliidulise Keemia Seltsi osana, olid hakanud üleliidulisest ühingust taanduma ja taasisesivsuma Eesti Keemia Seltsiks, asukohaga küll mitte Tartus, vaid Tallinna Polütehnilises Instituudis. Meie üleaedsed matemaatikud, kellel varem oma seltsi asutamise katsed olid mitmel põhjusel ebaõnnestunud, said nüüd sellega hakkama ja olid asutanud Eesti Matemaatika Seltsi (TÜ juures) juba kahe aasta eest, 17. sept 1987. Eesti Kirjanike Liidu Tartu osakond oli suutnud saada kõik vajalikud kooskõlastused kultuuriajakirja „Akadeemia“ jaoks, varjamatult jätkates Eesti üliõpilasseltside vilistlaskogude liidu poolt aastail 1937–1940 välja

antud samanimelist ajakirja; uue „Akadeemia“ esimene number ilmus aprillis 1989. Niisiis, õhk oli paks asutamistest ja taasasutamistest.

Kui nüüd kõnelda füüsikutest, siis tuleb öelda, et enne sõda ja ka mõnda aega pärast sõda oli Eesti füüsika sünonüümne Tartu füüsikaga. Alles alates 60ndatest hakkas füüsika end nähtavaks tegema ka Tallinna instituutides – polütehnilises, pedagoogilises ja ka mõnes harukondlikus, 70ndatel tõusis seal jõuliselt esile ENSV TA Küberneetika Instituudi füüsika sektor. Kogu Eesti füüsikat koordineeriva konsultatiivorganina loodi 1978. a Vabariiklik Füüsikakomisjon Eesti Teaduste Akadeemia juures. Kuid kümnekond aastat hiljem tundus niisugune käskkirjaga loodud komisjon – olgugi et koosnes ainult füüsikutest – liiga administratiivsena, sest ikkagi ülaltpoolt määratud. TRÜ üldfüüsika kateedri dotsendi Kalju Kudu ja ETA Füüsika Instituudi vanemteaduri Jaak Aaviksoo initsiatiivil tekkis algatusrühm, kes kutsus kokku asutamiskoosoleku, kuhu tuli, nagu ütlesin, umbes paarsada füüsikut nii Tartust kui Tallinnast ja mõned mujaltki, nt Kohtla-Järvelt.

Praeguseks on see 80ndate aastate lõpu üleminekuperiood ammu läbi, tol muutuste ajal alustatust on paljugi kadunud ja osa juba unustatudki.

Sellega jõuame nende jõudude muutumatu osa juurde, mis on seltsi hoidnud statsionaarses seisundis kõik need kakskümmend aastat, ei ole teda lasknud lõppeda ja unustusse vajuda. Ka siin on kaks osa, väline ja sisemine. Väline osa toimis tegelikult juba ka asutamise juures – kuna maailma n-ö haritud riikides on füüsikud traditsiooniliselt ühinenud füüsikaseltsidesse, mis omavahel suhtlevad ja moodustavad suuremaid liitusid nagu nt Euroopa Füüsika Selts, siis oleks hea, kui ka Eesti füüsikud oleksid sellistel foorumitel esindatud omaenda füüsikaseltsiga.

Sisemiste jõudude kohta julgen arvata, et selleks on meie endi soov ja huvi edendada füüsikat mitte ainult aparatuuri- või õppetöökeskselt, mitte ka ainult igaüks eraldi mina-keskselt, vaid ühiselt, tundes, et meie kõik koos oleme palju targemad ja võimekamad kui ükskõik kes meist üksinda. Meie hariduses on füüsika-alane ühisosa, meil on palju ühiste tööde kogemusi ja ühiste ettevõtmiste mälestusi. Me oskame üksteisele lahti seletada põrutavate teaduslike ja „teaduslike“ meediauudiste tegelikke tagamaid, olgu need siis tuumaenergeetikast, kliimamuutustest, kosmose ehitusest või koguni „jumalaosakesest“, *God particle*, nagu ingliskeelne meedia on millegipärast hakanud nimetama alusosakeste Standardmudeli tabamatut Higgsi bosonit.

Olgu siinkohal meenutatud, et näiteks tuumaenergeetika pälvis EFS juhatuse tähelepanu juba üsna ammu: 13. septembril 1990 võttis juhatuse vastu pöördumise „Aatomienergeetika Eestis“ (ilmus ajalehes „Edasi“ 18. sept 1990), milles kutsutakse üles igakülgset ja argumenteeritult vaagima sellega seotud poliitilisi, sotsiaalseid, majanduslikke, bioloogilisi, tehnilisi ja küllap veel mitmeid teisigi aspekte, et vajadusel saaks vastu võtta kompetentse otsuse. Tol ajal oli avalik arvamus kategooriliselt aatomielektrijaamade vastu, nüüd peetakse võimalikuks sellega seotud küsimusi rahulikult ja tõsiselt läbi arutada.

Ma soovin, et selts oleks senisest veelgi rohkem nähtav Eesti avalikkuses ning et seltsi liikmed leiaksid oma põhitööde kõrval aega jagada üldsusele ja ka üksteisele teavet kõigest sellest huvitavast, mis toimub füüsikas ja selle ümber.

# DIFUSIOONIST JÕUVÄLJADES

---

ELS HEINSALU

Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut,  
Rävala 10, 15042, Tallinn, Eesti  
IFISC, Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos  
(CSIC-UIB), E-07122 Palma de Mallorca, Hispaania

## 1 SISSEJUHATUS

Saksa füsioloog Adolf Fick, kes huvitus sellest, kuidas toimub elusorganismides vee ning toitainete liikumine läbi membraanide, publitseeris 1855. aastal seadused, mida tänapäeval tuntakse Ficki difusiooni seadustena [1, 2]. Ta näitas seejuures, et difundeeruva objekti ruutkeskmise koordinaat kasvab ajas lineaarselt. Ficki probleemikäsitus oli puhtalt fenomenoloogiline, baseerudes analoogiale Fourier' võrrandiga. Möödus 50 aastat, kuni Einstein tuletas difusioonivõrrandi molekulaar-kineetilisest teooriast [3, 4]. Marian von Smoluchowski, kes töötas Browni liikumise probleemi kallal alates 1900. aastast, kuid ei publitseerinud midagi kuni 1906. aastani, jõudis vaba difusiooni jaoks põhimõtteliselt samade tulemusteni nagu Einstein [5]. Erinevalt Einsteinist käsitles Smoluchowski kohe ka eksperimentitulemusi, sidudes omavahel difusiooniteooria ning Browni liikumise nähtuse.

Lihtsaim mudel kirjeldamaks difusiooni on uitliikumise mudel. Termin „uitliikumine” pärineb Karl Pearsoni poolt 1905. aastal ajakirjale *Nature* saadetud kirjust *Uitliikumise probleem* [6]. Sarnased mudelid olid aga välja pakutud juba aastal 1880 Lord Rayleigh' poolt seoses isoperioodiliste vibratsioonidega ning Louis Bachelier' poolt aastal 1900 aktsiaturu fluktuatsioonide analüüsis [7–9]. Kui difusioonivõrrand kirjeldab pidevate suuruste hajumist, siis uitliikumine kirjeldab diskreetset difusiooni. Bachelier oli esimene, kes nägi seost diskreetse uitliikumise ning pideva difusioonivõrrandi vahel.

Einsteini difusioonimudel ning uitliikumine baseeruvad mõlemad samadal eeldustel: eksisteerib keskmine vaba tee pikkus (sammu pikkus uitliikumise korral ja vahemaa põrgete vahel Einsteini mudeli kor-

ral) ning keskmine aeg (hüppe sooritamiseks uitliikumise mudelis ja põrgetevaheline aeg Einsteini mudelis); sealjuures osakesed ei interakteeru omavahel. Seega ruumis pideval piirjuhul viib uitliikumine samadele tulemustele nagu Einsteini poolt vaadeldud mudelis. Paljudes süsteemides aga ei pea need eeldused paika ning leiab aset anomaalne difusioon, s.t vabalt difundeeruva osakese ruutkeskmine koordinaat ei kasva ajas lineaarselt, vaid kui  $t^\alpha$ ,  $\alpha \neq 1$  [10]. Sõltuvalt anomaalse difusiooni eksponenti  $\alpha$  väärtusest on liikumine kas subdifusne, s.t aeglasem kui normaalne difusioon ( $0 < \alpha < 1$ ), või superdifusne, s.t kiirem kui normaalne difusioon ( $\alpha > 1$ ) [11].

Anomaalse difusiooni nähtust teatakse juba alates turbulentsse difusiooni käsitlusest Richardsoni poolt aastal 1926 [12]. Transpordi teooria raames on seda uuritud alates 1960ndate lõpust. 1970ndate alguses tehtud eksperimendid näitasid, et laengukandjate liikumine amorfsetes pooljuhtides – oluline koopiamaasinatate ja laserprinterite funktsioneerimisel – ei ole kirjeldatav klassikalise difusioonivõrrandi kaudu. Eksperimendiandmetega kooskõlalise teooria pakkusid välja 1975. aastal Scher ja Montroll. Vastavalt sellele lõksustatakse laengukandjad amorfsetes keskkonnas lokaalsete defektide poolt; vabanemine toimub mõne aja pärast tänu termilistele fluktuatsioonidele. Lõksustatuse ajad on kirjeldatavad jaotusega, mille keskmine väärtus on lõpmatu. Säärane idee ei leidnud kergesti heakskiitu, kuna tolleaegsete teadlaste maailmapilti ei mahtunud, et jaotus, millel puudub lõplik keskvärtus, võiks omada füüsikalist tähendust.

Nüüdseks on anomaalset dünaamikat omavate süsteemide loetelu üsnagi pikaks kujunenud. Lisaks laengukandjate liikumisele amorfsetes pooljuhtides on subdifusse transpordi näideteks klaasid, tuumamagnetresonants, difusioon perkolaatiivsetes ning poorsetes süsteemides, transport fraktaalsetel geomeetriatel, tilga dünaamika polümeerses võrgustikus ja DNA lahti pakkimine [11, 13–16]. Superdifusioon või Lévy statistika leiab lisaks Richardsoni turbulentssele difusioonile aset ka pöörlevate voolude teatud domeenides, kollektiivse libiseva difusiooni korral tahkiste pindadel, kihilistes kiiruste väljades, kvantoptikas, ühe molekuli spektroskoopias, transpordil turbulentses plasmas ja bakterite liikumise korral (vt artiklid [11, 13] ja viited seal). Anomaalne difusioon on oluline veel mitmete teistegi probleemide jaoks füüsikas ja keemias, eeskätt elektrokeemias, geo- ja keskkonnafüüsikas, bioloogias ja mikrobioloogias, meditsiinis, rahanduses ja majanduses, majandusfüüsikas; ta on iseloomulik enamikele kompleksüsteemidele.

Transpordi anomaalne iseloom erinevates süsteemides võib olla tingitud väga erinevate mehhanismide poolt [10]; näiteks mittehomo-geense keskkonna või osakestevahelise interaktsiooni tõttu. Ka Browni liikumise korral nn kammi-sarnastel struktuuridel lõpmata kõrgete ning lõpmata kitsaste piidega on leitud, et transport on subdifusne eksponendiga  $\alpha = 0,5$ . Anomaalne difusioon võib ilmned ka mõningates Lorentzi gaasides. Näiteks Sinai piljardi korral eksisteerivad piiramatu pikad rajad, mida mööda osake võib ilma põrgeteta vabalt liikuda; tulemuseks on ruutkeskmise koordinaadi käitumine  $\langle \delta x^2(t) \rangle \sim t \ln t$  (eriline anomaalse difusiooni juht). Eksisteerivad ka lõplike horisontidega piljardid, kus järjestikuste hüpete komplekssete kaugmõjuliste korrelatsioonide tõttu difusioon on sellegipoolest anomaalne. Sageli on anomaalse käitumisega transpordinähtused dünaamilistes Hamiltoni süsteemides, kuna vastav faasiruum võib sisaldada mõningaid regulaarseid struktuure, mis toimivad nagu dünaamilised lõksud. Anomaalne difusioon on iseloomulik ka siirdeefektidele.

## 2 MATEMAATILISED MUDELID

### 2.1 NORMAALNE DIFUSIOON: UITLIIKUMINE JA FOKKERI-PLANCKI VÕRRAND

Nagu mainitud, on normaalne difusioon lisaks paljudele teistele matemaatilistele mudelitele kirjeldatav uitliikumise mudeli kaudu. Uurides ühedimensionaalset uitliikumist, kus uitleja sooritab hüppeid konstantse pikkusega  $\Delta x$ , võime sisse tuua võre mõiste  $\{x_i = i\Delta x\}$ , kus  $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Eeldame, et igas ajaühikus osake kohal  $i$  hüppab kohale  $i \pm 1$  tõenäosusega  $q_i^\pm$ ;  $q_i^+ + q_i^- = 1$ . Säärane uitliikumine vastab ülesumbunud liikumisele (s.t inertsiefektid võib jätta arvesse võtmata) – iseloomulik enamikule bioloogilistest süsteemidest – ning on kirjeldatav kineetika põhivõrrandiga kohapopulatsiooni  $P_i(t)$  jaoks [17, 18]

$$\frac{\partial}{\partial t} P_i(t) = g_{i-1}^+ P_{i-1}(t) + g_{i+1}^- P_{i+1}(t) - (g_i^+ + g_i^-) P_i(t); \quad (1)$$

$\sum_i P_i(t) = 1$ . Kaks esimest liiget võrrandi (1) paremal poolel kirjeldavad  $P_i$



kasvu tänu siiretele kohalt  $i \pm 1$  kohale  $i$  ning viimane liige kahanemist siirete tõttu punktist  $i$  punkti  $i \pm 1$ , s.t kineetika põhivõrrand on kasvu-kahanemise võrrand erinevate punktide  $i$  tõenäosuste jaoks. Suurused  $g_i^\pm$  on vastavalt kiirused (sagedused) edaspidiseks ning tagaspidiseks liikumiseks. Uitliikumine, mis on kirjeldatav kineetika põhivõrrandiga (1), on Markovi protsess, s.t ta ei sõltu sellest, mis toimus ajas varem: tõenäosus mingil hilisemal ajahetkel on määratud üksnes tõenäosuse algtingimusega [18–20].

Ruumis pideval piirjuhul ( $\Delta x \rightarrow 0$ ) ja välise jõu puudumisel läheb kineetika põhivõrrand (1) üle difusioonivõrrandiks tõenäosustiheduse  $P(x, t)$  jaoks

$$\frac{\partial}{\partial t} P(x, t) = D_0 \frac{\partial^2}{\partial x^2} P(x, t). \quad (2)$$

Siin  $D_0 = k_B T / \eta$  on vaba difusiooni koeffitsient,  $T$  on temperatuur ja  $\eta$  hõõrdetegur,  $k_B$  on Boltzmanni konstant. Kui uitlejale mõjub aga väline jõud  $f(x, t)$ , avaldub võrrandist (1) saadav pidev võrrand kujul [19]

$$\frac{\partial}{\partial t} P(x, t) = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{f(x, t)}{\eta} P(x, t) \right] + D_0 \frac{\partial^2}{\partial x^2} P(x, t). \quad (3)$$

Viimane võrrand on tuntud Fokkeri-Plancki võrrandina. Esimene liige võrrandi (3) paremal poolel on triivi liige ning teine difusiooni liige. On ilmne, et välise jõu puudumisel Fokkeri-Plancki võrrand (3) taandub difusioonivõrrandile (2).

Suunatud ülesumbunud difusset liikumist kirjeldav võrrand (3) pakuti välja 1914. aastal A. D. Fokkeri väitekirjas; põhjalikumalt käsitles seda M. Planck 1918. aastal [21]. Õigupoolest esitas Fokker võrrandi kiiruse jaotusfunktsiooni  $P(v, t)$  jaoks. 1915. aastal esitas Smoluchowski sama võrrandi koordinaadi jaotusfunktsiooni  $P(x, t)$  jaoks [22] ning seetõttu tuntakse võrrandit (3) ka Smoluchowski võrrandina.

## 2.2 FRAKTSIONAALNE MATEMAATIKA

Viimase kümne-kahekümne aasta jooksul on paljud füüsikud enda jaoks avastanud, et mitmed süsteemid, eeskätt need, milles leiab aset anomaalselt aeglane difusioon, on hästi kirjeldatavad kasutades fraktsionaalset algebrat [14]. Õigupoolest on fraktsionaalsed integraalid ja tuletised pea

niisama vanad kui kõigile hästi tuntud tavaline algebra. Ent möödus ligi 300 aastat, enne kui tänapäeval fraktsionaalse algebrana tuntud matemaatika võeti omaks kui füüsikas praktiline töövahend.

Üks viis, kuidas formaalselt sisse tuua fraktsionaalse tuletise mõiste, on lähtuda täisarvulise astmefunktsiooni korduvast diferentseerimisest:

$$\frac{d^n}{dx^n} x^m = \frac{m!}{(m-n)!} x^{m-n}. \quad (4)$$

Suvalise astme  $\mu$  jaoks annab korduv diferentseerimine tulemuse

$$\frac{d^n}{dx^n} x^\mu = \frac{\Gamma(\mu+1)}{\Gamma(\mu-n+1)} x^{\mu-n}, \quad (5)$$

kus faktoriaale asendavad gammafunktsioonid. Gammafunktsiooni lihtsaim interpretatsioon on, et ta on faktoriaali üldistus kõikide reaalarvude jaoks,  $\Gamma(\mu+1) = \mu\Gamma(\mu)$ . Neid kasutades võime suvalist järku  $\alpha$  tuletise jaoks kirjutada

$$\frac{d^\alpha}{dx^\alpha} x^\mu = \frac{\Gamma(\mu+1)}{\Gamma(\mu-\alpha+1)} x^{\mu-\alpha}. \quad (6)$$

Viimane võrrand vastab Riemanni-Liouville'i tuletisele [14]; see on piisav käsitlemaks funktsioone, mis on arendatavad Taylori ritta.

Üldisem viis tuua sisse fraktsionaalse tuletise mõiste kasutab fakti, et  $n$ -indat järku tuletis on  $n$ -kordse integreerimise pöördtehe:

$$\int_a^x \int_a^{y_1} \dots \int_a^{y_{n-1}} f(y_n) dy_n \dots dy_1 = \frac{1}{(n-1)!} \int_a^x (x-y)^{n-1} f(y) dy. \quad (7)$$

On ilmne, et see samasus on rahuldatud kohal  $x = a$ , ning ei ole raske näha, et tuletised samasuse mõlemal poolel on võrdsed. Viimase avaldise üldistus lubab meil defineerida  $\alpha$ -ndat järku fraktsionaalse integraali

$${}_a \hat{D}_x^{-\alpha} f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_a^x (x-y)^{\alpha-1} f(y) dy, \quad x \geq a. \quad (8)$$

Suvalist järku fraktsionaalne tuletis on defineeritud fraktsionaalse integreerimise ja järgneva tavalise diferentseerimise kaudu.  $\alpha$ -ndat järku fraktsionaalne tuletis on

$${}_a \hat{D}_x^\alpha = \frac{d^n}{dx^n} {}_a \hat{D}_x^{\alpha-n}. \quad (9)$$

Aja järgi fraktsionaalsete tuletiste korral võetakse enamasti  $a=0$ , mis vastab süsteemi evolutsiooni algust märkivale valikule  $t=0$ . Üldistatud kineetika põhivõrrandis ja üldistatud difusioonivõrrandis on keskne roll operaatoril

$${}_0 \hat{D}_t^{1-\alpha} = \frac{d}{dt} {}_0 \hat{D}_t^{-\alpha}. \quad (10)$$

### **2.3 ANOMAALNE DIFUSIOON: AJAS PIDEV UITLIIKUMINE JA FRAKTSIONAALNE FOKKERI-PLANCKI VÕRRAND**

Anomaalse difusiooni modelleerimiseks on mitmeid erinevaid viise nii välise jõu puudumisel kui ka olemasolul. Üheks võimaluseks on kasutada ajas pideva uitliikumise mudelit, välja pakutud 1965. aastal Montrolli ja Weissi poolt [23, 24] ning edukalt rakendatud pooljuhtides toimuvat transporti käsitlevates töödes Scheri ja Laxi [25] ning Scheri ja Montrolli [26] poolt. Ajas pideva uitliikumise mudel baseerub ideel, et ooteaeg  $\tau$  kahe järjestikuse hüppe vahel ning hüppe pikkus  $\lambda$  saadakse tõenäosusjaotusest  $\phi(\lambda, \tau)$ , mida nimetatakse hüppe tõenäosusjaotuseks [11]. Jaotusest  $\phi(\lambda, \tau)$  saadakse hüppe pikkuste jaotuse jaoks

$$\varphi(\lambda) = \int_0^\infty \phi(\lambda, \tau) d\tau \quad (11)$$

ning ooteaegade jaotuse jaoks

$$\psi(\tau) = \int_0^\infty \phi(\lambda, \tau) d\lambda. \quad (12)$$

Kui hüppe pikkus ja ooteaeg on sõltumatud juhuslikud suurused, siis hüppe tõenäosusjaotus faktoriseerub, s.t  $\phi(\lambda, \tau) = \psi(\tau)\varphi(\lambda)$ . Kui nad on omavahel seotud (Lévy liikumine), siis  $\phi(\lambda, \tau) = p(\lambda|\tau)\psi(\tau)$  või  $\phi(\lambda, \tau) = p(\tau|\lambda)\varphi(\lambda)$ , s.t antud ajavahemikus uitleja saab läbida ainult maksimaalse distantsi.

Sõltuvalt sellest, kas karakterne ooteaeg

$$\mathcal{T} = \int_0^{\infty} \psi(\tau) \tau d\tau \quad (13)$$

ja hüppe pikkuse dispersioon

$$\Lambda^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\lambda) \lambda^2 d\lambda \quad (14)$$

on lõplikud või hajuvad, võib eristada eri tüüpi uitliikumise protsesse [11]. Vaadelgem juhtu, kus  $\phi(\lambda, \tau) = \psi(\tau)\phi(\lambda)$ . Kui nii karakterne ooteaeg  $\mathcal{T}$  kui ka hüppe pikkuse dispersioon  $\Lambda^2$  on lõplikud, siis pikas ajaskaalas leiab aset normaalne Browni liikumine. Kui karakterne ooteaeg  $\mathcal{T}$  hajub, kuid hüppe pikkuse dispersioon  $\Lambda^2$  on lõplik, siis pikas ajaskaalas on liikumine subdifuusne; protsess ei ole Markovi protsess. Kirjeldades transporti, võib ooteaegade jaotus tuleneda võimalikest takistustest ja lõksudest, mis viivitavad osakeste hüppeid ning seega toovad liikumisse sisse mälu efektid. Vastupidisel juhul, s.t kui hüppe pikkuse dispersioon  $\Lambda^2$  hajub, ent karakterne ooteaeg  $\mathcal{T}$  on lõplik, leiavad aset Lévy lennud (superdifusioon). Juhul kui mõlemad, nii karakterne ooteaeg  $\mathcal{T}$  kui ka hüppe pikkuse dispersioon  $\Lambda^2$  hajuvad, leiab aset konkurents pikkade peatuste ning pikkade hüpete vahel. Üldiselt tekitavad pikad hüpped ja pikad ooteajad süsteemis mälu, s.t uitleja käitumine on määratud pikimate hüpete või pikimate ooteaegade poolt. Kokkuvõttes, ajas pideva uitliikumise mudel pakub mitmekülgseid võimalusi kirjeldamiseks anomaalset difusiooni.

Järgnev keskendub subdifuususele režiimile. Nii nagu ühedimensionaalse uitliikumise korral, eeldame ka siin, et osake kohal  $i$  hüppab tõenäosusega  $q_i^{\pm}$  ( $q_i^+ + q_i^- = 1$ ) kohale  $i \pm 1$ , ent seda mitte igas ajaühikus, vaid juhusliku ooteaja  $\tau$  järel. Juhuslik aeg  $\tau$  saadakse ooteaegade jaotusest  $\psi(\tau)$ , mille karakterne ooteaeg  $\mathcal{T}$  hajub. Säärane ajas pidev uitliikumine on kirjeldatav üldistatud kineetika põhivõrrandiga  $P_i(t)$  jaoks [24]

$$\frac{\partial}{\partial t} P_i(t) = \int_0^t \left\{ K_{i-1}^+(t-t') P_{i-1}(t') + K_{i+1}^-(t-t') P_{i+1}(t') - [K_i^+(t-t') + K_i^-(t-t')] P_i(t') \right\} dt'; \quad (15)$$

siin  $K_i^{\pm}(t)$  on tuum. Võrrandis (15) olevas integraalis esindavad tuuma funktsioonid  $K_{i\mp 1}^{\mp}(t-t')$  (positiivseid) panuseid  $\partial P_i(t)/\partial t$  jaoks tingituna sellest, et osakesed, mis mingil eelneval ajahetkel  $t'$ ,  $0 < t' < t$ , külastavad kohti  $i \mp 1$ , ootavad seal ajavahemiku  $\tau = t - t'$  ning hüppavad

seejärel ajahetkel  $t$  kohale  $i$ . Samas  $K_i^\pm(t-t')$  esindavad (negatiivseid) panuseid tingituna sellest, et osakesed kohalt  $i$ , kuhu nad saabusid mingil eelneval ajahetkel  $t'$ , hüppavad hetkel  $t$  kohale  $i \pm 1$ .

Üheks võimalikuks ooteaegade jaotuse valikuks on Mittag-Leffleri jaotus, mis argumendi väikestel väärtustel on eksponentsiaalne ning suurtel väärtustel omab astmelist sõltuvust;  $\alpha=1$  korral läheb Mittag-Leffleri jaotus üle eksponentsiaalseks jaotuseks ning tegemist on normaalse difusiooniga. Kasutades Mittag-Leffleri jaotust saame vastavalt üldistatud kineetika põhivõrrandilt üle minna fraktsionaalsele kineetika põhivõrrandile [27]

$$\frac{\partial P_i(t)}{\partial t} = {}_0\hat{D}_t^{1-\alpha} [g_{i-1}^+ P_{i-1}(t) + g_{i+1}^- P_{i+1}(t) - (g_i^+ + g_i^-) P_i(t)]; \quad (16)$$

siin suurused  $g_i^\pm$  on fraktsionaalsed kiirused (sagedused). Riemanni-Liouville'i fraktsionaalse tuletise integro-diferentsiaaloperaator mõjub üldisele ajafunktsioonile  $\chi(t)$  järgmiselt [11, 14, 28]:

$${}_0\hat{D}_t^{1-\alpha} \chi(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t dt' \frac{\chi(t')}{(t-t')^{1-\alpha}}. \quad (17)$$

Laplace'i teisenduse meetodit kasutades on võimalik näidata, et fraktsionaalset kineetika põhivõrrandit (16) võib esitada ka kujul [29]

$$D_*^\alpha P_i(t) = g_{i-1}^+ P_{i-1}(t) + g_{i+1}^- P_{i+1}(t) - (g_i^+ + g_i^-) P_i(t), \quad (18)$$

kus sümbol  $D_*^\alpha$  tähistab Caputo fraktsionaalset tuletist [28],

$$D_*^\alpha \chi(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t dt' \frac{1}{(t-t')^\alpha} \frac{\partial}{\partial t'} \chi(t') \quad (19)$$

Võrrand (18) on formaalselt väga sarnane üldikumist kirjeldavale kineetika põhivõrrandile (1), selle erinevusega, et tavaline tuletis aja suhtes  $\partial / \partial t$  on asendatud fraktsionaalse tuletisega (19).

Sarnaselt normaalse Browni liikumise juhule saab fraktsionaalsest kineetika põhivõrrandist tuletada fraktsionaalse Fokkeri-Plancki võrrandi [11, 30, 31]

$$D_*^\alpha P(x,t) = \left[ -\frac{\partial}{\partial x} \frac{f(x)}{\eta_\alpha} + \kappa_\alpha \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] P(x,t); \quad (20)$$

viimase võrrandi võib viia ka kujule

$$\frac{\partial}{\partial t} P(x, t) = {}_0\hat{D}_t^{1-\alpha} \left[ -\frac{\partial}{\partial x} \frac{f(x)}{\eta_\alpha} + \kappa_\alpha \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] P(x, t). \quad (21)$$

Siin  $\kappa_\alpha$  tähistab anomaalse difusiooni koefitsienti dimensiooniga  $[m^2 s^{-\alpha}]$  ning  $\eta_\alpha$  tähistab üldistatud hõordetegurit dimensiooniga  $[kgs^{\alpha-2}]$ . Need kaks suurust on omavahel seotud üldistatud Einsteini seose kaudu,

$$\eta_\alpha \kappa_\alpha = k_B T. \quad (22)$$

Olgu siinkohal mainitud, et võttes arvesse ka mittelokaalse hüpete statistika, s.t eeldades, et nii  $\mathcal{T}$  kui ka  $\Lambda^2$  on lõpmatud, saadakse fraktsionaalne Fokkeri-Plancki võrrand kujul

$$\frac{\partial}{\partial t} P(x, t) = {}_0\hat{D}_t^{1-\alpha} \left[ -\frac{\partial}{\partial x} \frac{f(x)}{\hat{\eta}_x} + \kappa_\alpha^\mu \nabla^\mu \right] P(x, t); \quad (23)$$

siin  $\nabla^\mu \equiv \partial^\mu / \partial |x|^\mu$  on Rieszi fraktsionaalne tuletis ning fraktsionaalse difusiooni koefitsiendi  $\kappa_\alpha^\mu$  dimensioon on  $[m^\mu s^{-\alpha}]$ ;  $0 < \mu < 2$ . Operaator  ${}_0\hat{D}_t^{1-\alpha}$  on seotud hüpetevaheliste ooteaegade astmelise tõenäosusjaotusega, kuna aga  $\nabla^\mu$  on seotud hüppe pikkuste astmelise jaotusega. Võrrand (23) kirjeldab seega konkurentsi subdifusiooni ja Lévy lendude vahel.  $\mu = 2$  korral saadakse võrrandist (23) võrrand (21).

Markovi Lévy lendude korral, s.t  $\alpha = 1$  jaoks, läheb võrrand (23) üle võrrandiks

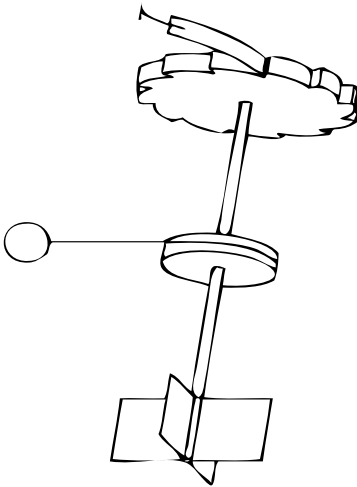
$$\frac{\partial}{\partial t} P(x, t) = \left[ -\frac{\partial}{\partial x} \frac{f(x)}{\eta} + \kappa^\mu \nabla^\mu \right] P(x, t); \quad (24)$$

siin on fraktsionaalse difusiooni koefitsiendi  $\kappa^\mu$  dimensiooniks  $[m^\mu s^{-1}]$ . Tähelepanu väärib, et Lévy müra mõjutab üksnes difusiooni liiget, samas aga hüpetevahelised pikad ooteajad omavad mõju nii difusiooni kui ka triivi liikmele.

Fraktsionaalsed võrrandid üldistavad normaalse difusiooni teooriast teada olevad võrrandid, võttes arvesse mälu efektid nagu näiteks polümeeride venitamine ning sügavate lõksude hõivamine laengukandjate poolt amorfsetes pooljuhtides. Säärased üldistatud võrrandid lubavad füüsikutel kirjeldada kompleksseid süsteeme, milles leiab aset anomaalne dünaamika, sarnaselt lihtsamatele süsteemidele, kus toimub normaalne difusioon.

### 3 NORMAALNE DIFUSIOON JA PERIOODILISED JÕUVÄLJAD

Perioodilistel potentsiaalidel toimuva Browni liikumise uurimine lähtub küsimusest, kas Browni liikumist on võimalik muuta kasulikuks tööks. Algne idee pakuti välja Smoluchowski poolt 1912. aastal [32] ning seda arendas edasi Feynman [33]. Tänapäeval Smoluchowski-Feynmani hammasrattana tuntud Smoluchowski ja Feynmani mõttelise eksperimendi peamiseks koostisosaks on telg, mille ühes otsas on tiivikud ning teises otsas asümmeetriliste hammastega hammasratas ning pörklink (joonis 1). Kogu seade on ümbritsetud gaasiga, mis on soojuslikus tasakaalus. Kui kirjeldatud seade saaks vabalt pöörelda, siis sooritaks ta tiivikuid liikuma panevate gaasi molekulide juhuslike pörgete tõttu pöörlevat Browni liikumist. Kuna aga pörklink tõkestab telje pöörded ühes suunas, kuid lubab teises suunas, siis tundub üsna loomulikuna, et keskmiselt toimub süstemaatiline pöörlemine ühes suunas, isegi kui rakendada väikest koormust teises suunas [34]. See aga oleks vastuolus termodünaamika teise seadusega (vt artiklid [33, 35]).



Joonis 1: Smoluchowski-Feynmani hammasratta ja pörklingi seade.

Smoluchowski-Feynmani hammasratta realiseerisid eksperimentaalselt molekulaarsel skaalal Kelly, Tellitu ja Sestelo [36, 37]. Tuumamagnetresonantsi eksperimentides leidis kinnitust ennustatud pöörlemise eelistatud suuna puudumine soojuslikus tasakaalus.

Hammasratta ja pörklengi seade täpne modelleerimine ning analüüs on üsna keeruline, seda eriti mikroskoopilisel tasemel [34]. Ent me võime keskenduda tunduvalt lihtsamale matemaatilisele mudelile, mis säilitab peamised kvalitatiivsed omadused ning on formuleeritav Browni liikumisena ühedimensionaalsel ruumiliselt perioodilisel potentsiaalil  $U_0(x) = U_0(x + L)$ , kus  $L$  on periood.

Browni liikumine perioodilistel struktuuridel on saanud oluliseks mitmete probleemide käsitlemisel füüsikas, olles huvitav nii tehnoloogilisest, eksperimentaalsest kui ka teoreetilisest aspektist, ning on olnud intensiivsete uuringute objektiks juba mitmeid aastaid [19, 38–40]. Lisaks reaalseste Browni osakeste kirjeldamisele on probleemid, mis on seotud normaalse difusiooniga perioodilistel potentsiaalidel, olulised ka mitmetes muudes kontekstides nagu näiteks üli-ioonjuhid [41–43] ja fluksoonite liikumine ülijuhtides [44], Josephsoni kontaktid [45, 46], aatomite ja molekulide difusioon kristalli pinnal [47–51], osakeste eraldamine elektroforeesi teel [52], pöörlevad dipoolid välistes väljades [53], molekulide pöörlemine tahkistes [54], moodsade sünkronisatsioon lasergüroskoopides [55], plasmakiirendid [56], aga ka biofüüsikalistes protsessides nagu neuronite funktsioneerimine ja rakusisene transport [57, 58].

Üheks olulisemaks probleemiks kaasaegses nanotehnoloogias on, kuidas manipuleerida väikeste osakestega teostamiseks ettemääratud operatsioone. Näiteks on kristalli pinnale absorbeerunud aatomite liikuvus ja difusioonikoefitsient kontrollitavad rakendades deterministlike jõude [59, 60]. Vahetu manipuleerimise meetod seisneb konstantse lokaalse elektrivälja rakendamises skaneeriva tunnelmikroskoobi teraviku abil [61–63]. Valitud laenguga ad-aatom või ad-molekul liigub siis elektrilise jõu suunas; neutraalsed osakesed suunatakse tugevama välja piirkonda tekitatud polarisatsiooni tõttu [64, 65]. Seda probleemi võib modelleerida Browni liikumisena kallutatud perioodilisel kahedimensionaalsel substraadil, mille võib taandada ühedimensionaalseks süsteemiks. Lisaks sellele näitele on veel rida teisi füüsikalisi ja bioloogilisi süsteeme, kus osakeste dünaamika on loomulikult taandatav dünaamikaks ühedimensionaalsetel substraatidel. Aktuaalsetest probleemidest võib näiteks tuua kolloidid [66, 67] või külmad aatomid [68, 69] optilistes



lõksudes, ülijuhtivad pöörised litografeeritud jälgedes [70, 71],ioon-kanalid [72], rakumembraanid [73], tehislükud ning loomulikud nanopoorid [74–77], molekulaarmootorid [78–86] ning dislokatsioonide dünaamika [87–89].

Vaadelgem Browni liikumist ühedimensionaalsel perioodilisel potentsiaalil  $U_0(x)$ . Koormuse puudumisel ning seni kuni soojuslike fluktuatsioonide keskväärtus on null, on keskmine vool null, s.t puudub suunatud liikumine. Samal ajal võivad osakesed mürast tingitud ergutuse tõttu lahkuda potentsiaaliaugust ning hüpata kas paremale või vasakule lähimasse potentsiaaliauku ning aja jooksul liikuda kaugematesse potentsiaaliaukudesse. Seega difundeeruvad osakesed piisavalt pika aja jooksul  $x$ -telje mõlemas suunas. Pikas ajaskaalas võib seda difusiooni kirjeldada efektiivse difusioonikoefitsiendi kaudu:

$$D = \frac{D_0}{\int_0^L e^{-\beta U_0(x)} \frac{dx}{L} \int_0^L e^{\beta U_0(x')} \frac{dx'}{L}}; \quad (25)$$

siin  $\beta = (k_B T)^{-1}$ . Selle tulemuse said kõigepealt Lifson ja Jackson [38] (vt ka artiklid [90, 91]). Võrrandis (25) on nimetaja alati suurem kui 1: seega on iga ühedimensionaalse perioodilise potentsiaali efektiks tekitada makroskoopiline difusioonikoefitsient, mis on alati väiksem kui vaba difusiooni koefitsient  $D_0$ . Kui temperatuur on piisavalt kõrge, siis perioodilise potentsiaali mõju osakestele ei ole oluline ning toimub üleminek vabale difusioonile.

Välise kallutuse  $F$  olemasolul osakesed difundeeruvad eelistatult kallutuse suunas ning keskmine vool  $v$  sõltub  $F$  väärtusest. Kogupotentsiaal  $U(x) = U_0(x) - Fx$  on laineline tasand, mille kallak on määratud välise jõu  $F$  poolt. Ülesumbunud režiimis ning müra puudumisel on osakeste liikumine sellisel potentsiaalil roomav. Kui kallutav jõud  $F$  on piisavalt suur, nii et potentsiaal  $U(x)$  ei oma miinimume, liiguvad osakesed mööda lainelist tasandit alla; tegemist on ladusa režiimiga. Kui miinimumid eksisteerivad, siis osakesed jõudes sinna peatuvad; tegemist on lukustatud režiimiga. Müra olemasolul ei jää osakesed alaliselt lukustatud seisundisse, vaid aset leiavad müra poolt aktiveeritud põgenemised. Keskmiselt leiab seega aset hüpete protsess ühest miinimumist teise, madalamasse [19]. Statsionaarne vool on kirjeldatav avaldisega

$$v = \frac{LD_0(1 - e^{-\beta FL})}{\int_0^L dx e^{-\beta U(x)} \int_x^{x+L} e^{\beta U(x')} dx'} \quad (26)$$

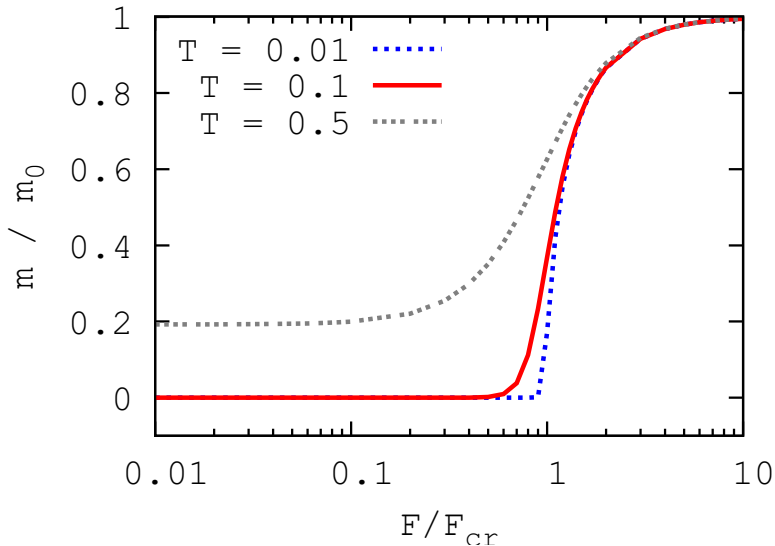
Sellele tulemusele jõudis esimesena Stratonovich [92, 93] ning seda tuntakse Stratonovichi valemina. Siit on näha, et  $F=0$  korral  $v=0$ , nagu juba räägitud. Samuti, võttes arvesse, et  $F \rightarrow \infty$  korral potentsiaal  $U(x) = U_0(x) - Fx \approx -Fx$ , saame Stratonovichi valemist

$$v = F\eta^{-1} \quad (F \rightarrow \infty), \quad (27)$$

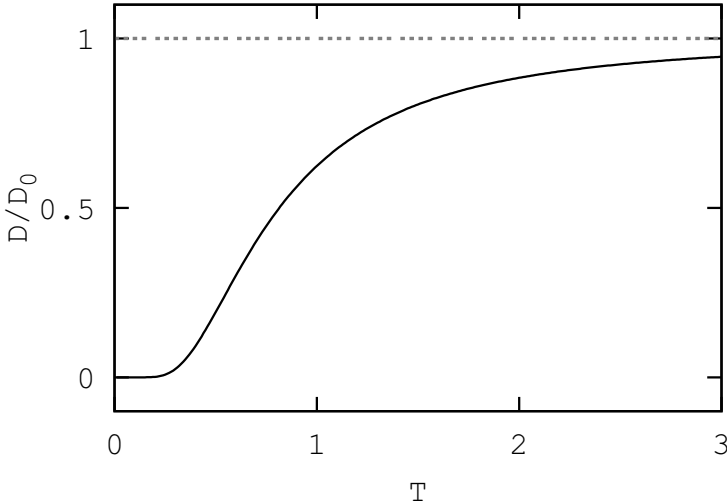
s.t kallutuse  $F$  suurte väärtuste korral toimub osakeste liikumine nagu konstantse jõu väljas; efektiivne difusioonikoefitsient on  $D = D_0$ .

Voolu asemel võime uurida ka osakeste liikuvust, mis on defineeritud järgmiselt:

$$\mu = vF^{-1}. \quad (28)$$



Joonis 2: Liikuvus  $\mu$  vs kallutav jõud  $F$  perioodilise substraadi  $U_0(x) = \cos(2\pi x/L)$  jaoks; erinevad kõverad vastavad temperatuuri  $T$  erinevatele väärtustele. Linearse vaste režiim on selgelt nähtav.



Joonis 3: Efektiivne difusioonikoefitsient  $D$  perioodilisel potentsiaalil  $U_0(x) = \cos(2\pi x/L)$  vs temperatuur  $T$ . Punktirjoon vastab vabale difusioonile.

Nagu võib näha jooniselt 2, madalatel temperatuuridel,  $T \ll 1$ , on osakeste liikuvus nullilähedane (lukustatud režiim). Kallutuse kriitilise väärtuse juures, kui potentsiaal  $U(x)$  kaotab miinimumid, kasvab liikuvus järsult. Jõu suurte väärtuste korral on osakese liikumine kirjeldatav  $\mu_0 = \eta^{-1}$  poolt (ladus režiim). Kõrgematel temperatuuridel on üleminek lukustatud režiimilt latusale režiimile vähem järsk. Väikeste  $F$  väärtuste korral on liikuvus  $\mu$  kallutusest sõltumatu, nagu oodatud lineaarse vaste teooriast.

Analüütiline avaldis difusioonikoefitsiendi jaoks perioodilistel potentsiaalidel meelevaldse kallutava jõu mõjumisel ja meelevaldse temperatuuri jaoks tuletati ülesumbunud režiimi juhul alles hiljuti [94–96] uuendamise teooria lähenduses [97]. Difusioonikoefitsiendi sõltuvus kallutatud perioodilisel potentsiaalil kallutava jõu  $F$  väärtusest on illustreeritud joonisel 4. Väikeste kallutuse väärtuste ja madalate temperatuuride korral on difusioonikoefitsient maha surutud võrreldes vaba difusiooni koefitsiendiga; lineaarses vastes on difusioonikoefitsient ligikaudu  $D(F, T) \simeq k_B T \mu(F, T)$  [19]. Kriitilise kallutuse lähedal on vaadeldav difusiooni võimendumine [98]; mida madalam on temperatuur, seda suurem on difusiooni piigi kasv. Suurte jõudude korral toimub üle-

minek vaba difusiooni režiimile.

Artiklites [99–103] on leitud, et transpordi protsessid perioodilistel substraatidel on väga tundlikud müra intensiivsuse ja kallutuse suhtes. Samuti näidati, et perioodilise potentsiaali kuju mõjutab oluliselt stohastilist transporti.

Süsteemides, kus saavad oluliseks inertsiefektid, võib müra puudumisel ilmnedagi lukustatud lahend, kui miinimumid eksisteerivad. Erinevalt ülesumbunud süsteemidest võib ilmnedagi ka ladus lahend, isegi kui potentsiaal omab miinimume: nimelt kui hõõrdetegur on piisavalt väike, võivad osakesed impulsi tõttu ületada potentsiaalibarjääri. Müra olemasolu korral võidakse osakesed potentsiaali miinimumist (s.t lukustatud seisundist) välja lüüa. Kui hõõrdumine on piisavalt väike, siis osakesed ei kaota oma energiat väga kiiresti ning seega ei löksustu järgmisesse, madalamal asuvasse potentsiaaliauku, nagu see juhtub suure hõõrde korral. Osakesed võivad seega minna latusse olekusse ning võivad sinna jääda mõneks ajaks. Kuna aga müra tõttu osakeste energia fluktuueerub, siis võivad nad energia vähenemisel taas mõne potentsiaaliaugu poolt löksustatud saada. Selle tulemusena võivad osakesed taas olla lukustatud seisundis [19].

Nagu eespool mainitud, on üheks perioodilisel substraadil toimiva Browni liikumise näiteks aatomite ja molekulide difusioon kristalli pinnal [47–51, 104]. See mehhanism on nii kontseptuaalselt kui ka tehnoloogiliselt huvipakkuv [105, 106], olles oluline heterogeense tsentrite moodustumise, katalüüsi, kile kasvu jne jaoks. Üksikud aatomid võivad pinnal difundeerudes kohtuda ning moodustada dimeere ja trimeere. Näiteks pooljuhi Si(100) või Ge(100) pinnal moodustab suurem osa Si või Ge aatomitest dimeere. Metallil pinnale adsorbeerunud aatomid võivad moodustada ka tihedalt pakitud saarekesi, mis difundeeruvad nagu tervik [107–117]. See tõstatab küsimuse sisemiste vabadusastmete rollist väljavenitatud objektide transpordis mikro- ja submikroseadetes.

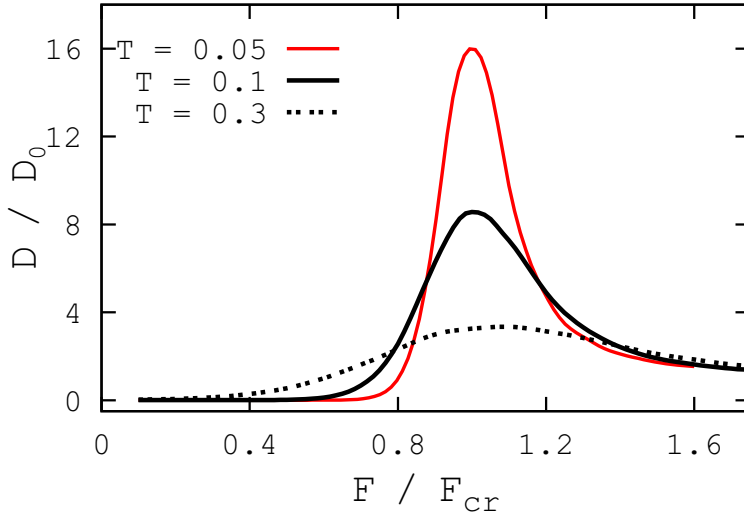
Artiklites [107–117] on uuritud kahest harmooniliselt interakteeruvast Browni monomeerist koosnevate dimeeride difusiooni kallutatud perioodilistel potentsiaalidel. Dimeeri transporti uuriti erinevate sisetustugevuse ja hõõrdetegurite väärtuste jaoks ning leiti, et keskmine vool ja difusioonikoefitsient kui kallutuse ning dimeeri pikkuse ja substraadi konstandi funktsioon omab keerukat mittemonotoonset käitumist. Teise resonantse piigi ilmumine difusioonikoefitsiendis *versus* kallutatav jõud oli vaadeldav suhteliselt väikese hõõrdumisega süsteemides. Lisaks dimeeride transpordi kirjeldamisele on antud mudel rakendatav ka

dissotsieerunud dislokatsioonide dünaamika kirjeldamiseks [87–89].

On teada, et ajas varieeruvate potentsiaalide korral ilmnevad Browni liikumises mitmed huvitavad nähtused nagu näiteks Browni mootorid, anomaalne mittelineaarne vaste käitumine ja stohhastiline resonants [78, 79, 119–121]. Toogem siinkohal näite ümberlülitatavast hammasrattast. Smoluchowski-Feynmani hammasratta korral osakesed liiguvad jõu  $F$  poolt määratud suunas; vool puudub, kui  $F = 0$ ; see on nõnda nii sümmeetriliste kui ka asümmeetriliste potentsiaalide korral. Lülitades aga asümmeetrilist potentsiaali sisse ja välja on võimalik teha tööd väli-  
se jõu  $F$  vastu. Kuna osakese keskmise voolu sõltuvus kallutusest  $F$  on tavaliselt pidev, siis on kvalitatiivse analüüsi jaoks piisav, kui uurida juhtu  $F = 0$ : hammasratta efekti ilmnemiseks on sellisel juhul lõpliku voolu  $v \neq 0$  olemasolu  $F = 0$  jaoks. Kui potentsiaal on välja lülitatud, osakesed difundeeruvad võrdse tõenäosusega paremale ja vasakule. Lülitades mõne aja pärast potentsiaali sisse, libisevad osakesed allamäge, perioodilise potentsiaali lähima lokaalse miinimumi suunas. Potentsiaali asümmeetrilise tõttu on iga miinimumi algne populatsioon nüüd jaotatud asümmeetriliselt ning selle tulemusena leiab süsteemis aset keskmine nihe. Sümmeetriliste potentsiaalide korral ei ole hammasratta efekt vaadeldav. Hammasratta efekti ilmnemise juures mängib olulist rolli ka potentsiaali lülitamise sagedus ning samuti temperatuur. Asümptootiliselt aeglase lülitamise korral keskmine osakeste vool  $v$  läheneb nullile, kui  $F = 0$ , s.t hammasratta efekt puudub. Kiire lülitamise korral aga pole osakestel piisavalt aega, et levida, kui potentsiaal on välja lülitatud, ning nad jäävad seega enamasti potentsiaali miinimumi asukohta, kus nad algselt olid.

## 4 ANOMAALSELT AEGLANE DIFUSIOON JÕUVÄLJADES

Vaadeldgem nüüd liikumist pikkade lõksustamisaegadega välises jõuväljas. Anomaalne difusioon, mida kirjeldab fraksionaalne Fokkeri-Plancki võrrand (21), mõjutatud konstantse välise jõu  $F$  poolt, on põhjalikult uuritud nähtus, mis leiab aset mitmetes erinevates süsteemides. Lahendid osakese keskmise koordinaadi ja ruutkeskmise koordinaadi jaoks on



Joonis 4: Efektivne difusioonikoeffitsient  $D$  kallutatud perioodilisel potentsiaalil  $U_0(x) = A \cos(2\pi x/L) - Fx$  vs kallutatav jõud  $F$ . Erinevad kõverad vastavad temperatuuri  $T$  erinevatele väärtustele.

$$\langle x(t) \rangle = \langle x(0) \rangle + \frac{F}{\eta_\alpha} \frac{t^\alpha}{\Gamma(\alpha + 1)}, \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \langle \delta x^2(t) \rangle &= \langle \delta x^2(0) \rangle + 2\kappa_\alpha \frac{t^\alpha}{\Gamma(\alpha + 1)} \\ &+ \frac{F^2}{\eta_\alpha^2} \left[ \frac{2}{\Gamma(2\alpha + 1)} - \frac{1}{\Gamma^2(\alpha + 1)} \right] t^{2\alpha}. \end{aligned} \quad (30)$$

Fraktsionaalne vool on defineeritud kui

$$v_\alpha = \Gamma(\alpha + 1) \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\langle x(t) \rangle - \langle x(0) \rangle}{t^\alpha}. \quad (31)$$

Seega kallutatud, pikkade ooteaegadega ajas pideva uitliikumise korral  $v_\alpha = F\eta_\alpha^{-1}$ . Võrreldes normaalse difusiooniga sisaldab ruutkeskmise koordinaadi avaldis lisaks soojustikule panusele  $\propto t^\alpha$  ka ballistilist liiget  $\propto t^{2\alpha}$ . Tulemuseks on, et  $\alpha < 1$  ei too alati kaasa subdifusset käitumist; kallutuse olemasolul leiab  $0,5 < \alpha < 1$  jaoks aset superdifusioon.

Lõpliku kallutuse  $F$  korral on ballistiline liige võrrandis (30) võrdne nulliga ainult juhul  $\alpha = 1$ , mille korral on tegemist normaalse Browni liikumisega. Võrranditest (29), (30) saadakse üldistatud Einsteini seos, mis on jõus mittelineaarne ning kehtib lõpliku hüppe pikkuse  $\Delta x$  jaoks:

$$\frac{\langle \delta x^2(t) \rangle - \langle \delta x^2(0) \rangle}{\langle x(t) \rangle - \langle x(0) \rangle} = \Delta x \coth(F\beta\Delta x/2). \quad (32)$$

Piiril  $F \rightarrow 0$  läheb võrrand (32) üle hästi tuntud Einsteini seoseks ( $\alpha = 1$ )  $\kappa_\alpha / \mu_\alpha(0) = \beta^{-1}$  soojusliku difusiooni koefitsiendi

$$\kappa_\alpha = \Gamma(\alpha + 1) \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{[\langle \delta x^2(t) \rangle - \langle \delta x^2(0) \rangle]_{F=0}}{2t^\alpha} \quad (33)$$

ja lineaarse liikuvuse  $\mu_\alpha(F=0)$ ,

$$\mu_\alpha(F) = \frac{v_\alpha}{F} = \Gamma(\alpha + 1) \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\langle x(t) \rangle - \langle x(0) \rangle}{Ft^\alpha}, \quad (34)$$

vahel. Sama Einsteini seos kehtib ka subliikuvuse ja subdifusiooni koefitsiendi jaoks iga  $\alpha < 1$  korral [122], kuna ballistiline liige ruutkeskmise koordinaadi avaldises (30) kaob  $F = 0$  korral; kallutuse puudumisel ruutkeskmise koordinaat kasvab ajas  $\propto t^\alpha$ ,

$$\langle \delta x^2(t) \rangle = \langle \delta x^2(0) \rangle + \frac{2\kappa_\alpha}{\Gamma(1+\alpha)} t^\alpha. \quad (35)$$

Ent üldistatud Einsteini seosega (32) analoogne seos lakkab kehtimast  $\alpha < 1$  jaoks iga lõpliku  $F$  väärtuse korral, kuna ruutkeskmises koordinaadis saab pikas ajaskaalas domineerivaks ballistiline panus. Selle asemel saadakse võrranditest (29), (30) järgmine asümptootiline skaleermise seos:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\langle \delta x^2(t) \rangle}{\langle x(t) \rangle^2} = \frac{2\Gamma^2(\alpha+1)}{\Gamma(2\alpha+1)} - 1. \quad (36)$$

See seos ei sisalda enam fraktsionaalseid kiiruseid (sagedusi) ning kehtib sõltumatult kallutuse  $F$  väärtusest ja temperatuurist  $T$ . Seos (36) saadi

esmakordselt artiklis [26, 123] konstantses jõuväljas toimuva ajas pideva uitliikumise jaoks.

Nagu räägitud, on Browni osakeste soojuslik difusioon ruumis perioodilise jõuvälja mõju all laialdast uurimist leidnud probleem. Samas on mitmed bioloogilised ja kondenseeritud aine süsteemid hästi kirjeldatavad korrapäratutel substraatidel liikuvate osakeste kaudu. Sõltuvalt potentsiaali statistilistest omadustest võib pikas ajaskaalas aset leidev protsess olla üsna erinev perioodilisel potentsiaalil toimuvast [10, 124]. On näidatud, et substraadi heterogeensus võib viia anomaalse dünaamika ilmnemisele [10, 125–127]. Võttes arvesse subdifusiooni ning perioodilistel potentsiaalidel toimuva transpordi olulisust mitmetes rakendustes [11, 79, 128], on artiklites [129–131] uuritud juhusliku substraadi ja perioodilise jõu koosmõju. Subdifusust dünaamikat modelleeriti sealjuures juhusliku potentsiaali asemel [129–131] sobiva pika sabaga ooteaegade tõenäosustiheduse kaudu [10, 126, 133]

Artiklites [10, 126, 133] on näidatud, et Stratonovichi lahend (26) stationaarse voolu jaoks perioodilisel potentsiaalil üldistub subdifususele transpordile: vaba difusiooni koefitsient  $D_0$  võrrandis (26) on asendatud vaba fraktsionaalse difusiooni koefitsiendiga  $\kappa_\alpha$ . Lisaks sellele näidati, et skaleeringu seadus (36) on kehtiv ka kallutatud perioodilistel potentsiaalidel toimuva liikumise korral ning et ta on universaalne selles mõttes, et ei sisalda perioodilist potentsiaali  $U_0(x)$ , kallutust  $F$  ega temperatuuri  $T$ . Samuti üldistati Lifsoni-Jacksoni tulemus (25) normaalse difusiooni jaoks perioodilisel potentsiaalil [38, 90, 91] anomaalselt aeglase difusiooni jaoks, asendades  $D_0 \rightarrow \kappa_\alpha$  [131].

Ruumis perioodilistes jõuväljades toimuva normaalse Browni liikumise jaoks kehtivate tulemuste üldistumine subdifusiooni juhule kinnitab veelgi formaalset analoogiat fraktsionaalse ja normaalse difusiooni vahel, lisaks formaalsele sarnasusele Fokkeri-Plancki ja fraktsionaalse Fokkeri-Plancki võrrandite vahel. Ent see formaalne analoogia varjab mõningaid põhilisi füüsikalisi erinevusi. Nimelt leiab pikkade ooteaegade süsteemides aset ergoodilisuse nõrk rikkumine [134], s.t ühe osakese trajektoori keskmistamine üle aja ei ole võrdne keskmistamisega üle ansambli; siin ilmneb oluline erinevus normaalse difusiooniga. Ka paljastavad fundamentaalseid erinevusi anomaalse ja normaalse difusiooni vahel tõenäosustiheduste ajaline evolutsioon konfiguratsiooni-ruumis ning samuti voolu tõenäosustiheduste evolutsioon.

Artiklites [131] leiti, et pärast sobivat aja skaleeringut ühituvad ano-



maalse ning normaalse süsteemi asümptootilised tihedused  $P(x,t)$  koordinaadi  $x$  jaoks perioodilisel potentsiaalil. Selged erinevused ilmnevad ent redutseeritud tõenäosustiheduste käitumistes väikeste evolutsiooniaegade korral.  $P(x,t)$  ajaline evolutsioon muutub lõpliku kallutuse  $F$  rakendamisel drastiliselt: kui kallutatud normaalse difusiooni korral  $P(x,t)$  maksimum liigub normaalse, suunatud vooluga, siis anomaalsel juhul on domineerivaks ballistiline difusioon, mis jätab maksimumi esialgse lähedale (mälu efekti ilming).

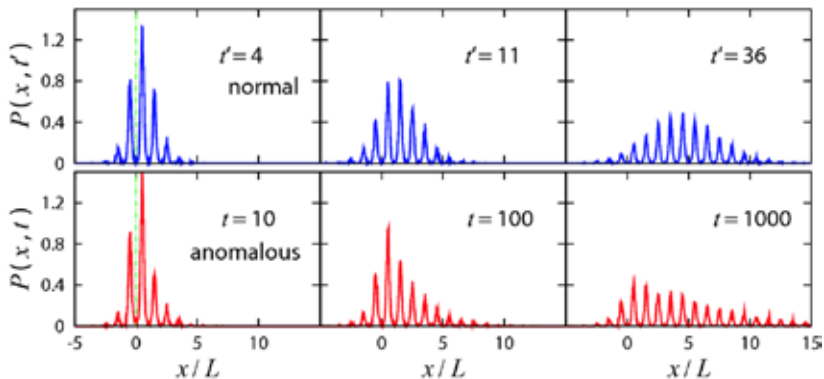
Kuigi voolu keskmine väärtus on antud üldistatud Stratonovichi valemiga nii  $\alpha=1$  kui ka  $\alpha \in (0,1)$  jaoks, siis erinevalt normaalse difusiooni juhust, anomaalse difusiooni korral on voolu tõenäosustihedus  $P(v_\alpha, t)$  väga lai [130, 135]. Jaotuse kuju on universaalne selles mõttes, et ta ei sõltu substraadi potentsiaalist ja temperatuurist, vaid üksnes kallutusest ja fraktsionaalsest eksponentist; liikumisel ainult konstantse jõu mõjuväljas kehtivad samad tulemused.

Nagu juba mainitud ülalpool, viib Browni liikumine ajas muutuvatel potentsiaalidel mitmete huvitavate fenomenide ilmnemisele. Siit aga kerkib küsimus, kas ka anomaalselt aeglase relaksatsiooniga protsesside korral võiksid ilmnedä sarnased mitmekülgsed stsenaariumid. Tegelikult sisaldub see küsimus juba esimestes, pooljuhtides toimuva laengukandjate liikumist kirjeldavates töödes [133] ning seda on uuritud mõningal määral ka hiljem, vt nt [136–14]. Ent fundamentaalsel tasemel on sellele probleemile tähelepanu hakatud pöörama alles hiljuti; üliaeglane relaksatsioon ajast sõltuvates potentsiaaliväljades on triviaalsusest kaugel.

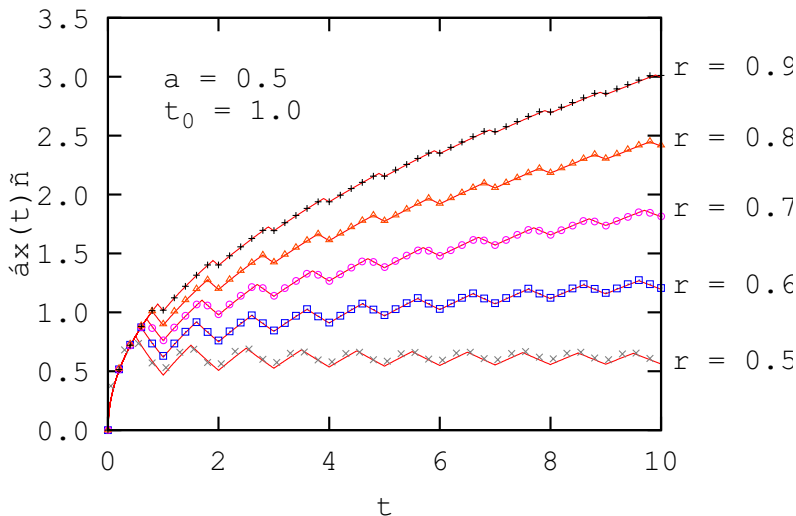
Normaalse difusiooni korral kirjeldab Fokkeri-Plancki võrrand (3) liikumist nii ajas muutumatutes kui ka ajas muutuvates väljades. Artiklites [140–142] on näidatud, et fraktsionaalne Fokkeri-Plancki võrrand kujul (21) ei ole korrektne ajast sõltuva jõu  $f(x,t)$  korral. Artiklites [141, 142] on tuletatud modifitseeritud fraktsionaalne Fokkeri-Plancki võrrand klassi dihhotoomsete jõudude  $f(x,t) = f(x)\xi(t)$ , kus  $\xi(t) = \pm 1$ , jaoks, mis muutuvad nii ruumis kui ajas:

$$\frac{\partial}{\partial t} P(x,t) = \left[ -\frac{\partial}{\partial x} f(x,t) + \kappa_\alpha \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] {}_0\hat{D}_t^{1-\alpha} P(x,t) \quad (37)$$

Erinevalt võrrandist (21) ei seisä fraktsionaalne tuletis siin mitte Fokkeri-Plancki operaatori ees, vaid järel.



Joonis 5: Tõenäosustiheduste ajalised evolutsioonid kallutatud koosinus-potentsiaalil  $U(x) = A \cos(2\pi x/L) - Fx$  normaalse (ülal) ning anomaalse (all) difusiooni jaoks. Reskaleeritud temperatuur on  $k_B T A^{-1} = 0,5$  ning fraktsionaalne eksponent on  $\alpha = 0,5$ . Kallutatav jõud on  $F = 0,1 \times F_{cr}$ , kus  $F_{cr} = 2\pi A L^{-1}$  on reskaleeritud kriitiline kallutus, mis vastab potentsiaali miinimumide kadumisele. Ajad  $t$  ja  $t'$  on seotud  $t' = (t/\tau_u)^\alpha / \Gamma(1+\alpha)$  kaudu, kus  $\tau_u = (\eta_\alpha L^2 / A)^{1/\alpha}$ . Piisavalt väikestel aegadel on normaalse ning anomaalse protsessi tõenäosustihedused väga sarnased. Suurtel aegadel aga (pikas ajaskaalas) liigub normaalse difusiooni tõenäosustiheduse maksimum suunatud vooluga. Fraktsionaalse difusiooni korral on osakeste ruutkeskmises koordinaadis valitsev ballistiline panus ning tõenäosustihedus on tüüpiliselt väljavenitatud kallutuse suunas, samas kui maksimum jääb algtingimustega määratud koha lähedale.



Joonis 6: Osakeste keskmine koordinaat  $\langle x(t) \rangle$  parameetri  $r$  erinevate väärtuste jaoks. Jõu aja-perioodid on  $\tau_0 = 1$ , fraktsionaalne eksponent on  $\alpha = 0,5$  ja  $F_0/\eta_\alpha(\sqrt{\kappa_\alpha}) = 1$  on kasutatud numbrilistes simulatsioonides.

Artiklites [141, 142] on vaadeldud perioodiga  $\tau_0$  ajas perioodilist dihhotoomset jõudu  $f(t) = \pm F_0$ , kus aja  $r\tau_0$  jooksul perioodist jõud on  $+F_0$  ja  $(1-r)\tau_0$  jooksul perioodist  $-F_0$ . Joonistel 6 esitatud tulemused näitavad, et piiril  $t \rightarrow \infty$  ilmneb fraktsionaalse kineetika korral ajast sõltuvate väljade suhtes “lineaarse vaste surma” fenomen (tähelestatud ka artiklites [138, 140]): vahelduvast väljast tingitud ostsillatsioonid hääbuvad mõne aja pärast. Selle tulemuseks on, et keskmise kallutuse puudumisel, pikas ajaskaalas saavutab osakese keskmine koordinaat konstantse väärtuse, selle asemel et olla ostsilleeruv, nagu see on normaalse difusiooni korral. Selline käitumine kaob, kui ooteaegade jaotus võtta ärälõigatud sabaga, mis viib lõpliku esimese momendi olemasolule. Sellisel juhul ilmneb subdifusone käitumine üleminekuna asümptootiliselt normaalsele difusioonile. Keskmise kallutuse olemasolul kasvab osakese keskmine koordinaat  $\propto t^\alpha$ .

Kui ajas perioodilise dihhotoomse jõu  $f(t) = \pm F_0$  keskväärts on null, siis osakeste ruutkeskmise koordinaadi asümptootiline käitumine on  $\propto t^\alpha$ , sarnaselt jõuvabale juhule, ent iseloomustatud vaba fraktsionaalse difusiooni koefitsiendi  $\kappa_\alpha$  asemel efektiivse fraktsionaalse difusiooni koefitsiendiga  $\kappa_\alpha^{(\text{eff})} > \kappa_\alpha$ ; normaalse difusiooni korral oleks efektiivne difusioonikoefitsient võrdne vaba difusiooni koefitsiendiga. Lõpliku keskväärtsusega dihhotoomse jõu korral on ruutkeskmise koordinaadi üldine käitumine sarnane konstantse jõu juhuga, s.t ruutkeskmise koordinaat sisaldab liikmeid  $\propto t^\alpha$  ja  $\propto t^{2\alpha}$ . Sarnaselt konstantse kallutuse juhule kehtib asümptootiline skaleeringu seos (36) ( $r \neq 0,5$ ,  $\langle f(t) \rangle_{\tau_0} \neq 0$ ) ruutkeskmise koordinaadi ja osakese keskmise koordinaadi vahel. See tähendab, et kallutatud difusioon ei ole mõjutatud jõu poolt. Siin ilmneb oluline erinevus kallutuseta difusiooniga, kus ostsilleeriv jõud tekitab efektiivse difusioonikoefitsiendi suurenemise vaba difusiooni koefitsiendi suhtes.

## 5 LÕPETUSEKS

Käesolevas töös on antud lühike ülevaade erinevates jõuväljades toimuvast normaalsest ning subdifusioonist. Samuti on kirjeldatud uitliikumise ja erinevaid ajas pideva uitliikumise mudelid ning vastavaid pidevaid võrrandeid. Uurides difusiooniprotsesse on oluline silmas pidada, et iga suguse suuruse levimist, mis on kirjeldatav difusioonivõrrandiga või uitliikumise mudeliga (nt impulss, ideed, hind), võib nimetada difusiooniks.

Seega leiavad difusiooniprotsessid aset ning on olulised lisaks füüsikale, keemiale ja bioloogiale ka sääraustes valdkondades nagu geneetika, ma- jandus, rahandus, arvamuste dünaamika, lingvistika (keelte evolutsioon ning levimine), populatsioonidünaamika ja teistes komplekssetes süs- teemides. Üks võrrand võib kirjeldada mitmeid probleeme; sama algorit- mi kasutades (või seda veidi modifitseerides) võib modelleerida vägagi erinevaid süsteeme.

Käesolev artikkel on valminud sihtfinantseeritava projekti SF0690030s09, Eesti Teadusfondi grantid 7466 ja projekti FISICOS (FIS2007-60327) toetusel.

## VIITED

- [1] A. Fick, Phil. Mag. 10 (1855) 30.
- [2] A. Fick, Über Diffusion, Ann. Phys. 94 (1855) 59.
- [3] A. Einstein, Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten sus- pendierten Teilchen, Ann. Phys. 17 (1905) 549.
- [4] A. Einstein, Zur Theorie der Brownschen Bewegung, Ann. Phys. 19 (1906) 371.
- [5] M. Smoluchowski, Zur kinetischen Theorie der Brownschen Mo- lekularbewegung und der Suspensionen, Annalen der Physik 21 (1906) 756.
- [6] K. Pearson, The problem of the random walk, Nature 72 (1905) 294.
- [7] L. Bachelier, Théorie de la spéculation, Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure 3 (17) (1900) 21.
- [8] P. H. Cootner, (Ed.), The Random Character of Stock Market Prices, MIT Press, Cambridge, 1964.
- [9] L. Bachelier, M. Davis, A. Etheridge, Louis Bachelier's Theory of Speculation: The Origins of Modern Finance, Princeton University Press, Princeton, 2006.
- [10] J. P. Bouchaud, A. Georges, Anomalous diffusion in disordered media: Statistical mechanisms, models and physical applications, Phys. Rep. 195 (1990) 127.
- [11] R. Metzler, J. Klafter, The random walk's guide to anomalous diffu- sion: A fractional dynamics approach, Phys. Rep. 339 (2000) 1.
- [12] L. F. Richardson, Proc. Roy. Soc. 110 (1926) 709.

- [13] R. Metzler, J. Klafter, The restaurant at the end of the random walk: recent developments in the description of anomalous transport by fractional dynamics, *J. Phys. A: Math. Gen* 37 (2004) R161.
- [14] I. M. Sokolov, J. Klafter, A. Blumen, Fractional kinetics, *Phys. Today* 55 (11) (2002) 48.
- [15] H. Yang, G. Luo, P. Karnchanaphanurach, T.-M. Louie, I. Rech, S. Cova, L. Xun, X. S. Xie, Protein Conformational Dynamics Probed by Single-Molecule Electron Transfer, *Science* 302 (2003) 262.
- [16] S. C. Kou, X. S. Xie, Generalized Langevin Equation with Fractional Gaussian Noise: Subdiffusion within a Single Protein Molecule, *Phys. Rev. Lett.* 93 (2004) 180603.
- [17] N. G. van Kampen, *Adv. Chem. Phys.* 34 (1976) 245.
- [18] N. G. van Kampen, *Stochastic processes in physics and chemistry*, North-Holland, Amsterdam, 1992.
- [19] H. Risken, *The Fokker-Planck Equation*, Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [20] C. W. Gardiner, *Handbook of Stochastic Methods*, Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [21] M. Planck, Über einen Satz der statistischen Dynamik und seine Erweiterung in der Quantentheorie, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.* 24 (1917) 324.
- [22] M. v. Smoluchowski, *Ann. Physik* 48 (1915) 1103.
- [23] E. W. Montroll, G. H. Weiss, Random walks on lattices. II, *J. Math. Phys.* 6 (1965) 167.
- [24] G. H. Weiss, *Aspects and Applications of the Random Walk*, North-Holland, Amsterdam, 1994.
- [25] H. Scher, M. Lax, Stochastic transport in a disordered solid. I. Theory, *Phys. Rev. B* 7 (1973) 4491.
- [26] H. Scher, E. W. Montroll, Anomalous transit-time dispersion in amorphous solids, *Phys. Rev. B* 12 (1975) 2455.
- [27] I. M. Sokolov, R. Metzler, Towards deterministic equations for Lévy walks: The fractional material derivative, *Phys. Rev. E* 67 (2003) 010101.
- [28] R. Gorenflo, F. Mainardi, in: A. Carpinteri, F. Mainardi (Eds.), *Fractals and Fractional Calculus in Continuum Mechanics*, Springer, Wien, 1997, pp. 223-276.
- [29] R. Hilfer, L. Anton, Fractional master equations and fractal time random walks, *Phys. Rev. E* 51 (1995) R848.

- [30] R. Metzler, E. Barkai, J. Klafter, Anomalous Diffusion and Relaxation Close to Thermal Equilibrium: A Fractional Fokker-Planck Equation Approach, *Phys. Rev. Lett.* 82 (1999) 3563.
- [31] E. Barkai, Fractional Fokker-Planck equation, solution, and application, *Phys. Rev. E* 63 (2001) 046118.
- [32] M. v. Smoluchowski, *Physikalische Zeitschr.* 13 (1912) 1069.
- [33] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley, Reading, MA, 1963.
- [34] P. Reimann, Brownian motors: noisy transport far from equilibrium, *Phys. Rep.* 361 (2002) 57.
- [35] J. M. R. Parrondo, P. Espanol, Criticism of Feynman's analysis of the ratchet as an engine, *Am. J. Phys.* 64 (1996) 1125.
- [36] T. R. Kelly, I. Tellitu, J. P. Sestelo, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 36 (1997) 1866.
- [37] T. R. Kelly, J. P. Sestelo, I. Tellitu, New Molecular Devices: In Search of a Molecular Ratchet, *J. Org. Chem.* 63 (1998) 3655.
- [38] S. Lifson, J. L. Jackson, On the Self-Diffusion of Ions in a Polyelectrolyte Solution, *J. Chem. Phys.* 36 (1962) 2410.
- [39] R. Ferrando, R. Spadacini, G. E. Tommei, Correlation functions in surface diffusion: the multiple-jump regime, *Surf. Sci.* 311 (1994) 411.
- [40] R. Ferrando, R. Spadacini, G. E. Tommei, Diffusion in a periodic potential in the strong collision limit, *Chem. Phys. Lett.* 202 (1993) 248.
- [41] P. Fulde, L. Pietronero, W. R. Schneider, S. Strassler, Problem of Brownian Motion in a Periodic Potential, *Phys. Rev. Lett.* 35 (1975) 1776.
- [42] W. Dietrich, P. Fulde, I. Peschel, *Adv. Phys.* 29 (1980) 527.
- [43] M. Mazroui, Y. Boughaleb, Interacting Brownian particles in a two dimensional periodic potential, *Physica A* 227 (1996) 93.
- [44] B. Shapiro, I. Dynan, M. Gitterman, G. H. Weiss, Shapiro steps in the fluxon motion in superconductors, *Phys. Rev. B* 46 (1992) 8416.
- [45] V. Ambegaokar, B. I. Halperin, Voltage Due to Thermal Noise in the dc Josephson Effect, *Phys. Rev. Lett.* 22 (1969) 1364.
- [46] A. Barone, G. Paterno, *Physics and Applications of the Josephson Effect*, Wiley, New York, 1982.
- [47] J. W. M. Frenken, J. F. van der Veen, Observation of Surface Melting, *Phys. Rev. Lett.* 54 (1985) 134.
- [48] B. Pluis, A. W. D. van der Gon, J. W. M. Frenken, J. F. van der Veen, Crystal-Face Dependence of Surface Melting, *Phys. Rev. Lett.* 59 (1987) 2678.

- [49] D. C. Senft, G. Ehrlich, Long Jumps in Surface Diffusion: One-Dimensional Migration of Isolated Adatoms, *Phys. Rev. Lett.* 74 (1995) 294.
- [50] T. R. Linderoth, S. Horch, E. Laegsgaard, I. Stensgaard, F. Besenbacher, Surface Diffusion of Pt on Pt(110): Arrhenius Behavior of Long Jumps, *Phys. Rev. Lett.* 78 (1997) 4978.
- [51] P. Talkner, E. Hershkovitz, E. Pollak, P. Hänggi, Controlling activated surface diffusion by external fields, *Surf. Sci.* 437 (1999) 198.
- [52] G. I. Nixon, G. W. Slater, Entropic trapping and electrophoretic drift of a polyelectrolyte down a channel with a periodically oscillating width, *Phys. Rev. E* 53 (1996) 4969.
- [53] D. Reguera, J. M. Rubi, A. Pérez-Madrid, Controlling anomalous stresses in soft field-responsive systems, *Phys. Rev. E* 62 (2000) 5313.
- [54] A. I. Burshtein, Y. Georgievskii, Energy activation of adiabatic and nonadiabatic electron transfer, *J. Chem. Phys.* 100 (1994) 7319.
- [55] W. Schleich, C. S. Cha, J. D. Cresser, Quantum noise in a dithered-ring-laser gyroscope, *Phys. Rev. A* 29 (1984) 230.
- [56] T. Katsouleas, J. M. Dawson, Unlimited Electron Acceleration in Laser-Driven Plasma Waves, *Phys. Rev. Lett.* 51 (1983) 392.
- [57] K. Wiesenfeld, D. Pierson, E. Pantazelou, C. Dames, F. Moss, Stochastic resonance on a circle, *Phys. Rev. Lett.* 72 (1994) 2125.
- [58] C. Kurrer, K. Schulten, Noise-induced synchronous neuronal oscillations, *Phys. Rev. E* 51 (1995) 6213.
- [59] A. G. Naumovets, Z. Zhang, Fidgety particles on surfaces: how do they jump, walk, group, and settle in virgin areas?, *Surf. Sci.* 500 (2002) 414.
- [60] T. Ala-Nissila, R. Ferrando, S. C. Ying, *Adv. Phys.* 51 (2002) 949.
- [61] B. S. Swartzentruber, Direct Measurement of Surface Diffusion Using Atom-Tracking Scanning Tunneling Microscopy, *Phys. Rev. Lett.* 76 (1996) 459.
- [62] W. Wulfhekel, B. J. Hattink, H. J. W. Zandvliet, G. Rosenfeld, B. Poelsema, Dynamics and Energetics of Si Ad-dimers and Ad-dimer Clusters on Ge(100), *Phys. Rev. Lett.* 79 (1997) 2494.
- [63] H. J. W. Zandvliet, T. M. Galea, E. Zoethout, B. Poelsema, Diffusion Driven Concerted Motion of Surface Atoms: Ge on Ge(001), *Phys. Rev. Lett.* 84 (2000) 1523.
- [64] S. Savel'ev, F. Marchesoni, F. Nori, Controlling Transport in Mixtures of Interacting Particles using Brownian Motors, *Phys. Rev. Lett.* 91 (2003) 010601.

- [65] S. Savel'ev, F. Marchesoni, F. Nori, Manipulating Small Particles in Mixtures far from Equilibrium, *Phys. Rev. Lett.* 92 (2004) 160602.
- [66] Q. H. Wei, C. Bechinger, P. Leiderer, Single-File Diffusion of Colloids in One-Dimensional Channels, *Science* 287 (2000) 625.
- [67] C. Lutz, M. Kollmann, C. Bechinger, Single-File Diffusion of Colloids in One-Dimensional Channels, *Phys. Rev. Lett.* 93 (2004) 026001.
- [68] R. Gommers, S. Bergamini, F. Renzoni, Dissipation-Induced Symmetry Breaking in a Driven Optical Lattice, *Phys. Rev. Lett.* 95 (2005) 073003.
- [69] R. Gommers, S. Denisov, F. Renzoni, Quasiperiodically Driven Ratchets for Cold Atoms, *Phys. Rev. Lett.* 96 (2006) 240604.
- [70] J. F. Wambaugh, C. Reichhardt, C. J. Olson, F. Marchesoni, F. Nori, Superconducting Fluxon Pumps and Lenses, *Phys. Rev. Lett.* 83 (1999) 5106.
- [71] A. Tonomura, Applications of electron holography, *Rev. Mod. Phys.* 59 (1987) 639.
- [72] D. A. Doyle, J. M. Cabral, R. A. Pfuetzner, A. Kuo, J. M. Gulbis, S. L. Cohen, B. T. Chait, R. MacKinnon, The Structure of the Potassium Channel: Molecular Basis of  $K^+$  Conduction and Selectivity, *Science* 280 (1998) 69.
- [73] B. A. *et al.*, *Molecular Biology of the Cell*, Garland, New York, 1994.
- [74] J. Kärger, D. M. Ruthven, *Diffusion in Zeolites and Other Microporous Solids*, Wiley, New York, 1992.
- [75] S. Matthias, F. Muller, *Nature* 424 (2003) 53.
- [76] Z. Siwy, A. Fulinski, Fabrication of a Synthetic Nanopore Ion Pump, *Phys. Rev. Lett.* 89 (2002) 198103.
- [77] C. Kettner, P. Reimann, P. Hänggi, F. Müller, Drift ratchet, *Phys. Rev. E* 61 (2000) 312.
- [78] R. D. Astumian, P. Hänggi, Brownian Motors, *Phys. Today* 55 (11) (2002) 33.
- [79] P. Reimann, P. Hänggi, Introduction to the Physics of Brownian Motors, *Appl. Phys. A* 75 (2002) 169.
- [80] P. Hänggi, F. Marchesoni, F. Nori, Brownian motors, *Ann. Phys. (Leipzig)* 14 (2005) 51.
- [81] F. Jülicher, A. Ajdari, J. Prost, Modeling molecular motors, *Rev. Mod. Phys.* 69 (1997) 1269.
- [82] N. Thomas, R. A. Thornhill, The physics of biological molecular motors, *J. Phys. D* 31 (1998) 253.



- [83] S. Leibler, D. A. Huse, *J. Cell Biol.* 121 (1993) 1357.
- [84] J. L. Mateos, Current reversals in deterministic ratchets: points and dimers, *Physica D* 168-169 (2002) 205.
- [85] J. L. Mateos, Walking on ratchets with two Brownian motors, *Fluct. Noise Lett.* 4 (2004) L161.
- [86] J. L. Mateos, A random walker on a ratchet, *Physica A* 351 (2005) 79.
- [87] M. Patriarca, P. Szelestey, E. Heinsalu, Brownian model of dislocated dislocations, *Acta Phys. Pol. B* 36 (2005) 1745.
- [88] G. Schoeck, W. Püschl, *Mat. Sci. Eng. A* 189 (1994) 61.
- [89] G. Schoeck, *Scripta Metal. Mat.* 30 (1994) 611.
- [90] R. Festa, E. G. d'Agliano, Diffusion coefficient for a Brownian particle in a periodic field of force : I. Large friction limit, *Physica A* 90 (1978) 229.
- [91] D. L. Weaver, Effective diffusion coefficient of a Brownian particle in a periodic potential, *Physica* 98A (1979) 359.
- [92] R. L. Stratonovich, *Radiotekh. Electron. (Moscow)* 3 (1958) 497.
- [93] P. I. Kuznetsov, R. L. Stratonovich, V. I. T. (Eds.), Pergamon, Oxford, 1965.
- [94] P. Reimann, C. van den Broeck, H. Linke, P. Hänggi, J. M. Rubi, A. Pérez-Madrid, Giant Acceleration of Free Diffusion by Use of Tilted Periodic Potentials, *Phys. Rev. Lett.* 87 (2001) 010602.
- [95] P. Reimann, C. van den Broeck, H. Linke, P. Hänggi, J. M. Rubi, A. Pérez-Madrid, Diffusion in tilted periodic potentials: Enhancement, universality, and scaling, *Phys. Rev. E* 65 (2002) 031104.
- [96] B. Lindner, M. Kostur, L. Schimansky-Geier, *Fluct. Nois Lett.* 1 (2001) R25.
- [97] D. R. Cox, *Renewal Theory*, Methuen & Co., London, 1962.
- [98] G. Costantini, F. Marchesoni, Threshold diffusion in a tilted washboard potential, *Europhys. Lett.* 48 (1999) 491.
- [99] E. Heinsalu, R. Tammelo, T. Örd, Diffusion and current of Brownian particles in tilted piecewise linear potentials: Amplification and coherence, *Phys. Rev. E* 69 (2004) 021111.
- [100] E. Heinsalu, R. Tammelo, T. Örd, Correlation between diffusion and coherence in the Brownian motion on tilted periodic potential, *Physica A* 340 (2004) 292.
- [101] E. Heinsalu, T. Örd, R. Tammelo, Diffusion and coherence in tilted piecewise linear double-periodic potentials, *Phys. Rev. E* 70 (2004) 041104.

- [102] E. Heinsalu, T. Örd, R. Tammelo, Peculiarities of Brownian motion depending on the structure of the periodic potentials, *Acta Physica Polonica B* 36 (2005) 1613.
- [103] T. Örd, E. Heinsalu, R. Tammelo, Suppression of diffusion by a weak external field in periodic potentials, *Eur. Phys. J. B* 47 (2005) 275.
- [104] M. Borromeo, F. Marchesoni, A.c.-driven jump distributions on a periodic substrate, *Surf. Sci.* 465 (2000) L771.
- [105] A. G. Naumovets, Y. S. Vedula, Surface diffusion of adsorbates, *Surf. Sci. Rep.* 4 (1985) 365.
- [106] R. Gomer, Diffusion of adsorbates on metal surfaces, *Rep. Prog. Phys.* 53 (1990) 917.
- [107] M. Porto, M. Urbakh, J. Klafter, Atomic Scale Engines: Cars and Wheels, *Phys. Rev. Lett.* 84 (2000) 6058.
- [108] S. C. Wang, G. Ehrlich, Structure, stability, and surface diffusion of clusters:  $\text{Ir}_x$  on Ir(111), *Surf. Sci.* 239 (1990) 301.
- [109] G. Kellogg, Diffusion behavior of Pt adatoms and clusters on the Rh(100) surface, *Appl. Surf. Sci.* 67 (1993) 134.
- [110] S. C. Wang, G. Ehrlich, Diffusion of Large Surface Clusters: Direct Observations on Ir(111), *Phys. Rev. Lett.* 79 (1997) 4234.
- [111] S. C. Wang, U. Kürpick, G. Ehrlich, Surface Diffusion of Compact and Other Clusters:  $\text{Ir}_x$  on Ir(111), *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998) 4923.
- [112] A. F. Voter, Classically exact overlayer dynamics: Diffusion of rhodium clusters on Rh(100), *Phys. Rev. B* 34 (1986) 6819.
- [113] C.-L. Liu, J. B. Adams, Structure and diffusion of clusters on Ni surfaces, *Surf. Sci.* 268 (1992) 73.
- [114] C. Massobrio, P. Blandin, Structure and dynamics of Ag clusters on Pt(111), *Phys. Rev. B* 47 (1993) 13687.
- [115] J. C. Hamilton, M. S. Daw, S. M. Foiles, Dislocation Mechanism for Island Diffusion on fcc (111) Surfaces, *Phys. Rev. Lett.* 74 (1995) 2760.
- [116] S. V. Khare, N. C. Bartelt, T. L. Einstein, Diffusion of Monolayer Adatom and Vacancy Clusters: Langevin Analysis and Monte Carlo Simulations of their Brownian Motion, *Phys. Rev. Lett.* 75 (1995) 2148.
- [117] D. S. Sholl, R. T. Skodje, Diffusion of Clusters of Atoms and Vacancies on Surfaces and the Dynamics of Diffusion-Driven Coarsening, *Phys. Rev. Lett.* 75 (1995) 3158.
- [118] E. Heinsalu, M. Patriarca, F. Marchesoni, Dimer diffusion in a washboard potential, *Phys. Rev. E* 77 (2008) 021129.

- [119] P. Hänggi, F. Marchesoni, 100 years of Brownian motion, *Chaos* 15 (2005) 026101.
- [120] M. Borromeo, F. Marchesoni, Noise-assisted transport on symmetric periodic substrates, *Chaos* 15 (2005) 026110.
- [121] L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung, F. Marchesoni, Stochastic resonance, *Rev. Mod. Phys.* 70 (1998) 223.
- [122] E. Barkai, V. N. Fleurov, Generalized Einstein relation: A stochastic modeling approach, *Phys. Rev. E* 58 (1998) 1296.
- [123] M. Shlesinger, Asymptotic solutions of continuous-time random walks, *J. Stat. Phys.* 10 (1974) 421.
- [124] Y. Kafri, D. K. Lubensky, D. R. Nelson, *Biophys. J.* 86 (2004) 3373.
- [125] J. W. Haus, K. W. Kehr, Diffusion in regular and disordered lattices, *Phys. Rep.* 150 (1987) 263.
- [126] J. P. Bouchaud, A. Comtet, A. Georges, P. L. Doussal, Classical diffusion of a particle in a one-dimensional random force field, *Ann. Phys. (N.Y.)* 201 (1990) 285.
- [127] B. Derrida, Velocity and diffusion constant of a periodic one-dimensional hopping model, *J. Stat. Phys.* 31 (1983) 433.
- [128] I. M. Sokolov, J. Klafter, From diffusion to anomalous diffusion: A century after Einstein's Brownian motion, *Chaos* 15 (2005) 026103.
- [129] I. Goychuk, E. Heinsalu, M. Patriarca, G. Schmid, P. Hänggi, Current and universal scaling in anomalous transport, *Phys. Rev. E.* 73 (2006) 020101(R).
- [130] E. Heinsalu, M. Patriarca, I. Goychuk, G. Schmid, P. Hänggi, Fractional Fokker-Planck dynamics: Numerical algorithm and simulations, *Phys. Rev. E* 73 (2006) 046133.
- [131] E. Heinsalu, M. Patriarca, I. Goychuk, P. Hänggi, Fractional diffusion in periodic potentials, *J. Phys.: Condens. Matter* 19 (2007) 065114.
- [132] B. Lindner, L. Schimansky-Geier, Noise-Induced Transport with Low Randomness, *Phys. Rev. Lett.* 89 (2002) 230602.
- [133] H. Scher, E. W. Montroll, Anomalous transit-time dispersion in amorphous solids, *Phys. Rev. B* 12 (1975) 2455.
- [134] G. Bel, E. Barkai, Weak Ergodicity Breaking in the Continuous-Time Random Walk, *Phys. Rev. Lett.* 94 (2005) 240602.
- [135] I. M. Sokolov, E. Heinsalu, P. Hänggi, I. Goychuk, Universal fluctuations in subdiffusive transport, *Europhys. Lett.* 86 (2009) 30009.

- [136] I. M. Sokolov, A. Blumen, J. Klafter, Dynamics of annealed systems under external fields: CTRW and the fractional Fokker-Planck equations, *Europhys. Lett.* 56 (2001) 175.
- [137] I. M. Sokolov, A. Blumen, J. Klafter, Linear response in complex systems: CTRW and the fractional Fokker-Planck equations, *Physica A* 302 (2001) 268.
- [138] F. Barbi, M. Bologna, P. Grigolini, Linear Response to Perturbation of Nonexponential Renewal Processes, *Phys. Rev. Lett.* 95 (2005) 220601.
- [139] I.M. Sokolov, Linear response to perturbation of nonexponential renewal process: A generalized master equation approach, *Phys. Rev. E* 73 (2006) 067102.
- [140] I. M. Sokolov, J. Klafter, Field-Induced Dispersion in Subdiffusion, *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 140602.
- [141] E. Heinsalu, M. Patriarca, I. Goychuk, P. Hänggi, Use and Abuse of a Fractional Fokker-Planck Dynamics for Time-Dependent Driving, *Phys. Rev. Lett.* 99 (2007) 120602.
- [142] E. Heinsalu, M. Patriarca, I. Goychuk, P. Hänggi, Fractional Fokker-Planck subdiffusion in alternating force fields, *Phys. Rev. E.* 79 (2009) 041137.

# NANOMEETEROSAKESTE TEKKIMINE VEE PRITSIMISEL

---

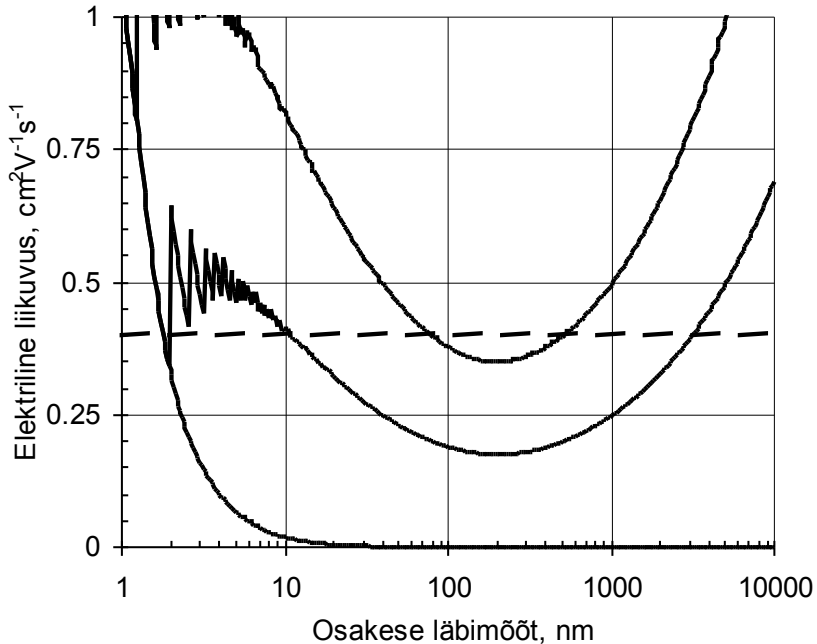
HANNES TAMMET JA URMAS HÕRRAK

TÜ Füüsika Instituut

## SISSEJUHATUS

Õhu ruumlaengu tekkimist vee pritsimise tulemusena nimetatakse *balloelektriliseks efektiks* või *Lenardi efektiks* ja pritsimisel tekkivaid laetud osakesi nimetatakse *balloelektrilisteks ioonideks*. Nähtuse avastajaks peetakse tavaliselt Ungari-Saksa teadlast Philipp Lenardit (1862–1947), kes 1905. aastal sai Nobeli preemia katoodkiirte uurimise eest. Klassikaks kujunenud 53-leheküljelises artiklis „Koskede elekter“ (Lenard, 1892) kirjutab ta aga ise: „On ammu tuntud, et kosked laevad õhku enda ümbruses negatiivse elektriga“. Termin *balloelektriline efekt* võttis alles 1913. aastal kasutusele von Christiansen. Viimane artikkel (Christiansen, 1913) sisaldab autori enda katsetulemuste kõrval head ülevaadet efekti varasemast uurimisest, millest on teiste hulgas osa võtnud M. Faraday, Lord Kelvin, J.J. Thomson, L. de Broglie ja J.S. Townsend.

Algperioodil sai selgeks nähtuse fenomenoloogia ja üldjoontes ka üks laengu tekkimise mehhanism: laengu eraldumine ülipeente tilkade väljarebimisel vedeliku pinnal olevast elektrilisest kaksikkühist. Laengukandjate suurus ja tekkemehhanismi üksikasjad jäid selgusetuks. Laboratooriumis tekitatud balloelektriliste osakeste elektrilise liikuvuse  $0,3\text{--}0,4\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  mõõtis esimesena korrektselt Seville Chapman (1937) Berkeley ülikoolis. Chapman, nagu tema eelkäijadki, oletas spekulatiivselt, et osakesed kannavad ühtainust elementaarlaengut, mispuhul mõõdetud liikuvusele vastaks osakese läbimõõt 2–3 nm. Hilisemad uuringud seadsid aga ühekordse laengu hüpoteesi kahtluse alla. Mitme elementaarlaenguga laetud tilkade elektriline liikuvus võib vastata balloelektriliste laengukandjate liikuvusele ka suure läbimõõdu puhul, vt joonis 1.



Joonis 1. Veetilgade elektriline liikuvus temperatuuril 10°C ja rõhul 1000 mb. Ülemine kõver vastab Rayleigh' piirleaugule, keskmine poolele piirleaugust ja alumine ühele elementaarleaugule. Rayleigh' piirleaug on suurim laeng, mille puhul tilka koos hoidev pindpinevus ületab laengukandjate elektrostaatilise tõukejõu ja tilk ei lagune. Kõverate „võnked“ diagrammi vasakus servas tulenevad laengu diskreetsusest. Horisontaalne kriipsjoon näitab, millised läbimõõdud võivad vastata näiteks valitud liikuvusele 0,4 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>.

Üht elementaarleaugut kandvate nanotilkade hüpoteesi seadsid kahtluse alla kaks argumenti. Balloelektrilise efekti tekitamiseks piisab veejoa või langevate veepiiskade kiirusest paar meetrit sekundis. Kui vee kineetiline energia muuta ühesuuruste fragmentide pinnaenergiaks, siis oleks 10 nm fragmentide moodustamiseks tarvis algiirust 290 m/s ja 2–3 nm fragmentide korral veel enam. See välistab kogu tilga pihustamise nanotilkadeks, aga ei välista siiski väikese arvu nanotilkade tekkimist. Paraku osutub tilkade pihustamise mikromehaanika ka kaasaegele eksperimenditehnikale pea kättesaamatuks (Villiermaux, 2007; Thoroddsen, 2008) ning küsimused on tänaseni vastusetu. Teine vastuargument on tilkade aurumine. Klassikalise teooria kohaselt peaks

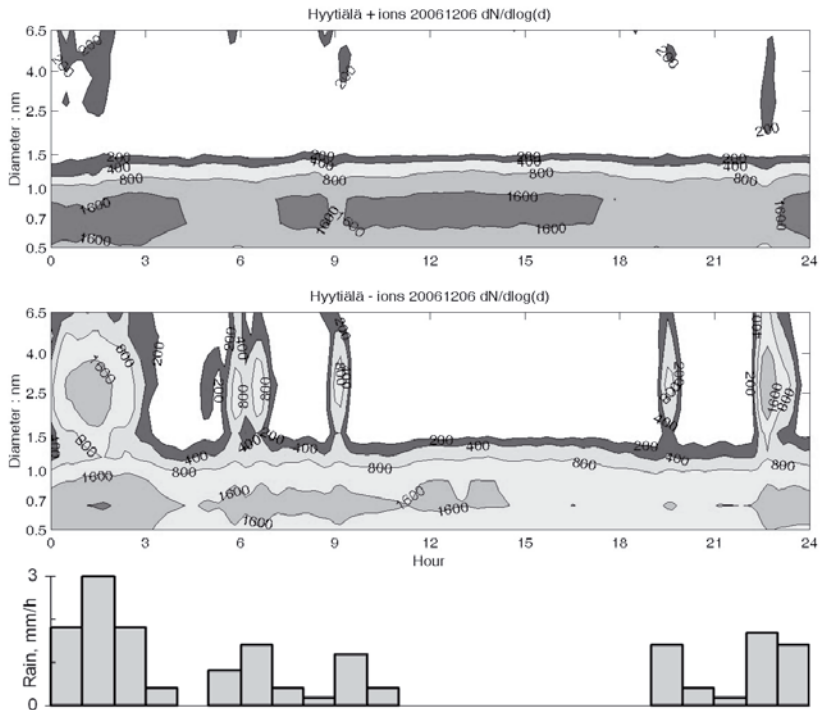
mõne nanomeetrilise läbimõduga tilgad täielikult auruma vähem kui ühe mikrosekundi jooksul ka 100% suhtelise niiskusega õhus. Seetõttu peaks nende kontsentratsioon balloelektrilise efekti katsetes olema kaugetl alla aparatuuri tundlikkuse läve.

Balloelektrilist efekti on kasutatud õhu elektriliseks laadimiseks füsioteraapia eesmärgil, mispuhul laengukandjaid on nimetatud hüdroaeroioonideks või elektroaerosooliosakesteks (Wehner, 1987). Eestis konstrueeriti vastavaid aparate eelmise sajandi viiekümnendatel ja kuuekümnendatel aastatel Jaan Reineti juhtimisel. Füüsikalisi uuringuid tehes leidsid Salm ja Tamm (1963), et laengukandjate domineeriv liikuvus füsioteraapia otstarbeks ehitatud seadme puhul on *ca*  $0,3 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ , kuid tilkade keskmist läbimõõtu hindasid nad  $4 \mu\text{m}$ .

Balloelektrilise efekti olemus ja oletatavate laetud nanotilkade tekkimise mikrofüüsikaline mehhanism jäi pikaks ajaks arusaamatuks ning uute ideede puudumise tõttu jäid lahendamata probleemid viimastel aastakümnetel pea unustusse.

## **ATMOSFÄÄRIAEROSOLI TEKKIMINE JA BALLOELEKTRILINE EFEKT**

Balloelektriline efekt kerkis uuesti päevakorra atmosfääri aerosooliteke uurimisel. Maakera kliimat mõjutavate faktorite hulgas on atmosfääriaerosool sama oluline kui kasvuhoonegaasid. Uute aerosooliosakeste tekkimine atmosfääri gaasilistest komponentidest ehk erialaterminoloogia kohaselt nukleatsioon on üks kliimamuutuste mehhanismide selgitamise võtmeküsimustest. Seetõttu on nanomeeterosakeste tekkimine ja kasvamine viimasel aastakümnel intensiivse uurimistöö objekt (Kulmala jt, 2004, 2007; Winkler jt, 2008; Mirme jt, 2009). Nanomeeterosakesed tekivad tavaliselt mõnetunniliste puhangutena, mille algstaadiume uuritakse keskmise liikuvusega ( $0,034\text{--}0,5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) ioonide mõõtmise teel (Tamm et al, 1988; Hörrak jt, 1998; Hirsikko jt, 2007). Tavalised keskmiste ioonide puhangud on seletatavad atmosfääris leiduvate ülimaldala kontsentratsiooniga lisandainete äkilise kondenseerumisega osakesteks. Küllaltki sagedased on aga valdavalt negatiivselt laetud keskmiste ioonide puhangud, mis tekivad vihma ajal (Hörrak jt, 2006; Hirsikko jt, 2007). Selliseid puhanguid seletatakse tilkade pihustumisel esineva balloelektrilise efektiga.



Joonis 2. Atmosfääriioonide suurusjaotuse ja vihma intensiivsuse evolutsioon Soomes Hyytiälä uurimisjaamas 6. detsembril 2006. a. Õhu temperatuur varieerus ööpäeva jooksul vahemikus 5,0–8,5°C ja suhteline niiskus vahemikus 83–96%.

Balloelektriliste ionide puhanguid vihma ajal illustreerib joonis 2.

Balloelektrilise efekti olemusest aru saamata on raske vastata küsimusele, kas maha langevate vihmatilekade pihustumine võib tekitada kliima-protsesside mõjutamiseks piisava suuruse ja stabiilsusega aerosooliosa-kesi või on vihma-aegne balloelektriline efekt vaid nanomeetertasandi nähtus. See küsimus sai balloelektrilise efekti uurimisel uue laine ajendiks. Teiseks ajendiks on uute atmosfääriuringuteks sobivate liikuvusspektromeetrite (Tammets, 2006; Mirme jt, 2007) olemasolu. Nimetatud riistade abil on mõõdetud keskmiste ionide liikuvusjaotusi vihma ajal (Hõrrak jt, 2006) ja koskede läheduses (Laakso jt, 2007). Need looduses teostatud mõõtmised aga ei saa anda vastuseid kolmele alusküsimusele, mida käsitletakse artiklis (Tammets jt, 2009) ja lühidalt alljärgnevas.

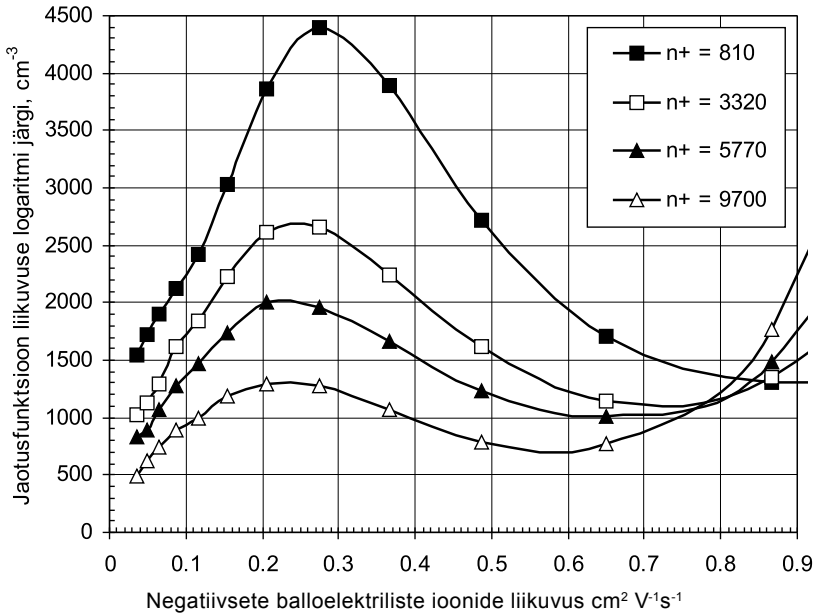


## **ESIMENE KÜSIMUS: KAS BALLOELEKTRILISED OSAKESED ON ÜHEKORDSELT VÕI MITMEKORDSELT LAETUD?**

Vastuse saamiseks korraldati laboratoorne katse, mille põhimõte on järgmine. Balloelektrilisi ioone genereeriti kraanivee joa pörkumisel vastu keraamilist plaati. Foto näitas, et juga lagunes enne pörkumist tilkadeks, mis sarnanesid suurte vihmatilekadega. Pritsimisel tekkinud keskmisi ioone neutraliseeriti vähemal või rohkemal määral klasterioonide abil, mille kontsentratsiooni reguleeriti ruumi õhku ioniseeriva kiirguse intensiivsuse muutmise teel. Klasteriooni ruumala on üht elementaarlaengut kandva balloelektrilise iooni ruumalast *ca* 40 korda väiksem ja selle neelamine ei muuda oluliselt balloelektrilise iooni läbimõõtu. Ühekordselt laetud nanomeeterosakesed ja algselt sama liikuvusega paljukordselt laetud mikromeeterosakesed käituvad aga neutraliseerimisel erinevalt. Ühekordselt laetud nanomeeterosake neutraliseerub alati täielikult. Neutraliseerimata jäänud laetud osakeste liikuvus ei muutu, kontsentratsioon aga kahaneb koos neutraliseerivate klasterioonide kontsentratsiooni suurendamisega. Paljukordselt laetud mikromeeterosakesed neutraliseeruvad aga järk-järgult, mille juures laetud osakeste numbriline kontsentratsioon ei muutu, liikuvus ja laengukontsentratsioon aga kahanevad võrdeliselt osakeste laenguga.

Katse tehti *ca* 17 m<sup>3</sup> ruumis, milles õhku segati ventilaatori abil. Veejoa kiirus 11 m s<sup>-1</sup> oli vihmatilekade langemise maksimumkiirusest veidi suurem ja vee kulu vastas ligilähedaselt hoovihmade maksimaalsele intensiivsusele. Klasterioone genereeris beetakiirgaja, mille intensiivsust reguleeriti sobiva paksusega alumiiniumplaatide abil. Liikuvusjaotust mõõdeti atmosfääriioonide spektromeetriga BSMA (Tamm, 2006). Balloelektrilisedioonid kannavad valdavalt negatiivseid laenguid ja joonis 3 esitab tulemusi positiivsete klasterioonide abil osaliselt neutraliseeritud negatiivsete balloelektriliste ioonide jaoks.

Balloelektriliste ioonide laengukontsentratsioon joonisel 3 kujutatud eksperimendis langes üle kolme korra. Kui need ioonid oleksid paljukordselt laetud mikromeeterosakesed, siis oleks ka jaotuskõvera maksimumile vastav liikuvus pidanud vähenema üle kolme korra. Seda aga ei saa täheldada, liikuvus kahaneb ülemisi kõveraid alumistega võrreldes vähem kui 20% võrra. Nõrgema neutraliseerimise korral (ülemised kõverad) on osakesed keskmiselt vanemad. Osaline aurumine on kahandanud nende läbimõõtu ja sellele vastavalt suurendanud liikuvust. Siit järeldus: balloelektri-



Joonis 3. Negatiivsete balloelektriliste ionide järkjärguline neutraliseerimine. Kõverate tõus paremal tiival on põhjustatud klasterioonidest, mille enamuse liikuvus jääb aga skaalast välja. Erinevad kõverad vastavad positiivsete klasterioonide erinevatele kontsentratsioonidele, mis on legendis avaldatud ühikutes  $\text{cm}^{-3}$ . Madalaim kontsentratsioon  $n^+ = 810 \text{ cm}^{-3}$  on ruumi õhu ionisatsiooni looduslik foon. Eriti suure kontsentratsiooniga balloelektriliste ionide liikuvuse mõõtmise tulemus võib olla veidi häiritud õhu ruumlaengu poolt põhjustatud elektriväljast. Iseloomulikule liikuvusele  $0,22 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  vastab ühekordselt laetud osakese läbimõõt 2,5 nm.

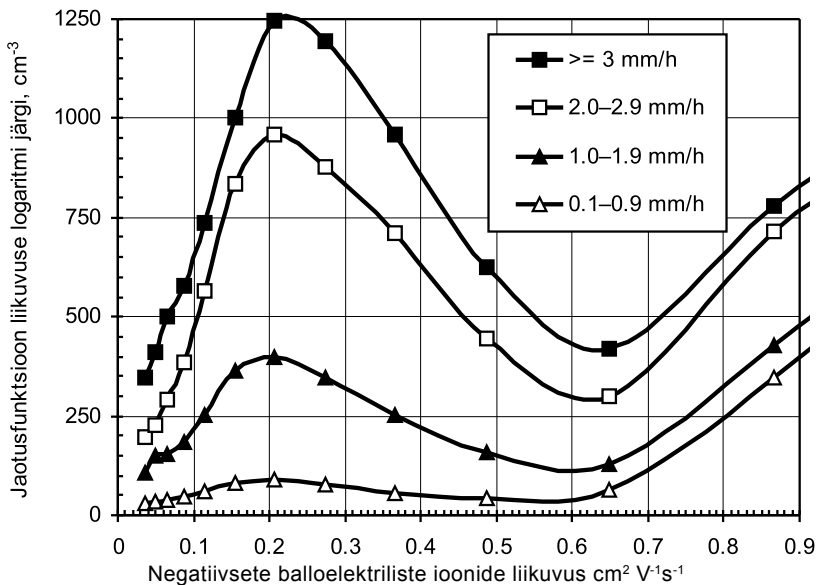
lised ionid ei ole paljukordselt laetud mikromeeterosakesed ja Chapmani hüpotees ühekordselt laetud nanomeeterosakestest peab ilmselt paika. Kirjeldatud katse on selle väite esmakordne eksperimentaalne tõestus.

## **TEINE KÜSIMUS: KAS BALLOELEKTRILISED OSAKESED ON VEETILKADE AURUMISEL TEKKINUD KUIVJÄÄGID?**

Varastes uurimustes eeldatakse vaikides, et balloelektrilised ionid koosnevad veest. Sellele räägib aga vastu asjaolu, et nanomeetertilgad peaks

klassikalise teooria kohaselt täielikult auruma vähem kui mikrosekundi jooksul. Eelkirjeldatud katses kulub ruumi õhu liikumisest kantud ioonide jõudmiseks pihustamiskohast liikuvusspektromeetrini mitu sekundit, mistõttu mõõtmiskohani jõudnud nanomeeterosakeste kontsentratsioon peaks olema kaugelt allpool aparadi tundlikkuse läve. Hüpoteesi, mille kohaselt balloelektrilised ioonid on hoopiski tilkade aurumise kuivjäädid, toetab ka fakt, et 2,5 nm kuivjäädide tekitamiseks on tarvis vett pihustada kuivjäädigist 10–100 korda suuremateks tilkadeks, mis on energeetiliselt hoopiski soodsam kui nanotilkade tekitamine.

Küsimusele vastuse saamiseks võrdleme erineva puhtusega vee pihustamisel saadud balloelektriliste ioonide liikuvusi. Joonisel 3 on Tartu Ülikooli füüsikahoone kraanivee pihustamisel saadud liikuvusjaotused. Selle vee kuivainesisalduse mõõtmine kuivatamise ja kaalumise meetodil andis tulemuse  $0,55 \text{ g dm}^{-3}$ . Joonisel 4 on looduses vihma ajal mõõdetud liikuvusspektrid. Vihmavee kuivainesisaldus on füüsikahoone kraanivee kuivainesisaldusest *ca* 50 korda väiksem. Ei ole alust eeldada olulist erinevust vee pihustamise mehhanismis ja seega peaksid vihma



Joonis 4. Balloelektriliste ioonide keskmised liikuvusjaotused Soomes saasteallikatest kaugel asuvas Hyttiälä uurimisjaamas olevalt vihma intensiivsusest. Jaotused on mõõdetud sama tüüpi spektromeetriga BSMA kui joonisel 3 esitatud liikuvusjaotuste määramise katsetes.

korral tekkivad kuivjäädid olema kraanivee kuivjäädidest 3–4 korda väiksema läbimõõduga. Jooniste 3 ja 4 võrdlemine aga näitab, et liikuvused ja järelikut ka läbimõõdud on ühesugused. Siit järeldub, et balloelektrilised ioonid loodusliku vihma korral ja eelpool kirjeldatud laboratoorses katses on sarnased ja ilmselt ei ole nad tilkade aurumise kuivjäädid.

## **KOLMAS KÜSIMUS: KUIDAS NANOMEETERTILGAD SUUDAVAD ÕHUS AURUMATA PÜSIDA?**

Kahele esimesele küsimusele leidsime eespool mingil määral põhjendatud vastused. Kolmandale küsimusele vastamiseks aga ei oska autorid eksperimenti kavandada. Usaldusväärne on vaid väide, et kui eeltoodud järeldused on õiged ja balloelektrilised ioonid koosnevad veest, siis ei saa tilkade aurumise klassikaline teooria balloelektriliste ionide korral paika pidada. Klassikalise teooria järgi tehtud arvutus annab  $0,22 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  liikuvuse ja sellele vastavalt 2,5 nm läbimõõduga tilga iseloomulikuks aurumisajaks (läbimõõdu ja läbimõõdu kahanemiskiiruse suhe) vähem kui 1 mikrosekund (Tammet jt, 2009). Katsetes mõõdetud balloelektriliste ionide eluiga on sellest vähemalt kuus suurusjärku suurem.

Ilmnenud vastuolu võiks seletada balloelektriliste ionide erilise struktuuriga, mis tavalise veetilgaga võrreldes raskendab nende aurumist ja pikendab eluiga. Atmosfääriioonide uurimisega tuntuks saanud Läti päritolu teadlane Reinhard Siksna juhtis juba ammu tähelepanu asjaolule, et vee molekulidest koosnevate väikeste klastrite struktuur peaks olema korrapärane (Siksna, 1973). Soome juhtiv atmosfäärielektri uurija Tapio Tuomi (2006) väitis, et selliseid osakesi ei tohiks nimetada tilkadeks, vaid pigem jääkristallideks. Tavatingimustes atmosfääris esinevad klasterioonid ei sisalda üle paarikümne veemolekuli. Termin „molekulaarklaster“ kasutamisel eeldatakse tavaliselt, et osakese sisemiste energianivoode vahed on keskeltläbi suuremad kui ümbritseva gaasi molekulide soojusliikumise energia. Sel juhul on pörked gaasi molekulidega veel elastsed. Mitmenanomeetrilise läbimõõduga aerosooliosakesed aga vahetavad ümbritseva gaasiga energiat. See muudab pörgete iseloomu ja siit tulenevalt ka elektrilise liikuvuse ning läbimõõdu seost. Üleminekuläbimõõt pörkumise valdavalt elastselt iseloomult mitteelastsele ca 1,6 nm (Tammet, 1995) langeb hästi kokku miinimumkoha ja korrelatsioonirajaga atmosfääriioonide mõõtmejaotuses (Hörrak jt, 2000). Sadadest molekulidest koosnevaid komplekse peaks kirjeldatud vaatekohast lähtudes

nimetama mitte molekulaarklastriteks vaid aerosooliosakesteks. 1,6-st nanomeetrist suuremaid kristallitaoliselt korrastatud veemolekulide komplekse võiks nimetada hüperklastriteks. Hüperklastrite uurimist massispektromeetrite abil raskendab vajadus viia uuritavad osakesed atmosfäärirõhuga gaasist läbi peene düüsi vaakumi. Düüsi läbinud gaasijuga paisub ja jahtub äkiliselt, mille juures võib tekkida uusi klastreid ning algsed klastrid võivad nii laguneda kui ka kasvada. Vaakumisse paisuvas gaasijoas toimuvad protsessid ei ole piisavalt hästi tuntud ja hüperklastrite uurimise tööriistaks on tänapäeval peamiselt arvutusmudelid. Suurte klastrite täpseks kvantmehhaaniliseks modelleerimiseks on tänapäeva teadus paraku võimetu. Hüperklastrite uurimine mudelite abil tugineb aga oluliselt konkreetsetesse mudelitesse peidetud lähendustesse, mistõttu saadud tulemustesse suhtutakse ettevaatusega.

Tuomi (2006) juhtis tähelepanu inglise teadlase Martin Chaplini tagasihoidlikult tuntud (vaid 40 tsiteeringut ISI andmebaasides) teedrajavale artiklile (Chaplin, 1999). Chaplin kasutas modelleerimiseks arvutuspaketti Hyperchem 5.11 ja näitas, kuidas tavalisi 14-st vee molekulist koosnevaid tetraeedrilisi klastreid saab pakkida 280-st molekulist koosnevaks ikosaeedriliseks hüperklastriks, millel on 20 kolmnurkset tahku. Mudelarvutus ennustab selliste kristallitaoliste hüperklastrite tähelepanuväärset stabiilsust. 280-st vee molekulist koosneva osakese läbimõõt 2,5 nm võrdub üsna täpselt balloelektriliste ionide liikuvuse järgi arvatud läbimõõduga. Chaplinil ei olnud andmeid, mis võimaldanuks väita selliste hüperklastrite esinemist isoleeritud kujul. Küll aga analüüsis ta röntgenikiirte ja neutronite difraktsiooni mõõtmistulemusi vee jaoks ja näitas, et need on päris heas kooskõlas hüpoteesiga 280-hüperklastrite esinemisest vedelas vees temperatuuril 4°C. Vene teadlased Dubov ja Vostrikov (2008) kasutasid analoogilise ülesande lahendamiseks teist modelleerimispaketti GROMACS ja nad ei viita üldse Chaplini töödele. Nende arvutuste kohaselt peaksid eriliselt stabiilsed olema 250 vee molekulist koosnev hüperklaster ja neljast 250-hüperklastrist moodustatud 1000-st molekulist koosnev liithüperklaster, mille läbimõõt oleks *ca* 4 nm.

Molekuli eraldamine stabiilsest kristallisarnasest hüperklastrist nõuab rohkem energiat kui molekuli eraldamine vedelast veest. Selle tõttu võib aurumiskiirus olla palju suurusjärke väiksem kui klassikalise veetilga puhul, mis võiks seletada vee molekulidest koosnevate balloelektriliste ionide pikka eluiga. Viimase hüpoteesi jaoks ei ole meil aga veenvat tõestust ja ainus tõsiselt võetav vihje on balloelektriliste ionide läbimõõdu ja modelleeritud hüperklastrite läbimõõdu hea kokkulangevus.

## KOKKUVÕTE

- Vee pritsimise abil tekitatud keskmise liikuvusega negatiivsete ioonide järkjärguline neutraliseerimine beetakiirguse abil tekitatud klasterioonidega vähendab keskmise liikuvusega ioonide laengu-kontsentratsiooni, kuid ei muuda oluliselt nende elektrilist liikuvust. Siit järeldub, et balloelektrilised ioonid on enamasti üht elementaarlaengut kandvad nanomeeterosakesed.
- Balloelektriliste ioonide domineerivale liikuvusele  $0,22 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  vastab osakese läbimõõt 2,5 nm.
- Vihmavee ja viimasest *ca* 50 korda rohkem lahustunud aineid sisaldava kraanivee pihustamisel tekkinud balloelektriliste ioonide mõõtmejaotus on ühesugune. See kummutab hüpoteesi, mille kohaselt balloelektrilised ioonid on tilkade aurumisest jäänud tahked jäägid, sest kraanivee tilkade jääkosakeste läbimõõt on vihmavee tilkade jääkosakeste läbimõödust *ca* kolm korda suurem.
- Veetilkade klassikalise aurumistooria kohaselt peaks 2,5 nm läbimõöduga tilgad täielikult auruma vähem kui mikrosekundi jooksul. Katse aga näitab balloelektriliste ioonide kõrget kontsentratsiooni liikuvusspektromeetris, milleni jõudmiseks kulub tilkadel mitu sekundit. Üks hüpotees aeglase aurumise seletamiseks väidab, et uuritud osakesed ei ole seesmiselt korrastamata veetilgad, vaid kindla kristallisarnase struktuuriga hüperklastrid. Vee 2,5 nm läbimõöduga hüperklastrite võimalikkust on ennustanud Chaplini (1999) mudelarvutused.

Üksikasjalikumat teavet balloelektrilise efekti uurimisest võib leida artiklist (Tamm et al., 2009).

## TÄNUAVALDUSED

Uurimistööd finantseerisid Eesti Teadusfondi grant nr 6223, Põhja-maade Tippkeskuse projekt BACCI ja sihtfinantseeritav teadusteema SF0180043s08. Autorid avaldavad erilist tänu Helsingi Ülikooli professorile ja Tartu Ülikooli audoktorile Markku Kulmalale toetuse ja kaastöö eest.

## KIRJANDUS

- Chaplin, M.F. (1999) A proposal for the structuring of water, *Biophys. Chem.*, 83, 211–221.
- Chapman, Seville (1937) Carrier mobility spectra of spray electrified liquids, *Phys Rev.*, 52, 184–190.
- Christiansen, C. (1913) Elektrizitätserregung beim Zerspritzen von Flüssigkeiten (Balloelektrizität), *Ann. Phys.*, 345, 107–137 & 233–248.
- Dubov, D.Yu., Vostrikov, A.A. (2008) Ordering of molecular dipole moments in a nanosized water cluster, *JETP Letters*, 88, 674–678.
- Hirsikko, A., Bergman, T., Laakso, L., Dal Maso, M., Riipinen, I., Hörrak, U., Kulmala, M. (2007) Identification and classification of the formation of intermediate ions measured in boreal forest, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 201–210.
- Hörrak, U., Salm, J., Tammet, H. (1998). Bursts of intermediate ions in atmospheric air, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 103(D12), 13909–13915.
- Hörrak, U., Salm, J., Tammet, H. (2000) Statistical characterization of air ion mobility spectra at Tahkuse Observatory: Classification of air ions, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 105, 9291–9302.
- Hörrak, U., Tammet, H., Aalto, P.P., Vana, M., Hirsikko, A., Laakso, L., Kulmala, M. (2006) Formation of charged nanometer aerosol particles associated with rainfall: atmospheric measurements and lab experiment, *Report Series in Aerosol Science*, 80, 180–185.
- Kulmala, M., Laakso, L., Lehtinen, K.E.J., Riipinen, I., Dal Maso, M., Anttila, T., Kerminen, V.-M., Hörrak, U., Vana, M., Tammet, H. (2004) Initial steps of aerosol growth, *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 2553–2560.
- Kulmala, M., Riipinen, I., Sipilä, M., Manninen H.E., Petäjä, T., Junninen, H., Dal Maso, M., 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, 89–92.
- Laakso, L., Hirsikko, A., Grönholm T., Kulmala M., Luts A., Parts T.-E. (2007) Waterfalls as sources of small charged aerosol particles, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2271–2275.
- Lenard, P. (1892) Ueber die Electricität der Wasserfälle, *Ann. Phys.*, 282, 584–636.

- Mirme, A., Tamm, E., Mordas, G., Vana, M., Uin, J., Mirme, S., Bernotas, T., Laakso, L., Hirsikko, A., Kulmala, M. (2007) A wide range multi-channel Air Ion Spectrometer, *Boreal Environ. Res.*, 12, 247–264.
- Mirme, S., Mirme, A., Minikin, A., Petzold, A., Hörrak, U., Kerminen, V.-M., Kulmala, M. (2009) Atmospheric sub-3 nm particles at high altitudes. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 9, 19435–19470.
- Salm, J.J., Tamm, E.I. (1963) On the rotor-hydro-ionizers (in Russian), *Acta Comm. Univ. Tartu*, 140, 62–70.
- Siksna, R. (1973) Water clathrates as aerosol particles in the atmosphere, Uppsala University Research Institute of Electricity, UURIE 48-73 and UURIE 53-73, 11 + 30 pp.
- Tammet, H. (1995) Size and mobility of nanometer particles, clusters and ions, *J. Aerosol Sci.*, 26, 459–475.
- Tammet, H. (2006) Continuous scanning of the mobility and size distribution of charged clusters and nanometer particles in atmospheric air and the Balanced Scanning Mobility Analyzer BSMA, *Atmos. Res.*, 82, 523–535.
- Tammet, H., Hörrak, U., Kulmala, M. (2009) Negatively charged nanoparticles produced by splashing of water, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 357–367.
- Tammet, H., Salm, J., Iher, H. (1988) Observation of condensation on small air ions in the atmosphere, *Lecture Notes in Physics*, 309, 239–240.
- Thoroddsen, S.T., Etoh, T.G., Takehara, K (2008) High-speed imaging of drops and bubbles, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 40, 257–285.
- Tuomi, T. (2006) Cluster ions and ice. 7th Finnish-Estonian Air Ion and Aerosol Workshop, Pühajärve, Estonia, August 22.
- Villiermaux, E. (2007) Fragmentation, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 39, 419–446.
- Wehner, A.P. (1987) History of air ion research, in: *Air ions: physical and biological aspects*, eds. Charry, J.M., Kavet, R.I., CRC Press, Boca Raton, FL, 181–197.
- Winkler, P.M., Steiner, G., Vrtala, A., Vehkamäki, H., Noppel, M., Lehtinen, K.E.J., Reischl, G.P., Wagner, P.E., Kulmala, M. (2008) Heterogeneous nucleation experiments bridging the scale from molecular ion clusters to nanoparticles, *Science*, 319, 1374–1377.



# ITER<sup>1</sup> – TEE ENERGIA- PROBLEEMIDETA MAAILMA?

---

**MATTI LAAN**

TÜ Füüsika Instituut

*It has been widely conjectured that some form of controlled thermonuclear reactor, capable of producing a useful amount of power, will some day be constructed.*

J. D. Lawson, 1956

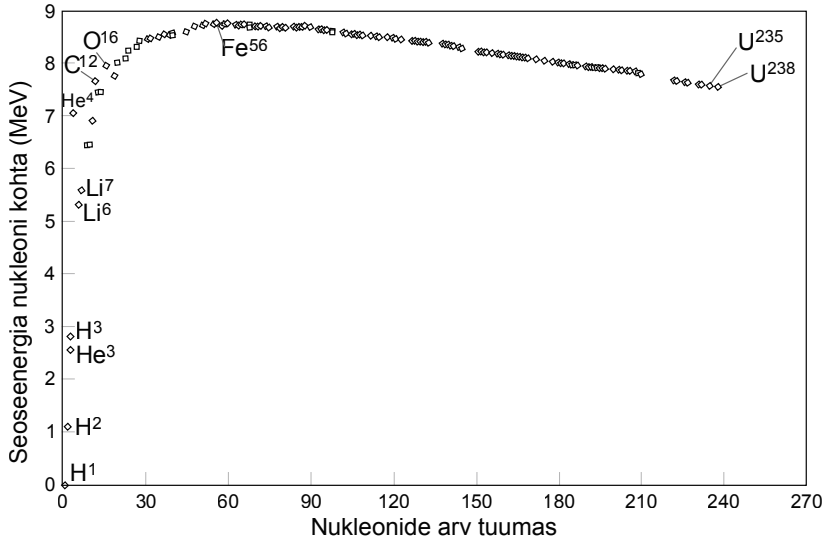
Praegu toodavad Ameerika Ühendriigid elektrienergiat elaniku kohta *ca* kümme korda rohkem kui Hiina ja on vaevalt usutav, et arengumaade elanikud ei soovi jõuda ameeriklastega ligilähedasele tasemele. Seega – inimkonna energianälg süveneb kiirenevalt. Praegu saadakse ligi 90% elektrienergiast kasvuhoonegaase, happevihmu jms tekitava tehnoloogia abil, mis näib viivat ökoloogilise katastroofini. Põhimõtteliselt on fossiilsete kütuste põletamisel tekkivate saateühendite emissiooni võimalik oluliselt vähendada, kuid see põhjustab olulise omahinna suurenemise. Ka kõige optimistlikumatest hinnangutest tuleneb, et taastuvenergia ei ole võimeline katma 21. sajandi energiavajadusi [1]. Tundub, et avalikkus hakkab üle saama Tšernobõli sündroomist ning arusaam, et tuumaenergia kombineerimisel taastuvenergiaga ei ole alternatiivi, on jõudmas ka padurohelisteni.

## TUUMAENERGEETIKA

Energiatootmine tuumareaktsioonidest baseerub tuumade seoseenergia erinevustel.

---

1 Iter – „tee“ ladina k



Joonis 1. Keskmine seoseenergia nukleoni kohta sõltuvalt nukleonide arvust tuumas. Allikas: Wikimedia Commons [2].

Jooniselt 1 on näha, et energia võib vabaneda nii raskemate tuumade transformeerumisel keskmise suurusega tuumadeks (tuumalagunemine, ingl k *fission*) kui ka kergete tuumade liitumisel (ingl k *fusion*). Mõlema protsessi puhul on vabaneva energia suurusjärg 1 MeV nukleoni kohta, mis on  $10^6$ – $10^7$  korda suurem kui keemilistel reaktsioonidel vabanev energia. Kõiki tuumareaktsioone kontrollitakse tugeva vastasmõju poolt, mille mõjuraadius on  $10^{-15}$  m suurusjärgus. Sellest suurematel kaugustel aga domineerib positiivsete tuumade vahel kuloniline tõukejõud, millest tingitud potentsiaalibarjääri kõrgus ületab  $10^5$  eV. Potentsiaalibarjääri olemasolu selgitab, miks tuumade liitumisega võrreldes on tuumalagunemine hulga kergemini saavutatav: neutroni haaramine tuuma poolt ei ole takistatud kulonilise jõu poolt. Tuumade liitumiseks tuleb aga ületada või läbida potentsiaalibarjäär, seega peab reaktsioonipartnerite kineetiline energia ( $\propto$  temperatuuriga  $T$ ) olema suur. Siit pärineb ka tuumade liitumisreaktsiooni paralleelnimetus – termotuumareaktsioon.

Tuumalagunemisel baseerual energeetikal on seljataga poolesajandiline areng, esirinnas oleval Prantsusmaal saadakse 40% elektrienergiast tuumajaamadest. Ehitatavate III põlvkonna (sh ka Soomes valmiv

Olkiluoto 3 reaktor) [3] ja planeeritavate IV põlvkonna reaktorite [4] puhul on kasutusel passiivsed ohutussüsteemid, mis peaks välistama Tšernobõli-laadsed inimfaktorist põhjustatud sündmused. Paraku on tuumalagunemisel baseeruva energeetika lahendamata probleemiks suure poolestusajaga radioaktiivsete jääkproduktide salvestamine ja traditsioonilise tehnoloogia kasutamisel piisab toorainet 30 aastaks.

Tähtedes tuumasünteesile viivad reaktsioonid, milles osalevad peale prootonite, heeliumi isotoopide ja deuteeriumi ka positronid ja neutriinod, on aeglased ja süntees realiseerub vaid tänu tähtede tohututele mõõtmetele. Maapealsetes tingimustes sünteesiks võimalikest reaktsioonidest omab vähimail temperatuuril suurimat ristlõiget ( $\approx 10^{-28} \text{ m}^2$ ) deuteeriumi ja triitiumi tuumade (D-T) liitumisreaktsioon, mille tulemusena tekib  $\alpha$ -osake ja neutron:



Tekkiva  $\alpha$ -osakese energia on 3,54 MeV ja ülejäänud omandab neutron. D-T reaktsiooni ühte lähtekomponenti – deuteeriumit – sisaldab piisavalt vesi ja teda jätkub kauemaks Päikese elueast. Teine lähtekomponent – triitium – on aga vesiniku radioaktiivne isotoop, mille poolestusaeg on 12,3 aastat ning looduslikul kujul on teda vähe. Triitiumit saab toota D-T reaktsioonis tekkiva neutroni põrkel liitumiga



See reaktsioon on eksotermiline, kus eraldub 4,8 MeV energiat. Liitumit leidub merevees ja teda jätkub suurusjärguliselt kümneks miljoniks aastaks, nii et toormepõuda pole niipea oodata. Võrreldes tuumalagunemisega on tuumasüntees puhas: radioaktiivne saast kaob sajakonna aastaga.

Käivitamiseks liitumisreaktsiooni, on vaja esmalt tekitada deuteeriumi ja triitiumi tuumadest ja elektronidest koosnev plasma ja kütta see temperatuurini  $10^8 \text{ K}$  (10 keV). Energia tootmise seisukohast ei piisa vaid kõrge temperatuurist, vaid tuleb saavutada plasmas ka energeetiline tasakaal tekke- ja kaomehhanismide vahel. Laias laastus on kaks peamist kaomehhanismi: laengukandjate transpordikaod (difusioon, konvektsioon jms) ning pärsskiirgus. Transpordikadusid iseloomustatakse ajateguriga  $\tau$  (plasma sulustusaeg) ning pärsskiirgus on võrdeline korutisega  $n^2 T^{1/2}$ , kus  $n$  on laengukandjate kontsentratsioon. Rohkem kui

viiskümmend aastat tagasi tuletas J. D. Lawson temanimelise kriteeriumi, mis sätestab termotuumareaktsiooni süttimistingimuse [5]:

$$n\tau T \sim 10^{22} \text{ keV s m}^{-3}.$$

Hoidmaks kuuma plasmat piiratud ruumpiirkonnas ja saavutamaks Lawsoni kriteeriumi on kaks põhimõtteliselt erinevat lähenemisviisi – inertsiaalne ja magnetiline sulustamine. Inertsiaalse sulustamise puhul surutakse D-T plasmatompi kokku laserikiirguse või ioonide voo poolt ja saavutatakse tihedus, mis on võrreldav tihedusega Päikese tsentris. Sel meetodil on saavutatud plasma temperatuuriks  $10^9$  K [6]. Informatsiooni inertsiaalse sulustamise erinevatest viisidest võib leida ettekandest [7].

Plasma allub magnetvälja toimele (on diamagnetik) vaid juhul, kui tsüklotronsagedus ( $\omega = eB/m$ ) on oluliselt suurem kui osakeste pörkesagedus. Seetõttu peab kasutamist leidvate magnetväljade puhul ( $B \sim 10$  T) plasma tihedus olema suurusjärgus  $10^{20} \text{ m}^{-3}$ , mis on  $10^5$  korda väiksem kui gaasi tihedus normaalingimustel.

20. sajandi viiekümnendate aastate algul pakuti praktiliselt üheaegselt välja rõngakujulise plasmavooliku kaks magnetilise sulustamise varianti: stellaraator [8] ja tokamak. Stellaraatoris saavutatakse sulustamine väga komplitseeritud konfiguratsiooniga välise magnetväljade poolt, kuid kuna seadmes plasmavool puudub, siis on väike ka tõenäosus erinevate ebastabiilsuste tekkeks ning töö pidevas režiimis peaks olema kergemini saavutatav. Tokamak töötab trafona, mille ühekeeruliseks sekundaarmähiseks on plasmavoolik, milles elektromagnetilise induktsiooni poolt tekitatud vool täidab kahte ülesannet. Esiteks tekib plasmavooliku ümber magnetväli, mis soodustab plasma sulustamist. Seetõttu on tokamaki magnetahelad suhteliselt lihtsad. Teiseks eraldub voolu toimel plasmale Joule'i soojus, mis kuumutab plasmat. Paraku töötab trafo vaid impulssrežiimis.

Praegu eksisteerib ja ka luuakse mitmeid võimsaid seadmeid, kus kasutatakse plasma kuumutamiseks ja sulustamiseks kõiki ülalkirjeldatud viise, kuid kõige lähemale Lawsoni kriteeriumile on jõutud tokamakides.

## TOKAMAKI AJALOOST

Tokamaki eelajalugu tundub ulmeline: idee juhitava termotuumasünteesi alasteks uuringuteks pakkus välja oma 1950. a kirjas Stalinile Sah-

halini saarel aega teeniv nooremseersant Oleg Lavrentjev [9]. Hämmas-tava kiirusega läbis kiri kõik Nõukogude Liidu julgeolekuinstantsid ja veel samal aastal skitseeris Andrei Sahharov koostöös oma õpetaja Igor Tammega idee plasma sulustamisest toroidi magnetväljas [10]: kui välis-tada triiv, siis Lorentzi jõu tõttu lukustub laetud osake mingi toroidaalse välja kontsentrilise jõujoone külge ja ta liigub piki spiraalset trajektoori.

Idee realiseerus aastatel 1954–1955, mil valmis esimene toroidaal-ne kamber [11]. Sellest ajast pärineb ka nimi tokamak (**тороидальная камера с магнитными катушками**).

Kuni 1958. aasta Genfi konverentsini „Atoms for Peace“, olid tuuma-sünteesi alal tehtavad uuringud kõigis maades ülimalt salastatud. 1968. aastal teatasid Nõukogude Liidu teadlased, et tokamakis on elektronid köetud energiani 1 keV. Sellest teatest põhjustatud šokk termotuuma ko-gukonnas on võrreldav vaid mõjuga, mille põhjustasid Lääne-maailmas sputnik ja Gagarin. Algas tokamaki-buum.

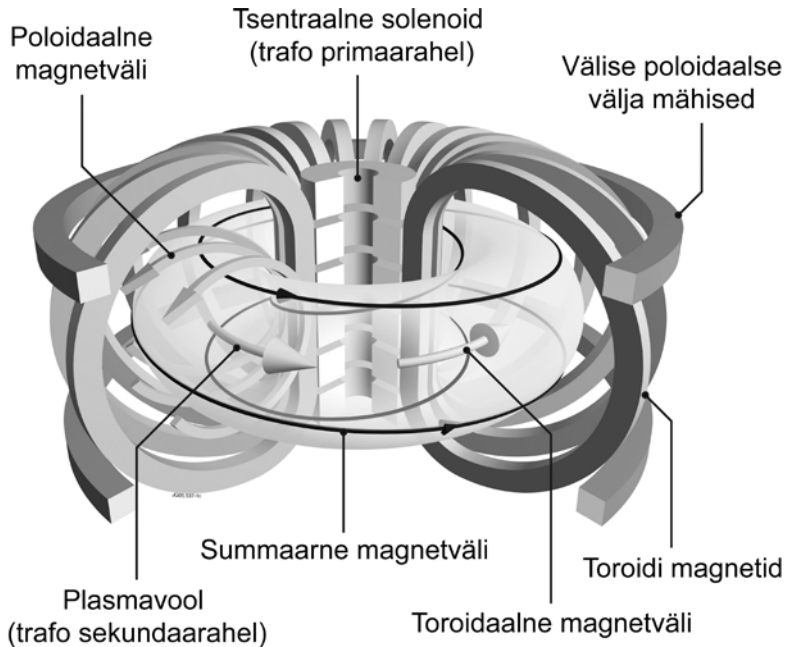
Momendil töösoleva paarikümne tokamaki tööülesanded on erinevad ning erinevates seadmetes on saavutatud plasma üksikute parameetri-te rekordtulemused [12]. Võimsaimas D-T segu kasutavas reaktoris JET (*Joint European Torus*), mis paikneb Oxfordi-lähedases Culhamis, on saavutatud Lawsoni „kolmikorrutise“  $n\tau T$  väärtus, mis on lähedane termotuumareaktsiooni süttimistingimusele. JETile kuulub ka toodetud tuumavõimsuse (17 MW) rekord, kuid sulustusaeg on vaid ühe sekundi suurusjärgus. Prantslaste Tore Supra on saavutanud plasma kolmemi-nutilise sulustusaja, kuid suurusjärg madalamal kolmikorrutise väärtusel. Energeetilisest seisukohast iseloomustakse seadmete efektiivsust faktoriga  $Q$ , mis võrdub väljundvõimsuse ja sisendvõimsuse suhtega. Kõigis praegustes seadmetes on  $Q < 1$ .

Nelikümmend aastat peale tokamaki ajastu algust, 2008. a lõpul, all- kirjastasid seitse osalist (Ameerika Ühendriigid, Euroopa Liit, Hiina, India, Jaapan, Korea ja Venemaa) lepingu, mille järgi algas suurima toka-maki ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) ehitus Prantsusmaa lõunaosas paiknevas Cadarache'is [13]. ITERiga loodetak-se saavutada efektiivsus  $Q = 10$  ja toota 500 MW tuumavõimsust. Pla-neeritud sulustusaeg on  $10^3$  sekundit ning praeguste plaanide kohaselt tekitatakse D-T plasma 2026. aastal. Juba praegu on esitatud järgmise põlvkonna reaktori DEMO detailuuringute tulemused [14]. DEMO ees-märkide hulka kuulub ka elektrienergia tootmine. 50 aasta pärast peaks valmima elektriijaama prototüüp.

## TOKAMAKI TÖÖPÕHIMÕTTEST JA ELEKTRIENERGIA SAAMISEST

Plasma tekitatakse ovaalilähedase ristlõikega rõngaskambris. JETi puhul on rõnga minimaalne raadius 1,25–2,1 m ja maksimaalne – 2,9 m ning plasma ruumala on 100 m<sup>3</sup> (ITERis – 830 m<sup>3</sup>). Pikaajaliste uuringute tulemusena on leitud, et plasmaga vahetult kokkupuutuvate kambriseinte materjalina on perspektiivne kasutada volframi, berülliumit ja grafiiti. Toridaalne magnetväli tekitatakse kambrist ümbritsevate magnetitega (joonis 2). Tore Supra puhul on ülijuhtivate magnetite tekitatud alalisväli 4,5 T (ITERis – 11 T).

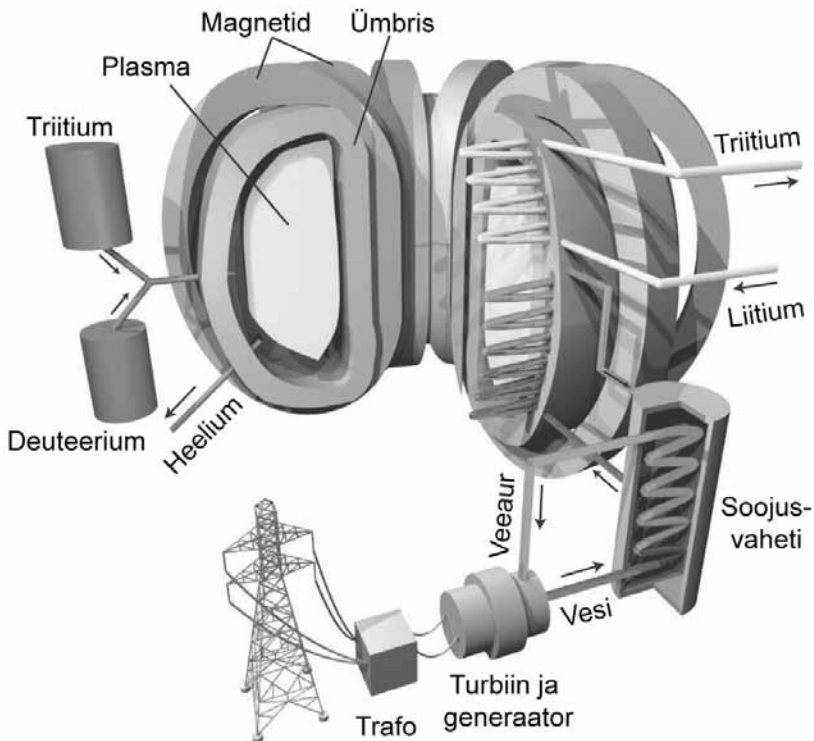
Toroidi magnetväli on mittehomoogeenne, muutudes tema sees pöörd- võrdeliselt kaugusega toroidi tsentrist. Magnetvälja gradient põhjustab laengukandjate triivi sihis, mis on risti nii magnetvälja kui ka tema gradiendiga ning erimärgiliste laengukandjate liikumine eri suundades tekitab



Joonis 2. Tokamaki magnetosa; laengukandjate spiraalne trajektoor on lukustatud summaarse magnetvälja jõujoone külge. Allikas: EFDA.

vertikaalsihilise elektrivälja. Elektri- ja magnetvälja koosmõjul triivivad nii ioonid kui ka elektronid  $\vec{E} \times \vec{B}$  suunas, st nõrgema magnetvälja piirkonda. Plasma käitumine on sama kui mistahes diamagneetikul: mittehomogeenses magnetväljas tõugatakse diamagneetik nõrgema välja piirkonda. See- ga: kasutades vaid lihtsaimat toroidaalset magnetvälja, ei ole võimalik plas- mat sulustada. Vähendamaks triivist tingitud kadusid, tekitatakse seadme sümmeetriatelje suhtes konsentriliste mähiste abil nn poloidaalne ([15] terminoloogia) magnetväli, mille jõujooned ümbritsevad plasmarõngast. Summaarse magnetvälja jõujooned, mille ümber tiirlevad laengukandjad, kulgevad plasmavooliku sees spiraalselt ja sobiva väljakomponentide suhte puhul on võimalik enamik laengukandjaid sulustada.

Tsentraalse solenoidi vooluimpulsi magnetvälja toimele tekib reaktori kambris plasma. Plasmavoolul (JETi rekord – 4,5 MA) on täita kaks olu- list rolli. Esiteks on vool täiendavaks poloidaalse magnetvälja allikaks,



Joonis 3. Tee reaktorist elektrienergia tarbijani. Allikas: EFDA.

mis ei lase plasmavoolikul laieneda (pintš-efekt). Teiseks eraldub voolu toimel plasmas Joule'i soojusenergia („oomiline“ kuumutamine), mis kompenseerib osaliselt energiakaod.

Paraku ei piisa tuumade liitumisel tekkivate  $\alpha$ -osakeste energiast (neutroneid ei sulustata) ja oomilisest kuumutamisest selleks, et saavutada Lawsoni süttimiskriteerium. Seega on vaja plasma pidevaks kuumutamiseks lisaallikaid, millena kasutatakse nii neutraalsete osakeste injektsiooni kui ka elektromagnetlaineid. Kõrgenergeetilise (60–140 keV) neutraalsete osakeste voo saamiseks kiirendatakse esmalt ioniseeritud deuteeriumi voog elektriväljas, seejärel läbib voog neutralisaatori ja suundub reaktoris, kus laenguvahetusreaktsiooni tulemusena aatomid ioniseeritakse uuesti ning need ioonid kuumendavad plasmat. Elektromagnetlainetega kuumutamisel kasutatakse sagedusi, mis ühtivad ioonide ja elektronide tsüklotronsagedustega (vastavalt ~10 MHz ja ~100 GHz) või nende kordsetega. Kiirguse resonantsneeldumisel konverteeritakse lainete energia laengukandjate kineetiliseks energiaks.

Joonis 3 edastab põhimõttelise tee tuumareaktorist elektrienergia tarbijani. Reaktoris genereeritud kõrgenergeetilised neutronid püütakse ümbrise (ingl k *blanket*) poolt. Ümbrises, mille põhikomponendiks on liitium, konverteeritakse neutroni energia soojuseks ja toodetakse tritiumi, mis suunatakse tagasi reaktoris (reaktsioon (2)). Lisaks sellele kaitseb ümbris magnet- ja vaakumsüsteemi ning personali neutronikiirguse eest. Soojusvahetis annab vedel metall oma energia veele. Edasine elektrienergia tootmise ahel ei erine sellest, mida rakendatakse traditsioonilistes elektrijaamades: veeaur paneb pöörlema turbiini ja generaator saadab elektrienergia ülekandeliinidesse.

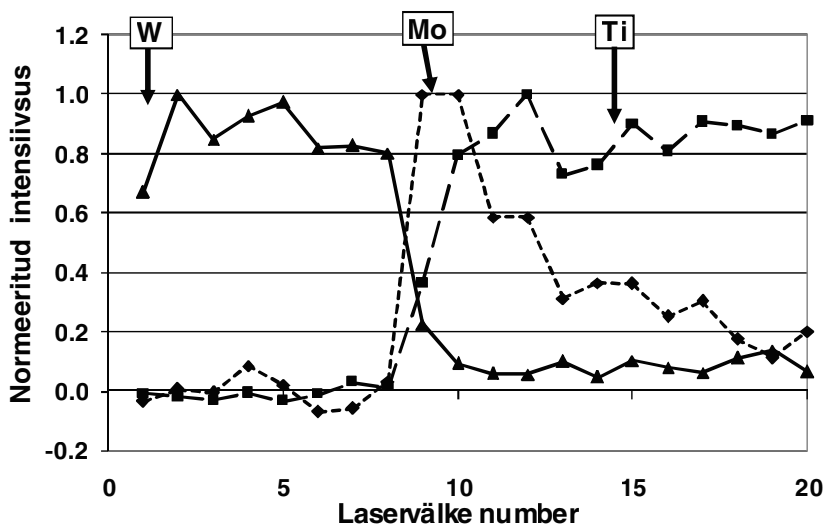
## ITER JA EESTI

Eesti liitus ITERiga seonduvate projektidega 2007. aasta algul ja kuulub koos soomlastega assotsiatsiooni Euratom-Tekes koosseisu. Eesti-poolsete uurimisrühmade koordinaatoriks on Madis Kiisk. Momendil osaleb projektides kolm TÜ Füüsika Instituudi uurimisrühma. Aleksandr Luštšiku rühm uurib dielektrikmaterjalide kiirituskindlust, Madis Kiisk koostöös Soome ja Rumeenia teaduritega määrab tritiumi sügavusprofiile tokamakki seintel ning gaaslahenduslabori tegevus on seotud laserindutseeritud plasma spektroskoopia (LIBS) meetodi arendamisega



tokamaki seinte *in situ* diagnostikaks. Alljärgnev kirjeldus hõlmab vaid gaaslahenduslabori tegevust, kus LIBSi valdkonnas on võtmeisikuteks Märt Aints, Peeter Paris ja kirjutise autor.

Täielikult vältida plasma kokkupuudet reaktori seintega ei saa ning seinu mõjutab ka intensiivne neutronite voog. Seni otsustatakse plasma ja reaktori seinte vastasmõju tulemusena seintel toimuvate aine sadetumis- ja erosiooniprotsesside üle vaid *post-mortem* analüüsi põhjal. Selleks paigutatakse reaktori eri osadesse testpaneelid, mis on kaetud markerkihtidega. Pärast mingit mõõtetsükli, mille kestus võib olla paar aastat ja mille jooksul on pindasid mõjutanud paar tuhat erinevates režiimides genereeritud plasmaimpulssi, määratakse pinna karakteriseerimismeetoditega keemiliste elementide sügavusprofiilid seintes. On selge, et sel viisil on võimatu välja selgitada režiimi, mis oleks parim reaktori seinte eluea suhtes. Seega oleks vaja pinna kontaktivaba testimise meetodit, mis lubaks leida reaktori fikseeritud režiimile vastava erinevate keemiliste elementide sügavusprofiili. Selliseks *in situ* meetodiks on LIBS, kus laservälke toimel aurustub osa pinna materjalist ning registreerides tekkinud plasma spektri funktsioonina välke numbrist on võimalik määrata nii pinna koosseisu kui ka seal olevate kihtide paksust.



Joonis 4. W (10  $\mu\text{m}$ ) – Mo (2  $\mu\text{m}$ ) katted titaanalusel; normeeritud intensiivsused funktsioonina laservälke numbrist.

Põhimõtteliselt lihtsa 40-aastase ajalooga testmeetodi rakendamine tokamakis on komplitseeritud, kuna registreerimisdistantsid on suured ja pole võimalik keskmistada spektreid üle laservälgete arvu. Lisaks selgus, et registreerides ühele laservälkele vastava spektri ilma ajalise lahutuseta, domineerib seal spektri pidev komponent [16]. Registreerides spektreid vaid laservälke suhtes viidatud ajalises aknas, oli võimalik leida pinnadiagnostikaks sobiv spektrijoonte komplekt. Praegusel uurimistöo etapil on põhiprobleemideks testpaneelide jaoks sobivate markerkihtide materjalide leidmine ning tokamakis sobiva katse- ja andmetöötlusmetoodika väljatöötamine. Nende ülesannete lahendamiseks on Euroopas moodustunud konsortsium, mis koosneb Eesti, Itaalia, Poola ja Prantsusmaa LIBSi rühmadest ning Rumeenia ja Soome testobjektide valmistajatest. Meie hiljutistest uurimustest selgus, et üksikutel laservälgetel registreeritud spektritest on võimalik usaldusväärselt määrata keemilise elemendi sügavusprofiil vaid juhul, kui karakteriseerida seda elementi mitme spektrijoone kiirgusega [17]. Joonisel 4 esitatud sõltuvused on kooskõlas otsestest meetoditel saadutega.

Meie teekond ITERi poole kulgeb Hollandi FOM Plasma Instituudi kaudu, kus on valmimas plasma ja pinna vastasmõju uurimisseade, milles plasmavoo intensiivsus on võrreldav voogudega ITERis ja kus me kahe aasta pärast testime oma LIBS meetodit.

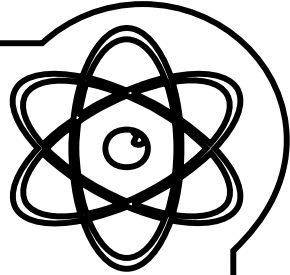
## KOKKUVÕTTEKS

Artikli motoks oleva tsitaadi kirjutamisest on möödunud üle poole sajandi ja ka praegu on kohane korrata seda mõõdukat optimismi väljendavat lauset: ükskord tuleb ta niikuinii! Võib olla üsna kindel, et 2030. aastaks on jõutud ITERis tuumasünteesi süttimistingimusteni ja ka teised ITERi eesmärgid on realiseeritavad. Samas on aga probleeme, mis tuleb lahendada jõudmaks pidevas režiimis töötava reaktorini, palju. Kuni pole leitud vastust küsimustele, mis seonduvad neutronite ja plasma mõjuga reaktorit ümbritsevale, jääb reaktor energiatootmise seisukohast vaid võimaluseks. Teisalt on aga projekt, millesse osalejamaade vahendusel on tänaseks kaasatud pool planeedi elanikkonnast, kiirendanud materjaliteaduse arengut ja andnud hulgaliselt uusi lahendusi tehnoloogia mitmetes valdkondades. Aga võib-olla on tähtsaim see, et Päikese Maale toomise üritus on eetilisem kui pommivalmistamine?

## KIRJANDUS

- [1] H. Nifenecker, S. David, J. M. Loiseaux and A. Giorni (1999). Hybrid nuclear reactors. *Progress in Particle and Nuclear Physics* 43, 683–827
- [2] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Binding\\_energy\\_curve\\_-\\_common\\_isotopes.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Binding_energy_curve_-_common_isotopes.svg)
- [3] L. Heikinheimo (2009). Research needed to improve performance of nuclear power plants. *Konverents: EU Research and Training in Reactor Systems*, FISA Prague
- [4] A. v. Heek (2009). Innovative reactor concepts (Generation IV Reactor). *Konverents: EU Research and Training in Reactor Systems*, FISA Prague
- [5] J. D. Lawson (1957). Some Criteria for a Power Producing Thermo-nuclear Reactor. *Proceedings of the Physical Society B70*, 6–10
- [6] N. M. Albuquerque (2006). Sandia's Z machine exceeds two billion degrees Kelvin. <http://www.sandia.gov/news-center/news-releases/2006/physics-astron/hottest-z-output.html>
- [7] J. Lindl and B. Hammel (2004). Recent Advances in Indirect Drive ICF Target Physics. 20th IAEA Fusion Energy Conference, [http://fire.pppl.gov/iaea04\\_lindl.pdf](http://fire.pppl.gov/iaea04_lindl.pdf)
- [8] <http://en.wikipedia.org/wiki/Stellarator>
- [9] B. D. Bondarenko (2001). Role played by O A Lavrent'ev in the formulation of the problem and the initiation of research into controlled nuclear fusion in the USSR. *Phys. Usp.* 44, 844
- [10] Andrei Sakharov, soviet physics, nuclear weapons, and human rights. AIP Center for History of Physics, <http://www.aip.org/history/sakharov/>
- [11] V. S. Strelkov (2001). History of the T-10 Tokamak: Creation and Development. *Plasma Physics Reports* 27, 819–824
- [12] A short history of magnetic fusion, [http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/fusion/histoire/site\\_historique.htm](http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/fusion/histoire/site_historique.htm)
- [13] [http://www.efda.org/news\\_and\\_events/efda\\_newsletters.htm](http://www.efda.org/news_and_events/efda_newsletters.htm)
- [14] EFDA(05)-27/4.10 A Conceptual Study of Commercial Fusion Power Plants. Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS), [http://www.efda.org/eu\\_fusion\\_programme/downloads/scientific\\_and\\_technical\\_publications/PPCS\\_overall\\_report\\_final-with\\_annexes.pdf](http://www.efda.org/eu_fusion_programme/downloads/scientific_and_technical_publications/PPCS_overall_report_final-with_annexes.pdf)
- [15] [http://en.wikipedia.org/wiki/Toroidal\\_and\\_poloidal](http://en.wikipedia.org/wiki/Toroidal_and_poloidal)

- [16] P. Paris, M. Aints, M. Laan, M. Kiisk, J. Likonen, J. Kolehmainen, S. Tervakangas (2009). Laser ablation of thin tungsten layers deposited on carbon substrate. *Fus. Eng. Des.* 84, 1465–1467
- [17] P. Paris, M. Aints, M. Laan (2009). Testing of multilayer coatings by UV laser. 5th Euro Mediterranean Symposium on Laser induced spectroscopy, Abstracts 47, suuline ettekanne. Töö laiendatud variant on saadetud publitseerimiseks ajakirja *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*



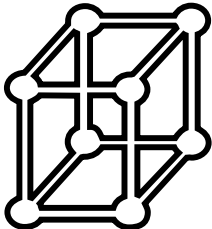
**XL  
EESTI  
FÜÜSIKAPÄEVAD**

**JA**

**XXXII  
FÜÜSIKAÕPETAJATE PÄEVAD**

**22. JA 23. MÄRTS 2010**

**TARTUS**



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

**ESMASPÄEV, 22. MÄRTS**

1. SESSIOON

Avasõnad . . . . .	10.30
EFS preemiade kätteandmine, laureaadi ettekanne . . . . .	10.45
<b>Erik Randla, Aigar Vaigu (TÜ)</b>	
2009. a Nobeli füüsikapreemia. . . . .	11.45
Stendiettekanded, lõunapaus . . . . .	12.30

2. SESSIOON

**Aleksander Rebane (MSU/KBFI)**

Kahefotoonne spektroskoopia kui uudne meetod ainesises elektrivälja mõõtmiseks. . . . .	13.15
--	-------

**Laur Järv<sup>1</sup>, Piret Kuusk<sup>1</sup>, Margus Saal<sup>2</sup> (<sup>1</sup>TÜ FI, <sup>2</sup>Tartu Observatoorium)**

Tumeenergia ja selle alternatiivid . . . . .	13.50
<i>Kohvipaus</i> . . . . .	14.20

3. SESSIOON - ARUTELUD

**Ülle Kikas (HTM)**

Põhikooli ja gümnaasiumi uute õppekavade valmimine ministeeriu- mist vaadates . . . . .	14.35
--	-------

PANEELDISKUSSIOON

Käima on läinud mitmed suured projektid – FI ehitab uut maja, Tartu Observatoorium juurdeehitust, Nanotehnoloogia teadus- ja arenduskeskus sai rahastuse, pannakse kokku Eesti teaduse teekaarti, KBFI on sisenenud neljandasse kümnendisse, Eesti Füüsika Seltsil on järjest rohkem jaksu füüsikute jaoks olulistel teemadel kaasa rääkida. Aga kas sellest kõigest

koorub välja midagi, mis annab Eesti füüsikute tegemistele uue hingamise? Sõna saavad: **Ergo Nõmmiste** (TÜ FI), **Ilmar Kink** (NanoTAK), **Raivo Stern** (KBFI), **Peeter Saari** (TÜ FI), **Anu Reinart** (TO), **Kaido Reivelt** (EFS).  
Küsitajate rollis on kolleegid, tudengid, magistrandid, doktorandid.

Diskussiooni modereerib <b>Andi Hektor</b> .....	14.50
<i>Kohvipaus</i>	
Eesti Füüsika Seltsi üldkogu .....	16.15
Eesti Füüsika Seltsi seltsiohtu Tähe 4 kohvikus.....	18.00

### TEISIPÄEV, 23. MÄRTS

#### TEADUSSESSIOON

**Daniel Kropman**<sup>1</sup>, **Tõnu Laas**<sup>2</sup>, **Uno Abru**<sup>3</sup>, **Tiit Kärner**<sup>4</sup>, **Ivo Heinmaa**<sup>5</sup>, **Charalambos Londos**<sup>6</sup>

(<sup>1</sup>TÜ, <sup>2</sup>TLÜ, <sup>3</sup>Tondi Elektroonika, <sup>4</sup>TÜ, <sup>5</sup>KBFI, <sup>6</sup>Ateena Ülikool, Kreeka)

Point defects generation kinetic in the Si-SiO<sub>2</sub> system and its interaction with impurities .....

10.30

**Vladimir Babin**<sup>1</sup>, **Vitaliy Gorbenko**<sup>2</sup>, **Aleksei Krasnikov**<sup>1</sup>, **Aleksei Makhov**<sup>1</sup>, **Martin Nikl**<sup>3</sup>, **Svetlana Zazubovich**<sup>1</sup>, **Yuriy Zorenko**<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>TÜ FI, <sup>2</sup>Ivan Franko nim Lvovi Rahvuslik Ülikool, Ukraina, <sup>3</sup>Tšehhi TA Füüsika Instituut)

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

crystalline films .....

10.55

**Matti Selg** (TÜ FI)

Mitteadiabaatilise probleemi vesiniku molekuli näitel.....

11.15

#### ÕPETAJATE SESSIOON

Avasõnad .....

9.00

**Kalev Tarkpea** (TÜ)

Uus füüsika gümnaasiumi õppekava .....

9.10

**Enn Pärtel** (TÜ FI)

Seitsmenda klassi loodusõpetus uues õppekavas: ainekava, lõiming, konstruktiivne sidusus, õppekomplekt .....

9.50

**Marko Reedik** (Eksamikeskus)

Füüsika põhikooli lõpu- ja riigieksamist: analüüs 2008/2009 õppeaastal .....

10.20

**Kaido Reivelt, Eero Uustalu (EFS)**

EFS koolidele suunatud projektid 2010–2011 .....	11.00
Füüsikaõpetajate osakonna üldkogu, arutelu, 2010. a plaanid ....	11.15
<i>Kohvipaus</i> .....	11.45

ÜHISSESSIOON

**Peeter Piksarv<sup>1</sup>, Heli Valtna-Lukner<sup>1</sup>, Madis Lõhmus<sup>1</sup>, Peeter Saari<sup>1</sup>, Pamela Bowlan<sup>2</sup>, Rick Trebino<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>TÜ FI, <sup>2</sup>Georgia Institute of Technology, USA)

Ülilühikeste valgusimpulsside difraktsioon – tuttav probleem uues kuues .....	12.00
<b>Peeter Saari</b> (TÜ FI)	
Ühest elementaarsest probleemist elektromagnetismis, mis terve sajandi õiget vastust oodanud .....	12.15
<b>Raivo Stern</b> (KBFI)	
Frustreeritud magnetid ja magnetilised monopolid .....	12.40
<b>Henn Käämbre</b> (TÜ FI)	
Pool sajandit lasereid .....	13.15
Stendiettekanded, lõunapaus .....	13.45

FÜÜSIKAHARIDUSE SESSIOON:  
E-ÕPE vs. KLASSIKALINE ÜLIKOOL

On kätte jõudnud aeg, kus põhimõtteliselt on suhteliselt väikeste jõupingutustega võimalik kogu õppeprotsess internetiseerida – loengud tulevad videost, kontrolltööd internetist, hinded Moodle'i vahendusel, konsultatsioonid kui videokonverentsid. Samamoodi on omaenda televisiooni või videosilla tegemine nüüd kättesaadav igapähele, nii et nali „kahju, et raadio pilti ei näita“ on pigem arhaism. Ehk siis internet ja arvuti on muutunud uudisasjast tööriistaks ning võiks pigem küsida – mida me siis õigupoolest teha tahame?

Kas õpilased ja tudengid viitsivad veel loengusse tulla, kui loengud internetis olemas on? Kas selliste loengute iga-aastane pidamine üleüldse on vajalik? Kui videoloengud on kõigile kättesaadavad, siis mis-suguseid võimalusi see pakub gümnaasiumiõpilaste harimiseks? Täiesti internetipõhine ülikool? Tallinna ja Tartu sidumine?



Teema on päevakajaline – TÜ üldiselt ja füüsikud eriti on salvestanud ja salvestamas olulist osa oma loengutest. Aga kuidas nende loengutega talitada?

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

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

**Ly Sõõrd** (TÜ Teaduskool)

Füüsika õpetamisest – reaalselt ja virtuaalselt . . . . . 15.00

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

Füüsika (e)õpe Tartu Ülikoolis – kuidas edasi?

Ettekanne ja arutelu . . . . . 15.15

Lõppsõna

#### STENDISESSIOON

Kutsume üles tooma välja kõiki oma 2009. a ette kantud stende!

# ÜLEVALGUSKIIRUSEGA JA ALLAVALGUSKIIRUSEGA, KIIRENEVAIST JA AEGLUSTUVAIST BESSELI IMPULSSIDEST TEOREETIKU PILGUGA

---

**PEETER SAARI**  
TÜ Füüsika Instituut

## 1. SISSEJUHATUS

Teeme sissejuhatuseks läbi arutluse, mis täpsustab edaspidises kasutatud mõisteid. Kuid mitte ainult – ühtlasi me näeme, kuidas füüsikaliselt pealiskaudne teoretiseerimine ülikooliõpikuist pärit mõttemallidega rappa võib viia. Kusjuures võib viia sinna mitte ainult tudengid, vaid on tegelikult viinud nii mõnedki juhtivates füüsikaajakirjades esinevad eksperdid lainelevi teooria alal.

Teatavasti on ristkoordinaatides lainevõrrandi erilahendeiks monokromaatsed tasalained, mis moodustavad ortogonaalsete lainefunktsioonide süsteemi, mistõttu nende baasil saab superpositsioonina esitada lainevõrrandi suvalise lahendi. Kui tasalaine levib näiteks telje  $z$  suunas, siis valgusväli kirjeldub vaid ühest ruumikoordinaadist sõltuva lihtsa lainefunktsiooniga (siinuse või koosinuse asemel kasutame mugavamalt kompleksset esitust):

$$\Psi_{TL}(x, y, z, t) \propto e^{i(kz - \omega t)}, \quad (1)$$

kus lainevõrrandist tulenevalt kehtib seos  $\omega = ck$  ringsageduse ja laine-  
arvu vahel. Valgusvälja vektorloomusele vaatamata piirdume siin ühe  
skalaarse lainefunktsiooniga, mille võib lugeda näiteks elektrivälja  
 $y$ -suunaliseks komponendiks. Kitsalt suunatud ja lineaarselt polariseeri-

tud EM-välja puhul on skalaarne lähendus piisav ja laineoptikas tavaline käsitusviis. Kuid ikkagi on selline tasalaine matemaatiline idealisatsioon, füüsikaliselt realiseerimatu oma lõpmatu energia tõttu, mis tuleneb ruumilisest piiramatusest. Välja ristsuunaliseks piiramiseks lõpliku läbimõõduga kimbuks tuleks valemisse (1) lisada teljest kaugel, st ristsuunaliste koordinaatide  $x$  ja  $y$  suurte väärtuste juures nulli langev apertuuritegur. Fourier' superpositsioonipildis tähendab see ühe kindla suunaga tasalaine asendamist selle suuna ümber „laialimääritud“ lainevektoritega tasalainete paketiga. Näiteks hea monokromaatsel valguskimbuga laseri väljundis esitub väli valemiga (1), kui sinna lisada (nõrga  $z$ -sõltuvusega) teguriks radiaalkoordinaadist tugevalt sõltuv ja kimbu jämedusele vastava  $1/e$ -laiusega gaussiaan. Kuid siin ja edaspidi me apertuurifunktsiooni valemisse ei kirjuta ja – pidades küll meeles selle põhimõttelist olemasolu – loeme selle konstandiks suurte kaugusteni kimbu teljest.

Teine lugu on valgusvälja pikisuunalise piiratusega. Tegelikult ei eksisteeri väli lõpmata kaua, st alati on tegu lühema või pikema impulsi – ka pidevatoimeline laser tuleb millalgi sisse ja välja lülitada. Fourier' superpositsioonipildis tähendab see ühe kindla sagedusega tasalaine asendamist selle kui kandesageduse ümber „laialimääritud“ sagedusspektriga tasalainete paketiga. Küsimus sellise paketi liikumiskiirusest toob sisse rühmakiiruse mõiste, mis on defineeritud kui tuletis  $v_r = \partial\omega/\partial k$ . Kuna vaakumis dispersiooni puudumise tõttu funktsionaalne seos sageduse ja lainearvu vahel paketi on antud lineaarse sõltuvusega  $\omega = ck$ , siis saame  $v_r = c$  ehk impulsi kui lainepaketi rühmakiirus on luminaalne ja võrdne faasikiirusega  $v_f = \omega/k = c$ . Tasalainepaketi (ühedimensionaalsel) levil saab rühmakiirus erineda faasikiirusest vaid disperseerivas keskkonnas, kus sageduse ja lainearvu vaheline sõltuvus on keerulisem kui lineaarne funktsioon. Kui lainepaketi spekter langeb piirkonda, kus keskkond neelab või võimendab, saab rühmakiirus olla suurem kui  $c$  ehk superluminaalne, mis näitab, et rühmakiirust ei saa samastada infoliikumise- ehk signaalikiirusega, mida paraku mõningates õpikutes on tehtud.

Läheme nüüd oma sissejuhatava arutlusega edasi Besseli impulsside juurde. Teatavasti on samaväärselt ristkoordinaatidega silinderkoordinaatides kirjutatud lainevõrrandi erilahendeiks monokromaatsed silindrilised lained, mis samuti moodustavad ortogonaalsete lainefunktsioonide süsteemi, mistõttu nende baasil saab superpositsioonina esitada lainevõrrandi suvalise lahendi.

Kui silinderlaine levib näiteks telje  $z$  suunas ja on telgsümmeetriline, siis valgusväli kirjeldub ristsuunalisest radiaalkoordinaadist  $\rho^2 = x^2 + y^2$  sõltuva 0-ndat järku 1. liiki Besseli funktsiooniga koos tasalaineteguriga (jällegi jätame apertuurifunktsiooni kirjutamata):

$$\Psi_B(\rho, z, t) \propto J_0(k_\rho \rho) e^{i(k_z z - \omega t)}, \quad (2)$$

kus  $k_\rho$  on Besseli „rõngaste“ tihedust määrav ristsuunaline lainevektori komponent ja  $k_z$  on levitelje suunaline komponent ning lainevõrrandist tulenevalt kehtib seos

$$\frac{\omega^2}{c^2} = k_\rho^2 + k_z^2. \quad (3)$$

Lainevälja radiaalstruktuuri (vt pilte lingi [1] kaudu) määravad Besseli funktsiooni  $J_0(k_\rho \rho)$  võib võtta kui silindrilist üldistust koosinusoidile  $\cos(k_\perp x)$ , mis esitab telje  $z$  suhtes kaldu, nurkade  $\pm\theta$  all leviva tasalainepaari interferentsipildi ristsuunalist struktuuri. Besseli kimbu faasikiirus vaakumis avaldub valemest (2), (3):  $v_f = \omega/k_z > c$ , st on superluminaalne. Kui nüüd selline laine on lõpliku kestusega impulss, siis selle rühmakiirus levitelje suunas avaldub tuntud viisil kui  $v_r = \partial\omega/\partial k_z$ , mille abil valemist (3) leiame

$$\frac{\partial}{\partial k_z} c \sqrt{k_\rho^2 + k_z^2} = c \frac{k_z}{\sqrt{k_\rho^2 + k_z^2}} < c. \quad (4)$$

Näeme, et faasi- ja rühmakiirus erinevad, kuid nüüd pole dispersiooni põhjustajaks mitte keskkond, vaid laine ruumiline levi, erinevalt tasalaineimpulsi (kvaasi-)ühedimensionaalsusest. Ühtlasi näeme, et kehtib sama õpikutõde, mis lainejuhtidegi korral – (signaali mitte edastava) superluminaalse faasikiiruse juures on rühmakiirus subluminaalne. Valemi (4) võib, muide, leida kas või sellisest matemaatika käsiraamatust, nagu vanemale füüsikute generatsioonile hästi tuntud roheline kõide prantslastest abielupaar Kornidelt [2].

Seega oleme jõudnud järeldusele, et Besseli radiaalprofiiliga impulss, olgu ta lühike või pikk, kellukesekujulise, kandilise või suvalise kujuga (pikiprofiiliga ehk laineõngete mähisjoonega), *peab* liikuma aeglasmalt kui valguse kiirus vaakumis! Enam-vähem sarnasel viisil on mitmed autorid jõudnud järeldusele, et rääkida mingitest superluminaalsetest Besseli impulssidest peab olema mingi arusaamatus – isegi kui on saadud mingeid katseandmeid, vt nt [3, 4].

Aga katselisi tõestusi nn Bessel-X impulsside faasi- ja rühmakiiruse superluminaalsusele on piisavalt, eriti kui nimekirja lisada hiljuti meie ja ameeriklaste koostöös saadud tulemused, mis saadud otseselt valgusimpulsi elektrivälja ajalis-ruumilist käitumist kõrge lahutusega mõotva uudse eksperimenditehnikaga [5-14]. Muidugi, füüsika ajaloost on teada hulganisti näiteid, kus eksperiment kui lõplik instants on olemaoleva teooria ümber lükanud. Siiski, antud juhul pole konflikt kaugeltki mingit sellist paradigmaatilist mastaapi - valgusväli peab igal juhul olema kirjeldatav Maxwelli võrrandega või lainevõrrandiga, st jääma (klassikalise) elektrodünaamika või laineoptika raamidesse. Viimased omakorda on relativistlikud teooriad, st kõikvõimalikud valguslained lihtsalt peavad alluma Einsteini põhjuslikkusele ehk nendega info edastamise kiirus on piiratud universaalkonstandiga  $c$ . Seega - kui jätta kõrvale katsetulemuste vigasus või väärinterpretatsioon, mis küll ka kunagi pole eksperimentis iseenesest välistatud - saab antud juhul vastuolu põhjus peituda vaid eelpool visandatud teoreetilise analüüsi pealiskaudsuses.

Milles nimelt seisneb see pealiskaudsus ja millistele eksiarvamustele komistatakse, see ongi alljärgneva põhiteemaks.

## 2. ERI TÜÜPI LAINEPAKETTIDE RÜHMAKIIRUS

Suvalise ajast sõltuva 3D lainevälja, k.a impulsi, saab esitada tasalaianete superpositsioonina üle lainevektori kolme komponendi (üks 4-st Fourier' muutujast, näiteks sagedus, on lainevõrrandi kehtivuse tõttu juba teistest sõltuv). Sama välja saab ekvivalentselt esitada silinderkoordinaatides superpositsioonina Besseli kimpudest, kus on analoogiliselt 3 vaba muutujat: telje  $z$  suunaline ja radiaalsuunaline lainevektori komponent ning Besseli funktsiooni järk kui summeerimismuutuja. Telgsümmeetrilise välja puhul jääb superpositsiooni ainult 0-ndat järku Besseli funktsioon  $J_0$  ning väli avaldub - vrld ka valemiga (2) - kui superpositsiooniintegraal üle 2D spektri  $\tilde{\Psi}(k_\rho, k_z)$ :

$$\Psi(\rho, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} dk_z \int_0^{\infty} dk_\rho \tilde{\Psi}(k_\rho, k_z) J_0(k_\rho, \rho) \exp\left[ik_z z - i\omega(k_\rho, k_z)t\right], \quad (5)$$

kus sageduse sõltuvus lainevektori komponentidest  $\omega(k_\rho, k_z) = c\sqrt{k_\rho^2 + k_z^2}$  määrab ära dispersiooni.

Kitsendame nüüd veelgi üldisust ning võtame spetsiifilise spektri, mis on kõikjal võrdne nulliga, välja arvatud sirgel  $k_p = k_z \tan \theta$ , kus  $\theta \ll \pi/2$  on mingi kõikide spektraalkomponentide jaoks ühesugune ja tüüpiliselt üsna väike nurk. Sellisel juhul, kuna 2D spekter sisaldab delta-funktsiooni, jääb alles vaid integreerimine üle ühe muutuja suvalise spektraalfunktsiooniga S:

$$\Psi_{BX}(\rho, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} dk_z S(k_z) J_0(k_z \tan \theta \rho) \exp \left[ ik_z \left( z - \frac{c}{\cos \theta} t \right) \right]. \quad (6)$$

See ongi Bessel-X impulss oma X-tähe kujulise energijaotusega telje tasandis ning ereda lokaliseeritud maksimumiga tsentris, vt pilte viidete [1, 5, 10] linkidelt. Arvutades (6) faasist valemiga  $v_r = \partial\omega/\partial k_z$  teljesuunalise rühmakiiruse ja valemiga  $v_f = \omega/k_z$  faasikiiruse, saame mõlemale superluminaalse väärtuse  $v_r = v_f = c / \cos \theta$ . Seejuures on rühmakiirus ühesugune üle kogu lainepaketi spektri, aga mitte igas spektrilõiguses isesugust väärtust omav diferentsiaalne ja vaieldava tähendusega suurus, nagu disperseerivate-absorbeerivate lainepakettide üldjuhul. Veelgi enam, levikoordinaat  $z$  ja aeg  $t$  figureerivad valemis (6) vaid vahena kombinatsioonis  $z - ct / \cos \theta$ , mis tähendab, et kogu lainepakett levib piki telge  $z$  kiirusega  $c / \cos \theta$  *muutumatu kujul* – leviinvariantset. Muidugi ei kesta leviinvariantsus lõpmatuseni – nagu sissejuhatuses oli mainitud, tuleb tegelikkuses arvestada lõpliku apertuuriga, mistõttu valemist (5) tegelikkuses realiseeritava Bessel-X impulsi avaldise saamisel delta-funktsioon asendub mingi kitsa kandjaga regulaarse funktsiooniga [15-17]. Olgu lõpuks märgitud, et avaldisega (6) esitub vaid kõige lihtsam superluminaalne leviinvariantne lokaliseeritud laine – Bessel-X impulss. Üldisem, nn fokuseeritud X-laine, aga samuti luminaalsed ja subluminaalsed leviinvariantsed lokaliseeritud lained, on tuletatavad analoogiliselt üldisest avaldisest (5) [18].

Seega on teooria ja eksperiment tegelikult kooskõlas, kuid milles seisnes siis sissejuhatuses esitatud väide, mis andis subluminaalse rühmakiiruse?

Viga peitus vaikivas eelduses, et diferentseerimisel avaldises (4) on teine lainevektori komponent sõltumatu konstant.

Tuletame nüüd silindersümmeetriliste lainepakettide üldvalemist (5) avaldise erijuhu jaoks, kus radiaalsuunaline lainevektor on tõepoolest konstant, ühesuguse väärtusega  $k_p = k_\perp$  kõigi spektraalkomponentide jaoks. Siis samuti langeb integreerimine üle teise muutuja ära ning (5) asendub avaldisega

$$\Psi_{BP}(\rho, z, t) = J_0(k_{\perp}\rho) \int_{-\infty}^{\infty} dk_z S(k_z) \exp \left[ ik_z \left( z - ct \sqrt{\frac{k_{\perp}^2}{k_z^2} + 1} \right) \right]. \quad (7)$$

Selline lainepakett on saanud kirjanduses nimeks *Bessel pulse* või *pulsed Bessel beam*, teda saab tekitada lastes valgusimpulsi läbi kettakujulise ja ringjate kriipsudega difraktsioonivõre ning ta erineb põhimõtteliselt Bessel-X impulsist: ta on integraaliga antud kujuga tasalaineimpulss, mis levib telje  $z$  suunas muutuva kestusega, aga radiaalsuunas omab Besse-li ringjat struktuuri sammuga  $2\pi/k_{\perp}$ , mis ei muutu levil. Piltlikult öeldes on ta nagu õhem või paksem lapiti lendav ketas, mille materjal on raadiustpidi jaotatud Besse-li funktsiooni  $J_0$  järgi. Mingeid tähe X kujulisi (st ruumis kaksik-koonuselisi) „tiibasid“ – nagu Bessel-X impulsil – tal ei ole. Sissejuhatuse valemite kohaselt on tal faasikiirus superluminaalne, kuid rühmakiirus valemist (4) subluminaalne. Seejuures mõlemad kiirused muutuvad piki spektrit, seega rühmakiirus iseloomustab impulsi liikumist seda ligikaudsemalt, mida laiem on spekter *resp.* lühem impulsi kestus. Kuna faas avaldises (7) sõltub mittelineaarselt muutujast  $k_z$ , siis – vastavalt Fourier’ pöörde omadustele – algelt lühike ( $z$ -suunas kitsas) impulss laieneb levil.

Seega, öeldut kokku võttes seisnes sissejuhatuses tutvustatud ja kirjanduses ikka veel ette tuleva käsitluse pealiskaudsus selle tõsiasja ignoreerimises, et ühtedest ja samadest monokromaatsetest Besse-li kimpudest saab moodustada väga erisuguseid superpositsioone sõltuvalt vabade parameetrite käitumisest ning tulemusena saadud lainepaketid levivad ka põhimõtteliselt erineval viisil. See kehtib mitte ainult Besse-li tüüpi lainete puhul. Fokuseeritud ülilühikesed laserimpulsid – mis esituvad superpositsioonina Gaussi kimpudest kui lainevõrrandi monokromaatseist lahendeist paraksiaalses lähenduses – võivad fookuses omada nii subluminaalset kui ka kergelt superluminaalset rühmakiirust sõltuvalt fookuseeriva süsteemi parameetrite sagedussõltuvusest [19, 20]. Sama jääb kehtima ka ilma paraksiaalse lähendusega, st lainevõrrandit fookuseeruva impulsi jaoks täpselt lahendades [21]. Samuti on võimalikud eri viisil evolutsioneeruvaid ja erisuguste kiiruslike omadustega lainepakette kokku panna nn kiirenevatest Airy kimpudest [22], mille uurimine on kirjanduses praegu „kuum“ teema.

### 3. KIIRENEVATEST BESSEL-X IMPULSSIDEST

Nii nagu kosinusoidaalne interferentsipilt tekib näiteks optilise kaksikkii-  
lu (Fresneli biprisma) abil üksteise suhtes väikese nurga  $2\theta$  all suunatud  
kahest monokromaatsest tasalainest, saab Besseli kimbu tekitada sellise  
laine läbilaskmisega koonilise pinnaga läätsest, nn aksikonist. Seega on  
Besseli kimp esitatav kui superpositsioon üle polaarnurga  $\varphi$  tasalaine-  
paaridest, mille suunavektorid moodustavad koonuse tipunurgaga  $2\theta$   
ümber  $z$ -telje. Vastavalt, Bessel-X impulsi saamise üks meetodeid ongi  
aksikonist tasalaine-impulsi läbilaskmine (vt [1, 5, 18, 20] ning viited neis)  
ja teda saab esitada avaldisele (6) matemaatiliselt ekvivalenttsel kujul [5]

$$\Psi_{BX}(\rho, z, t) = \int_0^\pi d\varphi [A(\mathbf{r}_t \mathbf{n}_1) + A(\mathbf{r}_t \mathbf{n}_2)], \quad (8)$$

kus  $A(\cdot)$  kui ühe skalaarse muutuja funktsioon pole midagi muud kui  
pealelangeva tasalaine-impulsi ajaline sõltuvus, kasutatud on tähistust

$$\mathbf{r}_t = [\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi, z - ct / \cos \theta]$$

ja

$$\mathbf{n}_1 = [\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta],$$

$$\mathbf{n}_2 = [\sin \theta \cos(\varphi + \pi), \sin \theta \sin(\varphi + \pi), \cos \theta]$$

on suuna-ühikvektorite paar, mis integreerimismuutuja  $\varphi$  joostes  $0$ -st  $\pi$ -ni  
moodustavad eelnimetatud koonuse. Seega, spektraalkujule (6) alterna-  
tiivse esituse (8) kohaselt moodustub Bessel-X impulss ringsümmeetrilise  
superpositsioonina telje suhtes nurga all levivatest tasalaineimpulssidest.

Mis saab siis, kui lähteimpulsi front on tasandi asemel (kergelt) sfääri-  
line, näiteks kui aksikoni ees on lääts? Sel juhul kaksik-koonuseline Bes-  
sel-X impulsi profiil moondub ja lainefront omandab paisuva (hajutava  
lääts korral) või kokkutõmbuva (koondava läätse korral) spindel-toroi-  
di pinna kuju selle pooluse (see on kõrvitsa puhul varre kinnituskoht)  
lähedal [13]. Tulemusena jääb teljel heas lähenduses kehtima valem (6)  
või (8), kuid nurk  $\theta$  hakkab sõltuma levikaugusest  $z$ . Kuna see nurk mää-  
rab ära impulsi kiirused  $v_r = v_f = c / \cos \theta$ , saame aeglustuva (hajutava  
lääts korral) või kiireneva (koondava läätse korral), kuid ikka superlu-  
minaalseks jääva Bessel-X impulsi, vt pildid artiklis [13]. Samasugused  
kiirenevad või aeglustuvad Bessel-X impulsi modifikatsioonid moodus-  
tuvad ülilühikeste impulsside difraktsioonil ümmargustel tõketel [14].



#### 4. RÜHMAKIIRUS *VERSUS* SIGNAALIKIIRUS

Nüüd on meil ka kõik vajalik kirja pandud, et puudutada paljusid häirivat küsimust, kuidas siis Bessel-X-tüüpi impulsside superluminaalsus – millega tuleb leppida kui teoreetiliselt ja eksperimentaalselt tõestatud faktiga – saab rikkuda Einsteini kausaalsust. Loomulikult ei saagi, sest avaldised (6) ja (8) on lainevõrrandi lahendid, aga lainevõrrandisse on relativistlik kausaalsus ja piirkiirus  $c$  „sisse monteeritud“. Paraku standardsed füüsikastuudiumi õpikud pahatihti ei erista rühmakiirust signaali- ehk info levimise kiirusest ning isegi kui käsitletakse faasikiiruse superluminaalsust ning rühmakiiruse subluminaalsust lainejuhtides, selgitatakse seda erinevust asjaoluga, et teine neist annab impulsi kui signaali liikumise kiiruse, mis aga ei saa ületada  $c$ -d. Seega pärineb arvamus, et  $c$ -st suurem rühmakiirus on tabu, enamasti arvaja ülikoolipõlvest. Ometi on juba möödunud sajandi algupoolest teada (Sommerfeld jt), et laineimpulsi 1D levil disperseerivas-neelavas/võimendavas keskkonnas võib rühmakiirus võtta suvalisi, isegi negatiivseid väärtusi ning signaali liikumise kiiruse ei määra mitte impulsi maksimumi, vaid tema frondi (Sommerfeldi prekursor) või temasse tehtud muu järsu „täkke“ liikumiskiirus. Nagu eespool mainitud, disperseeriva aine rolli 1D probleemis täidab meil lainevälja ruumiline (3D) levi.

Kui vaadata avaldise (8) kuju, siis näeme analoogiat Bessel-X impulsi liikumise ja kahe löiketera kokkupuutepunkti liikumise vahel nn käärde paradoksis, mida erirelatiivsusteooria õpetamisel kasutatakse kui näidet infot mitteedastavast superluminaalsest liikumisest (piisavalt megapikkade käärterade ja väikese nurga puhul nende vahel), sellal kui aine ja signaal (löiketerad ja nende serv) liiguvad subluminaalselt, aga nurga all sümmeetriateljega [23]. Samas on vale sellest analoogiast liialt hooгу sattuda ja pidada Bessel-X impulsi keset millekski „mitte päris“ valgusimpulsiks, vaid „lihtsalt interferentsi tulemuseks“ või „puhtalt faasiefektiks“ (väljend artiklist [4]). Esiteks, sellised sildid ei selgita midagi. Teiseks, Bessel-X impulsi keskosas on faasipinnad risti leviteljega ning mitte miski ei liigu teljega nurga all, ka energia liikumist näitav Poyntingi vektor on paralleelne leviteljega. Kolmandaks, pole mingit alust pidada tasalaineid „õigemaks“ teiste ortogonaalsete baasifunktsioonidega antud lainetest – silindrilistest, sfäärilistest jt. Suvaline laineväli ning kõik nimetatud omavahel on esitatavad superpositsioonina teistest (arendusena ortogonaalses baasis) ja seega on „interferentsi tulemus“. Oleks ju

absurdne pidada laserist väljuvate femtosekundimpulsside jada mingi-sugusteks ikka mitte „päris“ valgusimpulssideks, vaid „lihtsalt laseri pidevmoodide interferentsi tulemuseks“ põhjusel, et impulssidejada saab arendada Fourier' ritta monokromaatsete moodide järgi.

Miks siis ikkagi Bessel-X impulss, mis liigub ülevalguskiirusega, ei saa edastada signaali kiiremini kui  $c$  ?

Kõigepealt on oluline tähele panna, et Bessel-X impulsi ere keskpunkt „toitub“ levil pidevalt oma koonusekujulisest „esitiivast“ ja seetõttu väike teljelasuv tõke ei jäta varju [24]. Kui aga teha Bessel-X impulsi keskele üle kogu tema ristlõike lainefunktsiooni nulliv „lõige“ mingi peaaegu hetkeliselt töötava katikuga, siis see kettakujuline väljalõigatud „auk“ impulsi lainefunktsioonis oleks edastatavaks signaaliks, mille lähtehek oleks täpselt määratud tema kaduv-väikese kestuse tõttu. Kuid sellise „augu“ tekitamine tähendab avaldise (7) mahalahutamist, st negatiivse märgiga Besseli impulsi liitmist Bessel-X impulsi keskele. Besseli impulsi punktis 2 kirjeldatud omadustest aga järgneb, et katiku sulgumisest infot edastav signaal – iseärasus laineväljas – levib subluminaalselt ning Einsteini põhjuslikkuse rikkumist pole.

## 5. KOKKUVÕTE

Ehkki Bessel-X impulsside teoreetilise ja eksperimentaalse uurimise alaste esimeste artiklite [5, 6] avaldamisest on möödunud üle tosina aasta, pole kirjanduses vaibunud huvi nende vastu. Selle põhjuseks pole kaugeltki mitte ainult nende intrigeeriv superluminaalsus, vaid asjaolu, et neil on perspektiivseid rakendusi ning teoreetilises plaanis on nad aluseks keerulisemate lokaliseeritud lainete tuletamisel ja uurimisel. Nende kiirenevad ja aeglustuvad modifikatsioonid sobivad kirjeldama femtosekundiliste valgusimpulsside levimist läbi difrageerivate ja refrageerivate optiliste elementide, nagu näitavad esimesed sellealased tööd [13, 14].

Ameerika Optikaühingu kuukiri *Optics & Photonic News*, mida loevad nii teadlased kui ka insenerid ja ettevõtjad optikatööstuses, valis Bessel-X impulsi elektrivälja ülemõõtmise femtosekundilise ajalise ja mikromeetrise ruumilise lahutusega 2009. a 28 tähelepanuväärseima optikatulemuse hulka [25].

Füüsika ajalugu on näidanud – ja seda just meie teemasse otseselt puutuvalt (lähemalt vt [20]) –, et rutiinne mõtlemine võib sünnitada

tabusid, mis lähevad väga kalliks maksma. Tšerenkovi-Vavilovi efekt oleks võinud olla avastatud ja Nobeli preemia saadud 30 aastat varem ning teoreetikud Frank ja Tamm poleks pidanud 3 aastat vaeva nägema efekti seletava teooria loomiseks, kui keegi oleks tõsiselt süvenenud Sommerfeldi 1904. a ilmunud artiklisse. Selles oli tuletatud vaakumis superluminaalselt liikuva osakese kiirguse valem, mis – ehkki vaakumis osake nii liikuda ei saa – on sisuliselt identne Franki ja Tamme 33 a hiljem saaduga. Paraku tekitas Einsteini erirelatiivsusteooria sünd 1905. a füüsikute seas ülbelt pealiskaudset eitavat suhtumist igasugustesse superluminaalsetesse liikumistesse ning Sommerfeldi teooria vajus unustusse...

## KIRJANDUST

1. P. Saari, „Valgusest kiiremad lained,“ Horisont nr 1 (1998); selles mitte ainult ei tutvustata teemat eesti keeles, vaid artikli digikooopiast aadressil <http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/elmag/Horisont1998jaanSaari.pdf> saab vaadata ka värvipilte Besseli impulsidest ja nende tekitamisest. Käesolevas artiklis on üldse loobutud jooniste reprodutseerimisest, sest need on värvilistena (mõnel juhul isegi animeerituna) hetkega avatavad siin ja edaspidi viidetele lisatud veebiaadressidelt. Ülikoolivõrgu kaudu on teatavasti kõikvõimalike teadusajakirjade artiklid mugavalt ja tasuta kättesaadavad, kust võib viidete järgi ka käesolevat artiklit illustreerivaid värvilisi jooniseid ja eksperimentaalandmete originaalpilte vaadata.
2. G. A. Korn, T. M. Korn, *Mathematical handbook for scientists and engineers*, McGraw Hill, New York, Toronto, London, 1961; punkt 10.4-8 (lk 312 1970. a venekeelses Nauka väljaandes).
3. P. W. Milonni, “Controlling the speed of light pulses,” *J. Phys. B* 35, R31 (2002); muidu väga heas ja õpetlikus ülevaates valguse mitmesugustest kiirustest on lk 47 esitatud ekslikke kriitilisi väiteid meie artikli [5] aadressil.
4. S. C. Walker and W. A. Kuperman, “Cherenkov-Vavilov formulation of X waves,” *Phys. Rev. Lett.* 99, 244802 (2007).
5. P. Saari and K. Reivelt, “Evidence of X-shaped propagation-invariant localized light waves,” *Phys. Rev. Lett.* 79, 4135 (1997); see omal ajal tagasihoidlike tehniliste vahenditega tehtud töö on jätku-

valt tsiteeritav ning tänaseks kogunud üle 170 viite. Kiire link:  
<http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/elmag/PRL04135.pdf> .

6. H. Sõnajalg, M. Rätsep, and P. Saari, "Demonstration of the Bessel-X pulse propagating with strong lateral and longitudinal localization in a dispersive medium," *Opt. Lett.* 22, 310–312 (1997).
7. K. Reivelt and P. Saari, "Experimental demonstration of realizability of optical focus wave modes," *Phys. Rev. E* 66, 056611 (2002).
8. I. Alexeev, K. Y. Kim, and H. M. Milchberg, "Measurement of the superluminal group velocity of an ultrashort Bessel beam pulse," *Phys. Rev. Lett.* 88, 073901 (2002).
9. R. Grunwald, V. Kebbel, U. Griebner, U. Neumann, A. Kummrow, M. Rini, E. T. J. Nibbering, M. Piché, G. Rousseau, and M. Fortin, "Generation and characterization of spatially and temporally localized few-cycle optical wave packets," *Phys. Rev. A* 67, 063820 (2003).
10. P. Bowlan, R. Trebino, H. Valtna-Lukner, M. Löhmus, P. Piksarv, P. Saari, "Directly measuring the spatiotemporal electric field of ultrashort Bessel-X pulses." arXiv:0904.1817v1 .
11. F. Bonaretti, D. Faccio, M. Clerici, J. Biegert, P. Di Trapani, "Spatio-temporal amplitude and phase retrieval of Bessel-X pulses using a Hartmann-Shack sensor," *Opt. Express* 17, 9804–9809, (2009).
12. P. Bowlan, R. Trebino, H. Valtna-Lukner, M. Löhmus, P. Piksarv, and P. Saari, "Directly measuring the spatiotemporal electric field of ultrashort Bessel-X pulses," *Opt. Lett.* 34, 2276–2278 (2009).
13. H. Valtna-Lukner, P. Bowlan, M. Löhmus, P. Piksarv, R. Trebino, and P. Saari, *Opt. Express* 17, 14948–14955 (2009); <http://www.optics-infobase.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-17-17-14948> .
14. P. Bowlan, M. Löhmus, P. Piksarv, H. Valtna-Lukner, P. Saari, R. Trebino, "Measuring the spatio-temporal field of diffracting ultrashort pulses," arXiv:0905.4381v1, vt ka P. Piksaare et al ettekannet lk 137.
15. K. Reivelt and P. Saari, "Localized wave solutions of the scalar homogeneous wave equation and their optical implementation," arXiv:physics/0309079v2.
16. H. Valtna, K. Reivelt and P. Saari, "Modifications of the focused X wave as suitable models of strongly localized waves for realization in the optical domain," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 8, 118–122 (2006).

17. K. Reivelt and P. Saari, "Linear-optical generation of localized waves," In: *Localized Waves: Theory and Applications*, edited by H. E. Hernández-Figueroa, M. Zamboni-Rached, and E. Recami, J. Wiley, New Jersey, 185–213 (2008).
18. P. Saari and K. Reivelt, "Generation and classification of localized waves by Lorentz transformations in Fourier space," *Phys. Rev. E* 69, 036612-12 (2004).
19. Z. L. Horváth and Zs. Bor, "Reshaping of femtosecond pulses by the Gouy phase shift," *Phys. Rev. E* 60, 2337–2345 (1999).
20. P. Saari, "Localized waves in femtosecond optics," In: *Ultrafast Photonics*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 317–340, 2004; <http://www.physic.ut.ee/instituudid/efiti/loengumaterjalid/elmag/Saari2SUSSPred.pdf>
21. P. Saari, "Evolution of subcycle pulses in nonparaxial Gaussian beams," *Opt. Express* 8, 590–598, (2001); <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-8-11-590> .
22. P. Saari, "Laterally accelerating Airy pulses," *Opt. Express* 16, 10303–10308 (2008); <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-16-14-10303> .
23. Lõikuvate sirgete või laine frontide lihtsat, kuid üsna huvitavat ja õpetlikku relativistlikku kinemaatikat on käsitletud artiklis [18].
24. Esitades Bessel-X impulsi hilineva ja ennetava Greeni funktsiooni kaudu, on ta interpreteeritav kui superluminaalselt liikuva, Huygeni-tüüpi fiktiivse allika Tšerenkovi-Vavilovi kiirgus, mis neelab endasse välja eesliikuvast tagurpidi Machi koonusest [20].
25. P. Bowlan, H. Valtna-Lukner, M. Lõhmus, P. Piksarv, P. Saari, R. Trebino, "Measurement of the spatiotemporal electric field of ultrashort superluminal Bessel-X pulses," *Optics and Photonics News* 20, <http://www.osa-opn.org/> , December special issue "Optics in 2009", p. 42 (2009); <http://www.physic.ut.ee/instituudid/efiti/loengumaterjalid/elmag/OPNdecember2009p42.pdf>.

# ETTEKANNETE SISUKOKKUVÕTTED

## **Bi<sup>3+</sup>- IOONIDEGA AKTIVEERITUD Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> JA Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> MONOKRISTALLILISTE KILEDE SPEKTROSKOOPIA**

---

**VLADIMIR BABIN<sup>1</sup>, VITALIY GORBENKO<sup>2</sup>,  
ALEKSEI KRASNIKOV<sup>1</sup>, ALEKSEI MAKHOV<sup>1</sup>, MARTIN NIKL<sup>3</sup>,  
SVETLANA ZAZUBOVICH<sup>1</sup>, YURIY ZORENKO<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>TÜ Füüsika Instituut, <sup>2</sup>Ivan Franko nim Lvovi Rahvuslik Ülikool,  
Ukraina, <sup>3</sup>Tšehhi TA Füüsika Instituut

Kolmevalentsete Bi<sup>3+</sup>-ioonidega aktiveeritud alumiiniumgranaadid Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ja Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> on perspektiivsed stsintillaatormaterjalid tänu nende kiirele luminesentsile, kõrgele efektiivsusele ning headele mehaanilistele ja keemilistele omadustele. Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Bi ja Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Bi monokristallilisi kilesid uuriti temperatuurivahemikus 4,2–330 K aeglahutusega spektroskoopia meetodil. Leiti, et nende kiirgusspektrid sisaldavad erinevate karakteristikutega ultravioletseid ja nähtavaid ribasid ning tehti järeldusi Bi<sup>3+</sup>-iooni ning Bi<sup>3+</sup>-iooni kõrval lokaliseerunud eksitoni energianivoode kooseksisteerimisest luminesentsitsentri relakseerunud ergastusseisundis.

Ultravioletne riba koosneb kahest komponendist, mis on seotud <sup>3</sup>P<sub>1</sub> – <sup>1</sup>S<sub>0</sub> ja <sup>3</sup>P<sub>0</sub> – <sup>1</sup>S<sub>0</sub> üleminekutega vabas Bi<sup>3+</sup>-ioonis. Temperatuuril alla 70 K ilmneb ainult üks madalama energiaga kiirgusriba kustumisajaga ~10<sup>-3</sup> s, mis on seotud metastabiilse <sup>3</sup>P<sub>0</sub>-nivoo kiirgusliku lagunemisega. Temperatuuril üle 150 K domineerib kõrgema energiaga kiirgusriba, mis on seotud lubatud üleminekutega <sup>3</sup>P<sub>1</sub>-nivoolt.

Nähtava kiirguse spekter koosneb kahest laiast suure Stokesi nihkega lokaliseerunud eksitoni kiirgusribast, mis on seotud nii üksikute ( $\text{Bi}^{3+}$ ) kui ka paaris ( $\text{Bi}^{3+} - \text{Bi}^{3+}$ ) tsentritega. Tehti kindlaks vastavate seisundite struktuur, pakuti relakseerunud ergastusseisundite mudelid ja uuriti nendes toimuvaid protsesse.

## TUMEENERGIA JA SELLE ALTERNATIIVID

---

**LAUR JÄRV<sup>1</sup>, PIRET KUUSK<sup>1</sup>, MARGUS SAAL<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>TÜ Füüsika Instituut, <sup>2</sup>Tartu Observatoorium

Viimasel kümnendil järjest täpsemaks muutunud astrofüüsikaliste ja kosmoloogiliste vaatluste interpretatsioon Einsteini üldrelatiivsusteooriale toetuva ja Universumi ruumilist homogeensust ja isotroopsust eeldava kosmoloogilise standardmudeli raames osundab, et umbes viie miljardi aasta eest hakkas Universumi paisumine kiirenema.

Selle asjaolu teoreetiliseks seletamiseks standardmudeliga kooskõlas on vaja sisse tuua ruumis ühtlaselt jaotunud negatiivse rõhuga uus tundmatu materialiik – tumeenergia, mis moodustab Universumi energiatihedusest ligi kolmveerandi ning mis tuntud materiale avaldab ainult gravitatsioonilist mõju Universumi paisumise kaudu.

Alternatiiviks on uurida võimalust, et Einsteini üldrelatiivsusteooria on vaid lähend mingist keerulisemast enama vabadusastmete arvuga teooriast, kusjuures suurte kosmiliste kauguste mastaabis muutuvad oluliseks täiendavad parandusliikmed, mis viivad kiirenevale paisumisele ilma uut tundmatut materiat postuleerimata.

Kolmandaks teoreetiliseks lähenemisteks on jääda Einsteini üldrelatiivsusteooria ja tuntud materia juurde, kuid püüda arvestada, et Universum on homogeenne ja isotroopne ainult statistiliselt, ent lokaalselt on materia tihedus galaktikaparvede poolt moodustatud struktuurides oluliselt suurem kui nende vahel laiuvates tühimikes – asjaolu, mis omab tagasimõju Universumi geomeetria, nii et paisumise kiirenemise efekt võib olla üksnes näiline.

## **PUNKTDEFEKTIDE TEKKE KINEETIKA SI-SiO<sub>2</sub> SÜSTEEMIS JA NENDE VASTASMÕJU DEFEKTIDEGA**

---

**DANIEL KROPMAN<sup>1</sup>, TÕNU LAAS<sup>2</sup>, UNO ABRU<sup>3</sup>,  
TIIT KÄRNER<sup>4</sup>, IVO HEINMAA<sup>5</sup>, CHARALAMBOS LONDOS<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>TTÜ, <sup>2</sup>TLÜ, <sup>3</sup>Tondi Elektroonika, <sup>4</sup>TÜ, <sup>5</sup>KBFI, <sup>6</sup>Ateena Ülikool, Kreeka

Punktdefektide (PD) tihedus Si-SiO<sub>2</sub> piirpinnal sõltub oksüdeerimistingimustest. Kui lokaalne dünaamiline tasakaal PD vahel on tekkinud madalal oksüdeerimistemperatuuril või lühiajalise oksüdeerimise korral, siis viib see küllastumisele omainterstitsiaalidega ja vakantside vähesusele, samas kõrge oksüdeerimistemperatuuri või pika oksüdeerimisaja tulemuseks on küllastatus vakantsidega (V) ja interstitsiaalide (I) defitsiit. Vahepealsetel oksüdeerimistingimustel on V ja I tihedus piirpinnal ligikaudu võrdne ning jahutamisel nende vahel toimuvad rekombinatsioonid võivad nende kontsentratsioone vähendada.

Käesoleva töö eesmärgiks oli uurida PD ning lisandite vahelist vastasmõju Si-SiO<sub>2</sub> süsteemis, kasutades selleks EPR, IR ja absorptsioon-spektroskoopiat ning mõõtes objektide deformatsiooni. PD tihedust varieeriti, muutes oksüdeerimistemperatuuri, aega, jahutamiskiirust ning rakendades kõrget hüdrostaatilist rõhku. Leiti, et objektide kõverdumine kasvab või kahaneb koos P<sub>a</sub> tsentrite EPR signaali intensiivsuse muutusega, kusjuures selle sõltuvuse laad sõltub oksüdeerimistemperatuurist. 1100°C juures P<sub>a</sub> tsentrite EPR signaali intensiivsuse kasvades objektide kõverdumine kahaneb, samas 1200°C juures objektide kõverdumine ja EPR signaali intensiivsus kasvavad samaaegselt. Rakendatud välisrõhu suuruse ja defektide tiheduse vaheline seos on vastupidine. 1100°C juures rõhumine suurendab PD (VO ja VO<sub>2</sub>) tihedust, 1130° juures vähendab.



# ÜLILÜHIKESTE VALGUSIMPULSSIDE DIFRAKT- SIOON – TUTTAV PROBLEEM UUES KUUES

**PEETER PIKSARV<sup>1</sup>, HELI VALTNA-LUKNER<sup>1</sup>, MADIS LÕHMUS<sup>1</sup>,  
PEETER SAARI<sup>1</sup>, PAMELA BOWLAN<sup>2</sup>, RICK TREBINO<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>TÜ Füüsika Instituut, <sup>2</sup>Georgia Institute of Technology,  
School of Physics, Atlanta, USA

Heleda Arago-Poissoni täpi tekkimine läbipaistmatu objekti taha varju keskele on üks ilmekamaid näiteid valguse lainelistest omadustest ja valguse diffrageerumisest geomeetrilise varju piirkonda. Difraktsiooni kui nähtust on põhjalikult uuritud alates Leonardo da Vinci töödest ja selle kirjeldamine on arenenud välja küpseteks Fresneli-Kirchhoffi ja Rayleigh'-Sommerfeldi teooriateks. Peamiselt piirduetakse difraktsiooni käsitlemisel monokromaatses valguses, kuid on üllatavalt lihtne ja õpetlik kirjeldada difraktsiooni ülilühikeste, s.o femtosekundilise kestusega optiliste impulsside abil. Mõneti unustatud, alternatiivne, kuid matemaatilisel ekvivalentne difraktsiooni käsitlemine nn äärelaineteooria terminites on justkui loomulik meetod intuiitiivselt mõistmaks ülilühikeste impulsside keerulist ajalisi-ruumilist levikut [vt 1 ja viited seal].

Ruumilis-spektraalsel interferomeetrial põhinev hiljuti välja töötatud SEA TADPOLE mõõtemetoodika võimaldab otseselt mõõta keeruliste impulsslaineväljade amplituudi ja faasi mikromeetrilise ruumilise ja femtosekundilise ajalise lahutusega [2–4], sellega on justkui jäädvustatavad valgusimpulsi momentvõtted – tema lainefunktsiooni või energia aegruumilise jaotuse  $x$ - $z$  või  $x$ - $t$  lõiked. Ettekandes vaadeldakse ülilühikese impulsi difraktsiooni kolme tüüpi elementaarsel tükkel: levikul ümmarguse ketta, ava või rõngaspilu(de) taha. Mõõtmistulemusi selektatakse äärelaine difraktsiooniteooria terminites ja sellel põhinevate arvutisimulatsioonidega.

- [1] Z. L. Horváth, J. Klebniczki, G. Kurdi ja A. Kovács, *Opt. Commun.* 239, 243 (2004).
- [2] P. Bowlan, H. Valtna-Lukner, M. Lõhmus, P. Piksarv, P. Saari ja R. Trebino, *Opt. Lett.* 34, 2276 (2009).
- [3] H. Valtna-Lukner, P. Bowlan, M. Lõhmus, P. Piksarv, R. Trebino ja P. Saari, *Opt. Express* 17, 14948 (2009).

- [4] P. Bowlan, M. Lõhmus, P. Piksarv, H. Valtna-Lukner, P. Saari ja R. Trebino, arXiv:0905.4381 (2009).

## MITTEADIABAATILISUSE PROBLEEMIST VESINIKU MOLEKULI NÄITEL

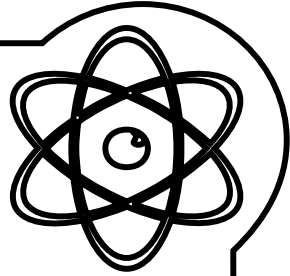
---

**MATTI SELG**

TÜ Füüsika Instituut

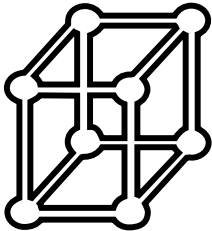
Lihtsaimat ja Universumis ülekaalukalt enimlevinud molekuli – vesiniku – pole sugugi lihtne eksperimentaalselt uurida ega otseselt detekteerida. Teisalt on tegu ideaalse kvantsüsteemiga mitmesuguste teoreetiliste meetodite arendamiseks ja testimiseks. Tõepoolest, selle lihtsaima molekuli jaoks on Borni-Oppenheimeri potentsiaal (BOP), mis eeldab tuumade liikumise statsionaarsust, nagu ka BOP-i adiabaatilised, relativistlikud ja kiiruslikud parandid, arvatavad nn esimestest printsipidest. Ainus seni veel lõplikult lahendamata probleem on mitteadiabaatilisus, mis pole täielikult taandatav üheainsa potentsiaalipinna (PP) korrigeerimisele, nii et see pind ei sõltuks uuritavast kvantseisundist endast. Vesiniku molekuli põhielektronseisundi energianivoosid nihutab „puhas“ mitteadiabaatilisus siiski vaid 0,1–0,01 meV võrra, kusjuures potentsiaalialaugu sügavus on ligi 5 eV. Järelikult pole mingit füüsikalist põhjust PP mudelist loobuda, küll aga tuleb teda pisut modifitseerida, võttes näiteks kasutusele R-sõltuvusega parandid molekuli taandatud massile.

Ettekandes tutvustatakse uut lähenemisviisi, mis võimaldab mitteadiabaatilisust käsitleda pöördprobleemina. Näidatakse, kuidas saab konstrueerida efektiivse PP, mille energianivoosid ühtivad täpselt vastavate eksperimendiandmetega. Selle pseudopotentsiaali seisundist sõltumatu osa on täpselt väljaarvutatav, lähtudes *ab initio* BOP-ist ning kasutades pöördhäiritusteooriat. Mudelit saab rakendada mistahes roovibroonsetele seisunditele. Demonstreeritakse perfektset kooskõla kõrglahutusega eksperimendiandmetega. Tähtis tulemus on pöörlemisseisundi  $J = 4$  kõrgeima eksperimentaalselt registreeritud vönkenivoo identifitseerimine. Nimelt osutub see kvaasi-seotud seisundiks asukohaga 6  $\mu\text{eV}$  ülalpool dissotsiatsiooni piiri ning elueaga 0,166 s.



**EESTI FÜÜSIKA  
SELTS**

**2009**



## **EFS AUKIRJAD JA PREEMIAD**

### **EFS AASTAPREEMIA 2009**

DIPLOM Nr 16

Eesti Füüsika Selts tunnistab oma aastapreemia vääriliseks

*Elis Heinsalu*

dokoritöö „Normal and anomalously slow diffusion under external fields“ kaitsmise eest.

Tunnustuseks annab Selts temale 2009. aasta numbrit kandva medali.

Tartus, 17. märtsil 2009. a.

EFS esimees

### **EFS ÜLIÕPILASPREEMIA 2008**

DIPLOM Nr 25

Eesti Füüsika Selts tunnistab 2008. a üliõpilaspreamia vääriliseks

*Martin Järvekülje*

avastuse eest, mis seisneb uut tüüpi rull-struktuuriga metalloksiidse sademe tekkes vedelikus ja selle nähtuse selgitamise eest.

Tartus, 17. märtsil 2009. a.

EFS esimees

**EFS AUKIRJAD 2009**

Nr 15

Eesti Füüsika Selts tunnustab aukirjaga

*Ergo Nõmmistet*

kauaaegse eduka tegutsemise eest (TÜ) Füüsika Instituudi juhtimisel.

Tartus, 17. märtsil 2009. a.

EFS esimees  
EFS aukirjakomisjoni esimees

Nr 16

Eesti Füüsika Selts tunnustab aukirjaga

*Arvo Kikast*

panuse eest Eesti Füüsika Seltsi ja Eesti füüsikakogukonna juhtimisel.

Tartus, 17. märtsil 2009. a.

EFS esimees  
EFS aukirjakomisjoni esimees

Nr 17

Eesti Füüsika Selts tunnustab aukirjaga

*Arvi Freibergi*

biofüüsika-alase teadus- ja õppetöö ellukutsumise eest Eestis ning seoses 60-nda juubeliga.

Tartus, 17. märtsil 2009. a.

EFS esimees  
EFS aukirjakomisjoni esimees

## **EFS ÕPILASPREEMIA 2009**

DIPLOM

Nr 11

Eesti Füüsika Selts tunnistab oma õpilaspreamia vääriliseks

*Riinu Otsa*

töö „Suitsujoa termilise tõusu mõju õhusaaste leviku arvutusele põlevkivielektriijaamade näitel“ eest.

Tartus, 17. märtsil 2009. a.

EFS esimees

## **TÄNUKIRI**

Eesti Füüsika Selts tänab

*Marko Kaasikut*

EFS õpilaspreamia saanud töö „Suitsujoa termilise tõusu mõju õhusaaste leviku arvutusele põlevkivielektriijaamade näitel“ (autor Riinu Ots) juhendamise eest.

Tartus, 17. märtsil 2009. a.

EFS esimees

## **EESTI FÜÜSIKA SELTSI AUKIRJAD JA PREEMIAID 1990–2009**

### **Eesti Füüsika Seltsi auliikmed**

2004: Harald Keres  
2004: Jaan Einasto  
2005: Henn Käämbre  
2006: Karl Rebane  
2008: Piret Kuusk

**Eesti Füüsika Seltsi aastapreemia**

- 1992: Enn Realo  
 1993: Rein Kaarli  
 1994: Georg Liidja  
 1995: Vladimir Hižnjakov  
 1996: Mart Elango  
 1997: Arlentin Laisaar  
 1999: Hannes Tammet  
 2000: Nikolai Kristoffel  
 2001: Ants Lõhmus  
 2002: Romi Mankin  
 2003: Viktor Peet  
 2005: Jaan Aarik  
 2006: Enn Saar  
 2007: Jaan Kalda  
 2008: ettevõtte *Laser Diagnostics Instruments* kollektiiv  
 2009: Els Heinsalu

**Eesti Füüsika Seltsi aukiri**

- 2000: Henn Voolaid; Henn Käämbre  
 2001: Jaak Kikas  
 2002: Ruth Lias  
 2004: Ülle Kikas; Jaak Lõhmus ja Rein Veskimäe  
 2005: Jaak Kikas, Koit Timpmann ja Henn Voolaid  
 2006: Kaido Reivelt; Teadusbussi kollektiiv  
 2007: Andi Hektor  
 2008: Kalev Tarkpea  
 2009: Arvi Freiberg; Arvo Kikas; Ergo Nõmmiste

**Eesti Füüsika Seltsi üliõpilaspriimium**

- 1990: David Ponetajev, Maido Selgmäe, Raul Vatsa ja Alger Vedler (TÜ)  
 1992: Madis Raukas (TÜ)  
 1993: Jüri Örd (TÜ mag) ja Priit Kärnsna (TPÜ bak)

- 1994: I preemia Viktor Tsepelin (TÜ)  
II preemia Kalmar Kumar (TPÜ)  
1995: I preemia Dmitri Nevedrov (TÜ)  
II preemia Kaido Pukk (TPÜ) ja Marko Kaasik (TÜ)  
1996: Jaan Männik (TÜ mag) ja Laur Järv (TÜ bak)  
1997: I preemia Dmitri Martila (TÜ bak)  
II preemia Astrid Haljas (TPÜ bak)  
1998: I preemia Gert Hütsi (TÜ bak),  
II preemia Ardo Agasild (TPÜ bak) ja Tanel Mullari (TÜ mag)  
1999: Margus Saal (TÜ mag)  
2001: Aleksei Krasnikov (TÜ bak), Kristjan Saal (TÜ)  
2002: Taavi Jantson (TÜ mag) ja Sergei Ššemeljov (TÜ mag)  
2004: Els Heinsalu (TÜ)  
2005: Kristjan Kannike (TÜ, KBFI)  
2006: Heli Valtna (TÜ)  
2008: Martin Järvekülg (TÜ)

### **Eesti Füüsika Seltsi üliõpilaste stendipreemia**

- 2003: Kristi Õige  
2004: Margo Plaado, Kristjan Saal ja Tanel Tätte  
2005: Lauri Aarik  
2006: Andrei Kärkkänen  
2007: Aleksander Lissovski

### **Eesti Füüsika Seltsi õpilaspreamia**

- 2005: Rivo Uibo, Rain-Eric Selli, Ülar Nurmits, Madis Liiva ja Jaan Suve  
(juh Kadri-Ly Trahv)  
2006: Jaan Suve, Rivo Uibo ja Sander Küttis (juh Kadri-Ly Trahv)  
2007: Martin Jõgi (juh Jaak Jõgi)  
2008: Kaarel Mäearu (juh Mart Kuurme)  
2009: Riinu Ots (juh Marko Kaasik)



## **EESTI FÜÜSIKA SELTSI JUHATUSE 2009. AASTA TEGEVUSARUANNE**

Traditsioonilised Eesti füüsikapäevad toimusid 17.–18.03.2008. a Tartus, TÜ Tähe 4 õppehoones. Füüsikapäevad organiseerisid Kaido Reivelt, Ilmar Kink, Jaak Jõgi ja Aigar Vaigu. Füüsikapäevade raames toimus 17. märtsil EFSi üldkogu, millel kinnitati seltsi juhatuse tegevus- ja majandusaruanne. Tööpäeva lõpetas traditsiooniline seltsiõhtu Tähe 4 kohvikus.

Füüsikapäevadel kuulutati välja EFSi aastapreemia Els Heinsalule doktoritöö „Normal and anomalously slow diffusion under external fields“ kaitsmise eest. EFSi aukirja pälvis Arvi Freiberg „biofüüsika-alase teadus- ja õppetöö ellukutsumise eest Eestis ning seoses 60-nda juubeliga“, Arvo Kikas „panuse eest Eesti Füüsika Seltsi ja Eesti füüsikakogukonna juhtimisel“ ja Ergo Nõmmiste „kauaaegse eduka tegutsemise eest (TÜ) Füüsika Instituudi juhtimisel“. EFSi õpilaspreamia omistati Riinu Otsale töö „Suitsujoa termilise tõusu mõju õhusaaste leviku arvutusele põlevkivielektriijaamade näitel“ eest (juhendaja Marko Kaasik). EFSi üliõpilaspreamia vääriliseks tunnistati Martin Järvekülg „vedelikus uut tüüpi rull-struktuuriga metalloksiidse sademe tekitamise ja selle nähtuse selgitamise eest“.

Ilmus EFSi aastaraamat 2008 (toimetajad Anna Aret, Helle Kaasik ja Piret Kuusk). EFSi listi [seltsid.efs@lists.ut.ee](mailto:seltsid.efs@lists.ut.ee) ja EFSi kodulehte ([www.fyysika.ee/efs](http://www.fyysika.ee/efs)) haldab Kaido Reivelt.

7.–8. märtsini toimunud Eesti koolinoorte 56. füüsikaolümpiaadil sai EFSi eriauhinna (ajakirja „Scientific American“ aastatellimuse) Kadi Liis Saar (10. klass, Tallinna Reaalkool/Inglise Kolledž).

Jätkusid EFSi mitmesugused füüsikat populariseerivad üritused. Taavi Adambergi vedamisel jätkas oma tööd Teadusbuss Suur Vanker, jätkus füüsikaportaali ([www.fyysika.ee](http://www.fyysika.ee)) arendamine ning ligi seitsmekümne TÜ LOTE tudengi ühise jõupingutusena korraldati järjekordsed Tähe Perepäevad Täpe 2009.

25.–27.06.2009 toimus Nõo Reaalgümnaasiumis järjekordne füüsikaõpetajate suvekool. Organiseerimise raskus oli EFSi füüsikaõpetajate osakonna juhatuse õlul ja toimus see TÜ Avatud Ülikooli egiidi all. Esinesid TÜ, TO, EMÜ, KBFI ja TTÜ teadurid. Suvekoolis osales 28 õpetajat.

13.–19. juulini korraldasime esimese TÜ teaduslaagri Kloogarannas. Osales 120 last. Juhendajateks olid TÜ LOTE üliõpilased, magistrandid

ja doktorandid. Laagris osalenud lapsed said tuttavaks füüsika, keemia ja materjaliteadusega, samuti roboti- ja raketiehitamisega ning keskkonnateemadega.

Eesti Füüsika Selts organiseeris läbi aasta GLOBE Eesti tegevust. Toimus GLOBE uurimistöõde konkurs (laekus 39 tööd), 13.–15. augustini toimus suvelaager Kloogarannas (osales 120 õpetajat ja õpilast), 25.–26. septembrini õpilaskonverents Saaremaa Ühisgümnaasiumis ning 13.–14. novembrini õpetajate seminar Tartus.

6.–7. novembrini toimus Voore Puhkekeskuses esmakordselt füüsika-õpetajate sügisseminar. Osales 103 füüsikaõpetajat, kokku oli osavõtjaid 121. Kahe päeva jooksul arutati uute füüsika õppekavadega ning füüsika-õpetajate võrgustiku arendamisega seonduvat.

Oktoobrist alates ilmub Eesti Füüsika Seltsi veebiajakiri. See on kokkuvõte EFSiga seotud kuutegemistest ja sisaldab ka ühe hiljuti ilmunud Eesti füüsiku artikli tutvustust. Kuukiri saadetakse EFSi liikmetele elektronpostiga iga kuu lõpus. EFSi (veebiajakirja) kuukirjade arhiivi saab näha siit: [www.fyysika.ee/omad/kuukiri.php](http://www.fyysika.ee/omad/kuukiri.php).

Noorfüüsikute osakonna eestvedamisel korraldati 30. oktoobrist kuni 1. novembrini Voore puhkekeskuses EFSi täppisteaduste sügiskool 2009. Osales kokku 97 tudengit, teadlast ja õppejõudu. Kuulati üle 25 tunni loenguid ja seminare. Töö toimus paralleelselt kahes auditooriumis. Teemadest käsitleti kosmose- ja nanotehnoloogiad, mittelineaarset füüsikat ja kvantmehaanikat. Organisaatoriteks olid Taavi Adamberg, Kaido Reivelt, Aigar Vaigu.

2009. a astus EFSi 49 uut liiget. EFS kuulub jätkuvalt Euroopa Füüsikaühingusse.

EFSi ettevõtmisi toetasid aastal 2009 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, Noorte Õpetajate Huviklubi (NÕHK) ja TÜ Teaduskool.

Täname kõiki toetajaid ja loodame koostöö jätkumist.

Eesti Füüsika Seltsi juhatuse liikmed:

Kaido Reivelt    Ilmar Kink    Silver Lätt    Raivo Stern

Tartus 7. veebruaril 2010. a

## AASTA PILT 2009



Füüsikaõpetajate sügisseminar Voorel, 6.–7. novembrini 2009 – 103 füüsikaõpetajat ühes ruumis koos.

### EFS LAIENDATUD JUHATUS 2009. AASTAL

**Kaido Reivelt**  
esimees

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

**Ilmar Kink**  
aseesimees

Tartu Ülikooli Füüsika Instituut, Riia 142, 51014 Tartu  
Tel/faks: +372 737 4744 / 738 3033  
E-mail: ilmar.kink@ut.ee

**Raivo Stern**  
aseesimees

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

**Silver Lätt**

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 / 741 0205  
E-mail: reinart@aai.ee

**Taavi  
Adamberg**

Tartu Ülikool, Riia 142, 51014 Tartu  
E-mail: taavi@fyysika.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**

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

## **EFS VEEBIAJAKIRI**

Oktoobrist alates ilmub Eesti Füüsika Seltsi veebiajakiri. See on kokkuvõtte EFS-iga seotud kuutegemistest ja sisaldab ka ühe hiljuti ilmunud eesti füüsika artikli tutvustust. Kuukiri saadetakse EFS liikmetele elektronpostiga iga kuu lõpus. Kuukirja toimetab Aile Tamm. EFS (veebiajakirja) kuukirjade arhiivi saab näha siit: [www.fyysika.ee/omad/kuukiri.php](http://www.fyysika.ee/omad/kuukiri.php)

**EFS UUED LIIKMED**

Tavo Ani  
Piia Burk  
Anna-Liisa Ikart  
Laur Joost  
Raavo Josepson  
Maria Kesa  
Margus Kodu  
Kristel Kosk  
Stiina Kristal  
Erik Kulu  
Urmas Kvell  
Ahti Laurisson  
Kaur Leemets  
Meeri Lembinen  
Paul Liias  
Martin Lints  
Jüri Luist  
Elo Madisson  
Sven-Erik Mändmaa  
Aune Nigol  
Rauno Nuut  
Villu Orav  
Helen Otsep  
Laur Peedu  
Alo Peets

Siim Pikker  
Indrek Pruul  
Ramon Rantsus  
Hele-Tea Riik  
Sander Rikka  
Kreete Roslender  
Ürgo Saaliste  
Mart Sokk  
Heino Soo  
Endel Soolo  
Indrek Sünter  
Aile Tamm  
Kert Tamm  
Tõnis Tiimus  
Martin Tootsi  
Jürgen Vahter  
Toomas Vahter  
Andreas Valdmann  
Martin Valgur  
Pärt Veispak  
Marili Viitak  
Jaan Viru  
Kaupo Voormansik  
Martin Vällik

## TÄPPISTEADUSTE SÜGISKOOL 2009

### MATERJALID ERINEVATELT MÄTASTELT

30. oktoobrist 1. novembrini toimus Voore Puhkekeskuses täppisteaduste sügiskool 2009. Lisainfo veebilehel [www.fyysika.ee/fyysika/nofy/](http://www.fyysika.ee/fyysika/nofy/).

#### LOENGIKAVA

##### Reede, 30. oktoober

- |               |  |
|---------------|--|
| 14.00 – 14.15 | Avasõna korraldajatelt   |
| 14.15 – 15.00 | Stefan Groote. Saksa vaatenurk kvantmehaanika arengule   |
| 15.00 – 16.15 | Indrek Saul. Kuidas tehnoloogia, matemaatika ja juhtimisteadus dieedipidaja elu kergemaks teevad |
| 16.45 – 18.15 | Jaak Kikas. Tahkiste mudelitest  |
| 18.15 – 19.00 | Taavi Adamberg. Fyysika.ee tegemistest   |

##### Laupäev, 31. oktoober

- |               |   |
|---------------|---|
| 13.00 – 14.30 | Pekka Janhunen. The electric solar wind sail: a revolutionary efficient new method for moving in the solar system                                       |
| 14.30 – 15.00 | Sini Merikallio. Moving an asteroid with electric solar wind sail   |
| 15.00 – 15.45 | Kaupo Voormansik. Kosmosetehnoloogia materjalid   |
| 16.15 – 17.15 | Massimo Tallarida. Photoemission investigations with synchrotron light: <i>In-situ</i> Atomic Layer Deposition (ALD) of oxides monitored cycle by cycle |
| 17.15 – 18.00 | Andrus Salupere. Üldine mittelineaarsus I   |
| 18.30 – 19.15 | Andrus Salupere. Üldine mittelineaarsus II ja Mittelineaarsete Protsesside Analüüsi Keskuse (CENS) tegemistest  |

##### Pühapäev, 1. november

- |               |   |
|---------------|---|
| 10.00 – 10.45 | Martin Vällik. Pseudoteadus meie igapäevases elus ja miks sellega tegelemine oluline on     |
| 10.45 – 11.15 | Kaupo Voormansik. Õppimisvõimalustest Rahvusvahelises Kosmoseülikoolis                      |
| 11.15 – 11.45 | Peeter Piksarv. Ülilühikeste optiliste impulsside difraktsioon ajalis-ruumilises käsitluses |
| 13.00         | Kohv & kokkuvõte & auhindade jagamine   |

## **EFS FÜÜSIKAÕPETAJATE SUVEKOOL 2009**

25. – 27. juunini toimus Nõos järjekordne füüsikaõpetajate suvekool.

### **LOENGIKAVA**

#### **Neljapäev, 25. juuni**

Raivo Vilu (TTÜ).

Bioloogias taas revolutsioon – sünteetiline bioloogia eeldab füüsika, keemia, informaatika ja bioloogia kooskasutamist

Kalju Annuk (TO).

Tõravere Stellaariumi külastus ja ettekanne „Teleskoopide arengutest“

#### **Reede, 26. juuni**

Anto Aasa (TÜ).

Mobilpositsioneerimise rakendamise võimalused geograafias

Kalju Erme (TO).

Päikese ja Maa suhetest

Andi Hektor (KBFI, CERN).

Kaasaegne füüsikaline pilt Universumi sünnist ja arengust ehk kas Universumis valitsevad tumedad jõud?

Argo Jõelet (TÜ).

Lained ja Maa siseehitus

#### **Laupäev, 27. juuni**

Ülle Murula (Rakvere kolleeg).

Päikesevarjutuse vaatlusest Hiinas

Koit Timpmann (TÜ).

Vernier' andmekogujad ja nende kasutusvõimalusi füüsikatundides

Jaak Jaaniste (EMÜ).

Astronoomia ülesannete seminar

## EFS FÜÜSIKAÕPETAJATE SÜGISSEMINAR 2009

6. – 7. novembrini toimus Voore Puhkekeskuses EFS füüsikaõpetajate sügisseminar. Kutsutud olid kõigi Eesti üldhariduskoolide füüsikaõpetajad. Osalejaid oli 110, neist füüsikaõpetajaid 105.

### PÄEVAKAVA

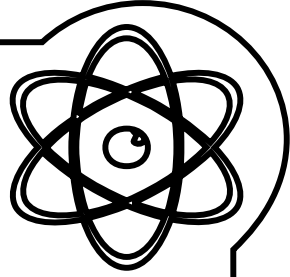
#### Reede, 6. november

- 14.00 – 14.20 Tervitused, avasõnad, EFS tegevuse tutvustus (Kaido Reivelt)
- 14.20 – 14.50 Füüsikahariduse maastik Eestis, olukord ja perspektiivid (Henn Voolaid, Karin Laansalu-Veskioja, Kaido Reivelt)
- 15.30 – 15.55 Virtuaalõpe ja 21. sajandi kool – müüdid ja tegelikkus (Kaido Reivelt, Taavi Adamberg)
- 16.00 – 18.15 Kuidas tegeleda füüsika-andekate lastega – plaanid, praktika ja eksperimendid (Eero Uustalu, Kaido Reivelt)
- 19.00 – Füüsikaõpetajate võrgustiku arendamisest, kus me oleme ja mida oleks vaja teha – ettekanne ja diskussioon, vestlusringid, seltskondlik tegevus (Kaido Reivelt, Riina Leet)

#### Laupäev, 7. november

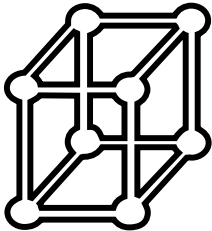
- 9.30 – 9.45 Uute põhikooli ja gümnaasiumi füüsika õppekavade koostamise lähteülesanne (Jaak Jõgi, Riina Leet, Kalev Tarkpea), 2009. a läbi viidud küsitluse tulemustest (Jaan Paaver)
- 9.45 – 10.45 Uus põhikooli õppekava – tutvustus ja diskussioon (Jaak Jõgi, Riina Leet)
- 10.45 – 11.45 Põhikooli õppekava eksperimendid (Koit Timpmann)
- 12.00 – 13.00 Uus gümnaasiumi õppekava – tutvustus ja diskussioon (Kalev Tarkpea)
- 13.00 – 14.00 Töö rühmades
- 14.00 – 14.30 Kokkuvõtted





# FÜÜSIKAKROONIKA

2009



## I. TÖÖKORRALDUS

- 5. jaan alustas tööd TÜ Füüsika Instituudi direktori ametikohal Marco Kirm ja teadusdirektori ametikohal Toomas Plank.
- 1. veebr määrati TÜ füüsika didaktika erakorralise dotsendi 0,75 ametikohale Henn Voolaid.
- 2. veebr avas Tartu Ülikooli teadusarvutuste keskus kasutajatele oma esimese arvutifarmi („aurumasina“). Uus arvutifarm on üks Eesti võimsamaid arvuteid, arvutusjõudluse teoreetiline maksimum on 840 GFlops. Arvutifarmi kasutuselevõtt loob head võimalused nende teadusvaldkondade arendamiseks, mis vajavad suurte andmemahitud töötlemist või mis kasutavad arvutusvõimsusi mitmesuguste protsesside modelleerimiseks.
- 5. veebr sõlmisid Tallinna Tehnikaülikool ja Tartu Ülikool ulatusliku koostöölepingu, soodustamaks tihedat koostööd Eesti juhtivate ülikoolide teadus- ning õppetöö valdkondades. Leping aitab kaasa teaduse ja innovatsioonialase koostöö edendamisele ning ülikoolide kompetentsi suuremale kasutamisele ühiskonnas. Esimesed sammud suurema koostöö suunas TÜ ja TTÜ vahel tehakse ühisõppekavade väljaarendamises, õppetöö infrastruktuuri ühises kasutamises, ühiste uurimisrühmade moodustamises, teadus- ja arendustöö tugisüsteemide ühiskasutuses, aga ka muudes valdkondades.
- Veebruaris asus TÜ LOTE õppeprodekaanina tööle TÜ FI kosmose- ja militaartehnoloogiate töörühma dotsent Mart Noorma. 1. maist töötab ta 0,3 koormusega TO vanemteadurina.
- 6. aprillil lõppes TO direktori Laurits Leedjärve töölepingu tähtaeg. Kuna varem välja kuulutatud avalikul konkursil ühtegi avaldust direktori kohale ei laekunud, kuulutas teadusnõukogu konkursi nurjunuks ja palus Haridus- ja Teadusministeeriumil pikendada Laurits Leedjärve töölepingut veel üheks aastaks.
- 19. juuni istungil valiti TÜ nõukogus elektronspektroskoopia professoriks Ergo Nõmmiste, kondensaine teooria professoriks Teet Örd ning tahkisetehnoloogia teooria professoriks Jaan Aarik, kes kõik töötavad TÜ FI koosseisus.
- 1. oktoobrist töötavad Tartu Observatooriumis teadurina Aivo Reinart ja vanemteadurina Jan Pisek. Jan Pisek on Tšehhi kodanik, kes tuli TO külalisteadlaseks Torontost.

- 12. okt lõppesid KBFi nõukogu esimehe akad Mart Saarma volitused. Nõukogu uueks esimeheks valiti EV kaitseminister akad Jaak Aaviksoo.
- 14. okt toimunud Eesti Teaduste Akadeemia üldkogu istungil valiti akadeemikuks täppisteaduste alal Arvi Freiberg, Tartu Ülikooli biofüüsika ja taimefüsioloogia professor, TÜ Füüsika Instituudi biofüüsika osakonna juhataja. Eesti Teaduste Akadeemia medali said dr Helle Martinson ning akadeemikud Vladimir Hižnjakov ja Jaak Järv.
- 1. novembrist on EstSpace'i teadlasena Tartu Observatooriumis tööl Gert Hütsi.
- 2009. aastal valiti TÜ FI vanemteaduriteks Stefan Groote ja Laur Järv (teoreetiline füüsika), Madis Kiisk, Viktor Palm ja Rein Ruus (tahkisefüüsika), Teet Uustare (pinnafüüsika), Hugo Mändar (röntgenstruktuuranalüüs), Margus Rätsep (optika ja spektroskoopia); teaduriteks Tanel Tätte (materjaliteadus), Valter Kiisk (optika ja spektroskoopia), Kristjan Leiger (tahkisefüüsika); assistentideks Lennart Neiman (optika ja spektroskoopia), Ott Krikmann (füüsika didaktika); lektoriteks Jaan Susi (füüsika didaktika) ja Enn Pärtel (füüsika didaktika, asus tööle 0,5 koormusega).
- TO atmosfäärifüüsika osakonna vanemteaduri Matti Möttöse tööleping on 1. juulist peatatud, ta töötab praegu Soomes. 31. augustil soovis sama osakonna järel doktor Abdelaziz Kallel oma töölepingu ennetähtaegselt lõpetada, sest ta valiti oma kodumaal Tuneesias professoriks.

## II. VÄITEKIRJADE KAITSMINE

### Doktoritööd

#### Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi nõukogu

- 15. mail kaitses **Erko Jakobson** doktoritöö „Spatial and temporal variability of atmospheric column humidity“ (Atmosfääri niiskussisalduse ajalis-ruumiline muutlikkus) PhD kraadi saamiseks keskonnafüüsika erialal. Juhendaja dots Hanno Ohvril (TÜ FI). Oponentid dr Kalju Eerme (TO) ja prof Francisco José Olmo Reyes (Granada Ülikool, Hispaania).

- 5. juunil kaitses **Anna Aret** doktoritöö „Evolutionary separation of mercury isotopes in atmospheres of chemically peculiar stars“ (Elavhõbeda isotoopide lahknemiskulg keemiliselt pekuliaarsete tähtede atmosfäärides) PhD kraadi saamiseks astrofüüsika erialal. Juhendaja prof Arved-Ervin Sapar (TO). Oponendid dr habil Gražina Tautvaišienė (Vilniuse Ülikool, Leedu) ja dr Jiří Kubát (Tšehhi Vabariigi TA Astronoomiainstituut).
- 18. septembril kaitses **Kalle Kepler** doktoritöö „Optimisation of patient doses and image quality in diagnostic radiology“ (Patsiendi kiirgusdoozi ja pildi kvaliteedi optimeerimine diagnostilises radioloogias) PhD kraadi saamiseks rakendusfüüsika erialal. Juhendaja prof Antti Servomaa (TÜ külalisprof). Oponendid dots Miika Nieminen (Oulu Ülikool, Soome) ja dr Eduard Gerškevič (Põhja-Eesti Regionaalhaigla).
- 30. oktoobril kaitses **Jüri Raud** doktoritöö „Study of negative glow and positive column regions of capillary HF discharge“ (Kõrgsagedusliku kapillaarlahenduse negatiivse helenduse ja positiivse samba uurimine) PhD kraadi saamiseks optika ja spektroskoopia erialal. Juhendaja dots Matti Laan (TÜ). Oponendid dr Boris Krölov (Vavilovi nim Riiklik Optikainstituut, Venemaa) ja emeriitprof Ülo Ugaste (TLÜ).

### **Tartu Ülikooli loodus- ja tehnoloogiateaduskonna teiste instituutide nõukogud**

- 25. juunil kaitses **Jaanus Eskusson** doktoritöö „Synthesis and characterization of the diamond-like carbon thin films prepared by pulsed laser deposition method“ (Õhukeste teemandisarnaste süsinikkilede süntees impulsslaser-sadestus meetodil ja nende karakteriseerimine) PhD kraadi saamiseks füüsikalise ja elektrokeemia erialal. Juhendajad prof Enn Lust (TÜ KI) ja vanemteadur Raivo Jaaniso (TÜ FI). Oponent prof Lauri Niinistö (Helsinki Tehnikaülikool).
- 25. juunil kaitses **Indrek Kivi** doktoritöö „Synthesis and electrochemical characterization of porous cathode materials for intermediate temperature solid oxide fuel cells“ (Tahkeoksiidkütuselemendi poorse katoodimaterjali süntees ja elektrokeemiline analüüs) PhD kraadi saamiseks füüsikalise ja elektrokeemia erialal. Juhendajad prof Enn Lust (TÜ KI) ja teadur Gunnar Nurk (EMPA, Šveitsi riiklik materjaliteaduse ja tehnoloogia instituut). Oponent prof Lauri Niinistö (Helsinki Tehnikaülikool).

- 25. augustil kaitses **Elar Põldvere** doktoritöö „Removal of organic material, nitrogen and phosphorus from wastewater in hybrid sub-surface flow constructed wetlands“ (Orgaaniliste ainete, lämmastiku ja fosfori ärastamine reoveest hübriidsetes pinnasfilterüsteemides) PhD kraadi saamiseks keskkonnatehnoloogia erialal. Juhendaja prof Ülo Mander (TÜ ÖMI). Oponent assoc. prof Karin S. Tonderski (Linköpingi Ülikool, Rootsi).
- 28. augustil kaitses **Marko Lätt** doktoritöö „Carbide derived microporous carbon and electrical double layer capacitors“ (Karbiidne mikropoorne süsinik ja elektrilise kaksikkihi kondensaatorid) PhD kraadi saamiseks füüsikalise ja elektrokeemia erialal. Juhendajad vanemteadur Alar Jänes (TÜ KI) ja prof Enn Lust (TÜ KI). Oponent dr Kyösty Kontturi (Helsingi Tehnikaülikool).
- 8. septembril kaitses **Klaara Kask** doktoritöö „A study of science teacher development towards open inquiry teaching through an intervention programme“ (Loodusainete õpetajate uurimusliku õppe läbiviimise kompetentsuste areng teoreetiliselt põhjendatud koostusprogrammi raames) PhD kraadi saamiseks loodusteadusliku hariduse erialal. Juhendaja prof Miia Rannikmäe (TÜ LOTE). Oponent prof Avi Hofstein (Iisraeli Weizmanni Instituut).
- 22. septembril kaitses **Aleksander Trummal** doktoritöö „Computational study of structural and solvent effects on acidities of some Brönsted acids“ PhD kraadi saamiseks füüsikalise ja analüütilise keemia erialal. Juhendajad prof Ilmar Koppel (TÜ KI), prof Peeter Burk (TÜ KI) ja akad Endel Lippmaa (KBF1). Oponentid prof Jean-François Gal (Université de Nice) ja prof Margus Lopp (TTÜ).

### TTÜ doktoritööde kaitsmiskomisjonid

- 15. mail kaitses **Lauri Ilison** doktoritöö „Solitons and solitary waves in hierarchical Korteweg-de Vries type systems“ (Solitonid ja üksiklained hierarhilistes Kortewegi-de Vriesi tüüpi süsteemides). Juhendaja Andrus Salupere (TTÜ KübI). Oponentid prof Alexey V. Porubov (Venemaa Teaduste Akadeemia A.F. Joffe nim Füüsika-Tehnika Instituut, Sankt-Peterburg) ja prof Henrik Kalisch (Bergeni Ülikool, Norra).
- 21. aug kaitses **Andres Kask** doktoritöö „Lithohydrodynamic processes in the Tallinn Bay area“ (Litohüdrodünaamilised protsessid Tal-

linna lahe piirkonnas). Juhendaja prof Tarmo Soomere (TTÜ KübI). Oponendid prof Jan Harff (Szczecini ülikool) ja akad Anto Raukas (TTÜ Geoloogia Instituut).

- 2. okt kaitses **Loreta Kelpšaitė** doktoritöö „Changing properties of wind waves and vessel wakes on the eastern coast of the Baltic Sea“ (Tuulelainete režiimi ja laevalainete omaduste muutused Läänemere idarannikul). Juhendajad prof Tarmo Soomere (TTÜ KübI) ja prof Irene Lill (TTÜ ehitustehnoloogia õppetool). Oponendid dr Sergei Badulin (Venemaa Teaduste Akadeemia Okeanoloogia Instituut, Moskva) ja dr Are Kont (TLÜ Ökoloogia Instituut).
- 8. okt kaitses **Dmitry Kurennoy** doktoritöö „Analysis of the properties of fast ferry wakes in the context of coastal management“ (Kiir-laevalainete omaduste analüüs rannikualade haldamise kontekstis). Juhendajad prof Tarmo Soomere (TTÜ KübI) ja dr Ira Didenkulova (TTÜ KübI). Oponendid dr Boriss Tšubarenko (Venemaa Teaduste Akadeemia Okeanoloogia Instituut, Kaliningrad) ja dr Robert Aps (TÜ Eesti Mereinstituut).
- 8. dets kaitses **Veljo Sinivee** doktoritöö „Portatiivne ioniseeriva kiirguse spektromeeter Gammamapper“ (Portable spectrometer for ionizing radiation Gammamapper) PhD kraadi saamiseks. Juhendaja prof Rein-Karl Loide (TTÜ füüsikainstituut). Oponendid dr Madis Kiisk (TÜ FI) ja dr phys Alberts Kristins (Läti Ülikool).

### TLÜ Loodusteaduste doktorinõukogu

- **Marian Paduch** kaitses doktoritöö „The diagnostics problems at implementation of plasma focus technique in material and environmental sciences“ (Diagnostikaprobleemid plasma-fookus-tehnika rakendamisel materjali- ja keskkonnateadustes) PhD kraadi saamiseks ökoloogia erialal. Juhendaja emeriitprof Ülo Ugaste (TLÜ). Oponendid dots Matti Laan (TÜ) ja vanemteadur Tõnu Laas (TLÜ).

## III. ÕPPETÖÖ

- Tartu Ülikooli doktoriõppesse võeti:
  - füüsika erialal: Siim Pikker, Peeter Piksarv, Tiit Sepp, Aigar Vaigu, Taavi Vaikjärv, Kadri Veende, Hardi Veermäe;

- materjaliteaduse erialal: Jekaterina Kozlova (Kapšai), Kertriin Paa-bo, Kadi Tamm;
- keskkonnatehnoloogia erialal: Aleksander Gorlach, Madli Kopti, Jens-Konrad Preem, Margit Prüssel, Merlin Raud, Ergo Rikmann, Siiri Suursoo, Ivar Zekker;
- tehnika ja tehnoloogia erialal: Gaily Kivi, Indrek Must, Tormi Rein-son, Julia Suhorutšenko, Rauno Temmer, Reigo Timm, Kiira Trus-sova, Mart Ustav, Margus Valge, Veiko Voolaid, Liane Ülper;
- loodusteadusliku hariduse erialal: Aveliis Post, Marlen Tärkla;
- molekulaartehnoloogia erialal: Geven Piir.
- Tartu Ülikooli Füüsika Instituut korraldab bakalaureuse- ja magist-riõpet kolme programmi järgi: füüsika (programmijuht dots Kalev Tarkpea), arvutitehnika (programmijuht mag Karl Kruusamäe) ja materjaliteadus (programmijuht PhD Hele Siimon).
- Tartu Ülikooli 3-a bakalaureuseõppe lõpetasid:
  - füüsika erialal: Mihkel Heidelberg, Marti Jeltsov, Lauri Kaldamäe, Glen Kelp, Raul Laasner, Jaan Laur, Ardi Lääne, Madis Metsalu, Marek Oja – *cum laude*, Villu Orav, Kaja Pae – *cum laude*, Reijo Pe-gonen – *cum laude*, Priit Priimägi, Ott Rebane – *cum laude*, Bruno Strandberg, Nadežda Žitluhhina, Siim Tolk, Magnus Truupöld, Si-mon Vigonski, Mikk Viidebaum;
  - materjaliteaduse erialal: Friedrich Kaasik, Tauno Kahro, Triin Kan-gur, Maido Merisalu, Marko Part, Ivo Romet, Aigi Salundi, Kristjan Saul, Kadi Seil, Riivo Selgis, Reimo Soosaar, Kathriin Utt, Meeri Vis-napuu;
  - keskkonnatehnoloogia erialal: Meeli Alber, Birgit Aru, Elar Asuküll, Kristiina Ehapalu, Ingrid Grigorjeva, Kristina Ivatševa, Laura Jakob-son, Tanel Jäppinen, Järvi Järveoja, Katri Kalda, Aimar Kivirüüt, Mee-lis Kosk, Ivo Krustok, Ele Kuusk, Airiin Laaneväli, Karin Lassmann, Aleksandr Latin, Toomas Lepplaan, Martin Ligi, Rene Mets, Mari Müür, Keili Ojaste, Kristjan Oopkaup, Margot Paavel, Marge Parek, Birgit Penjam, Eero Piirisalu, Maanus Puskar, Kalev Päädam, Laura Randmaa, Kadri Raus, Martin Ruul, Marit Sall, Alar Saluste, Teele Sildvee – *cum laude*, Liis Zukker, Merilin Talumaa, Sille Tammik, Tau-ri Tampuu, Terje Tomson, Sirle Trestip, Helene Urva, Kaisa Vent;
  - infotehnoloogia erialal: Heigo Bachmann, Sergei Jeldõšev, Siim Kallson, Urmas Kvell, Meelis Mikker, Erki Märks, Andrei Rožin, Keit Tehvan.

- Tartu Ülikooli loodus- ja tehnoloogiateaduskonna magistriõppe (3+2) lõpetasid:
  - loodusteaduse magister: Diana Enkeli (heitmete tehnoloogia), Veronika Grezeva (ökotehnoloogia), Raili Hansen (ökotehnoloogia), Kätlin Hein (rakendusfüüsika) – *cum laude*, Helen Heintalu (heitmete tehnoloogia), Andres Hunt (rakendusfüüsika), Kaisa Kesarnurm (keskkonnaseire tehnoloogia), Reet Kivisild (ökotehnoloogia), Kaspar Kolberg (heitmete tehnoloogia) – *cum laude*, Oleg Košik (teoreetiline füüsika) – *cum laude*, Mihkel Kree (teoreetiline füüsika) – *cum laude*, Ivar Kruusenberg (molekulaartehnoloogia) – *cum laude*, Noela Kulm (heitmete tehnoloogia) – *cum laude*, Heisi Kurig (füüsikaline ja elektrokeemia) – *cum laude*, Ann Laheäär (füüsikaline ja elektrokeemia) – *cum laude*, Roman Lilleorg (analüütiline ja füüsikaline keemia) – *cum laude*, Egle Loid (füüsikaõpetaja), Mario Mustasaar (geotehnoloogia) – *cum laude*, Ülle Napa (ökotehnoloogia), Liina Nurk (heitmete tehnoloogia), Geven Piir (molekulaartehnoloogia), Siim Pikker (rakendusfüüsika), Peeter Piksarv (optika ja spektroskoopia), Margit Prüssel (keskkonnaseire tehnoloogia) – *cum laude*, Elin Raamat (analüütiline ja füüsikaline keemia) – *cum laude*, Merlin Raud (heitmete tehnoloogia) – *cum laude*, Ramon Reimets (ökotehnoloogia), Riho Reinthal (füüsika), Tiit Sepp (teoreetiline füüsika), Siiri Suursoo (keskkonnaseire tehnoloogia) – *cum laude*, Ivar Zekker (heitmete tehnoloogia), Anu Trumm (heitmete tehnoloogia), Kerli Tõnurist (füüsikaline ja elektrokeemia) – *cum laude*, Kersti Vaarmets (füüsikaline ja elektrokeemia), Aigar Vaigu (teoreetiline füüsika) – *cum laude*, Taavi Vaikjärv (füüsikaõpetaja), Kadri Veende (teoreetiline füüsika), Hardi Veermäe (teoreetiline füüsika) – *cum laude*, Annika Veske (geotehnoloogia);
  - magister scientiarum: Alar Jantsikene (keskkonnatehnoloogia);
  - tehnikateaduse magister: Ragne Auling (rakenduslik mõõteteadus), Margus Eller (infotehnoloogia), Ljubov Feklistova (infotehnoloogia) – *cum laude*, Pavel Kanarjov (füüsikaline materjalitehnoloogia), Siim Kinnas (füüsikaline materjalitehnoloogia), Kristjan Kunnus (füüsikaline materjalitehnoloogia) – *cum laude*, Indrek Must (füüsikaline materjalitehnoloogia) – *cum laude*, Margus Rossin (infotehnoloogia), Kadi Tamm (keemiline materjalitehnoloogia) – *cum laude*, Anu Teearu (keemiline materjalitehnoloogia) – *cum laude*, Kaupo Voormansik (infotehnoloogia) – *cum laude*.



- TÜ magistriõppesse võeti füüsikaõpetaja erialal Hille Kesa ja Tatjana Kippar.
- Tallinna Ülikooli füüsika doktorandid: Jaanis Priimets (juh Ülo Ugas- te), Anna Šeletski (juh Anne Tali), Tarmo Metsmägi (juh Andi Kivi- nuk), Natalja Timohhina (juh Valdur Saks), Katrin Laas (juh Romi Mankin), Veroonika Pelõhh (juh Tõnu Laas).
- TLÜ Matemaatika ja Loodusteaduste Instituudis on ökoloogia erialal doktorantuuris Erkki Soika (juh Romi Mankin).
- TLÜ magistrandid:
  - füüsika erialal: Piret Avila (juh dots Astrid Rekker)
  - füüsikaõpetaja erialal: Kalle Kebbinau (juh Tõnu Laas), Andrus Niitenberg (juh Tõnu Laas), Kelli Valk (juh Anneli Roode), Kristi Koosa (juh Anneli Roode).
- TLÜ bakalaureuseõppes lõpetasid füüsika erialal Piret Avila, Evgeni Nikolaevski ja Liisa Lokke.
- TLÜ füüsikaõpetaja magistriõppekava nõukogu ees kaitses Marin Grüning magistritöö „Tõõlehtede koostamine füüsikas katsete soori- tamiseks IT-vahendite abil“ magistrikraadi saamiseks füüsikaõpetaja erialal. Juhendaja van.teadur Tõnu Laas (TLÜ), oponent lektor Anneli Roode (TLÜ).
- Tallinna Tehnikaülikooli tehnilise füüsika õppekavad viidi üle Euroo- pa ainepunktisüsteemile (ECTS).
- TTÜ füüsikainstituudis õppisid:
  - tehnilise füüsika doktorantuuris: Veljo Sinivee (juh prof R.-K. Loi- de), Mario Mars (juh van.teadur V. Harvig), Himani Khanduri (juh KBFI vanemteadur Raivo Stern ja prof Jüri Krustok), Tõnis Oja (juh prof R.-K. Loide), Jaak Toomela (juh dots M. Klopov), Reio Põder (juh KBFI vanemteadur Juhan Subbi ja dots Pavel Suurvarik);
  - tehnilise füüsika magistrantuuris:
    - \* (4+2 õppekaval) Ahto Kuusk (juh dots M. Klopov);
    - \* (3+2 õppekaval) Aleksandr Graf, Ahti Bloom, Irina Jelissejeva, Andres Kaalep, Kaspar Kaarlep, Dmitri Kartofelev, Erkki Kask, Maria Kesa, Kaspar Kevvai, Kristi Kibuvits, Erki Kärber, Lauri Laanmets, Martin Laasmaa, Indrek Mandre, Merike Martsepp, Marion Murumaa, Egris Möttus, Margo Müller, Radu Prekup, Reio Põder, Aet Põldma, Taavi Raadik, Rait Rand, Styna Rand- maa, Joonas Rihma, Margit Rästas, Ivan Sertakov, Päivo Simson, Andres Sokk, Rait Valksaare ja Richard Villenberg.

- TTÜ tehnilise füüsika magistriõppe (3+2) lõpetasid loodusteaduse magistri kraadiga tehnilise füüsika erialal Dmitri Kartofelev, Erki Kärber, Martin Laasmaa, Egris Mõttus, Reio Põder, Taavi Raadik ja Andres Kaalep.
- TTÜ tehnilise füüsika õppekava lõpetasid loodusteaduste bakalaureuse kraadiga tehnilise füüsika erialal Karl Erlenheim, Aleksandr Graf, Kaspar Kaarlep, Lauri Laanmets ja Richard Villenberg.
- 2009./10. õppeaastal alustas tööd TÜ ja TTÜ doktorikool „Funktsionaalsed materjalid ja tehnoloogiad“. Immatricleeriti 113 doktoranti, neist 61 TÜst ja 52 TTÜst.
- Haridus- ja teadusminister premeeris üliõpilaste teadustööde riiklikul konkursil 2009 järgmisi füüsikaga seotud tööde autoreid:
  - rakenduskõrgharidusõppe ja bakalaureuseõppe üliõpilaste astmes:
    - \* I preemia (15000.- EEK) Mihkel Pajusalu (Tartu Ülikool), konkursitöö „Elektron-foonon vastasmõju kloriini lisandiga madalatemperatuursetes klaasid“ eest;
    - \* II preemia (10000.- EEK) Marko Vainu (Tallinna Ülikool), konkursitöö „Järvede veebilansi modelleerimine ja selle rakendamine paleoklimatoloogias Väike-Juusa ja Kužu järvede näitel“ eest;
    - \* III preemia (5000.- EEK) Jürgen Jänes (Tartu Ülikool), konkursitöö „Emissioonijoontega tähtede tuvastamine Gaia kosmoteleskoobi andmetest“ eest;
    - \* Diplomid: Heiki Erikson (TÜ), Jekaterina Mazina (TTÜ), Kaja Pae (TÜ);
  - magistriõppe üliõpilaste astmes:
    - \* I preemia (25000.- EEK) Ivar Kruusenberg (Tartu Ülikool), konkursitöö „Hapniku elektrokeemiline redutseerumine süsiniku nanomaterjalidega modifitseeritud elektroodidel“ eest;
    - \* I preemia (25000.- EEK) Ann Laheäär (Tartu Ülikool), konkursitöö „Kolmekomponentne elektrolüüt suure võimsustihedusega elektrilise kaksikkihi kondensaatoritele“ eest;
    - \* III preemia (10000.- EEK) Mihkel Kree (Tartu Ülikool), konkursitöö „Vedela joone fraktaalsed omadused ja punktallika segunemine turbulentses väljas“ eest;
    - \* III preemia (10000.- EEK) Mario Mustasaar (Tartu Ülikool), konkursitöö „Georadari peegelduste korreleerimine kivimi füüsi-

- kaliste omadustega ning radari kasutusvõimalustest pinnakatte paksuse uuringutel: Võhmuta lubjakivimaardla“ eest;
- \* III preemia (10000.- EEK) Nelli Norit (Tallinna Tehnikaülikool), konkursitöö „Keskonnaparametrite ajalis-ruumiline muutlikkus laia estuaari pinnakihis kevadperioodil (*Ferrybox* andmete põhjal Soome lahes)“ eest;
  - \* Diplomid: Kelli Hanschmidt (TÜ), Peeter Piksarv (TÜ), Kerli Tõnurist (TÜ);
  - doktoriõppe üliõpilaste astmes:
    - \* III preemia (10000.- EEK) Lauri Ilison (Tallinna Tehnikaülikool), konkursitöö „Solitonid ja üksiklained Kortewegi-de Vriesi tüüpi süsteemides“ eest;
    - \* Diplomid: Kalle Kepler (TÜ), Madis Ratasseppe (TTÜ), Mai Uibu (TTÜ).
  - Eesti Teaduste Akadeemia üliõpilastööde konkursi füüsikaga seotud töödest said I auhinna 10000.- krooni:
    - \* Peeter Piksarv (TÜ), magistratöö „Ülilühikesed optilised impulsid difraktsiooni äärelaineteoorias ja nende eksperimentaalne registreerimine“ (juh akad Peeter Saari, Heli Lukner, MSc, Kaido Reivelt, PhD);
    - \* Veera Žukova (TTÜ), magistratöö „Eesti rannikujaamade võimalused meretuule hindamisel“ (juh prof Sirje Keevallik).
  - II auhinna 5000.- krooni said:
    - \* Jürgen Jänes (TÜ) bakalaureusetöö „Emissioonijoontega tähtede tuvastamine Gaia kosmoseteleskoobi andmetest“ (inglise keeles; juhendajad Sven Laur, PhD, Indrek Kolka, PhD);
    - \* Indrek Must (TÜ), magistratöö „EAP täituri lineaarne modelleerimine suurte paindenurkade korral“ (juhendaja Mart Anton, PhD);
    - \* Kaja Pae (TÜ), bakalaureusetöö „Elektronsiirded tugeva vibrooninteraktsiooniga sümmeetrilistes süsteemides“ (juhendaja akad Vladimir Hižnjakov);
    - \* Inga Zaitseva-Pärnaste (TTÜ) magistratöö „Lainetuse pikaajaline muutlikkus Eesti rannavetes“ (inglise keeles, juhendaja akad Tarmo Soomere).
  - TÜ Füüsika Instituudi 2009. aasta tudengistipendiumi konkursil kandideeris 40 000 kroonise stipendiumifondi jagamisele 10 bakalaureuseastme üliõpilast ja 5 magistranti. Parimad bakalaureuse-

tudengid olid Raul Laasner (juhendaja Vitali Nagirnõi), Marek Oja (juhendajad Marco Kirm ja Eduard Feldbach) ning Reijo Pegonen (juhendaja Kaido Reivelt). Parimad magistrandid olid Urmas Joost (juhendaja Vambola Kisand), Kristjan Kunnus (juhendajad Eduard Feldbach ja Marco Kirm) ning Siim Pikker (juhendaja Rünno Lõhmus).

- Skype'i ja Eesti Infotehnoloogia Sihtasutuse (EITSA) koostöös väljaantava 100 000 krooni suuruse magistristipendiumi pälvis 2009. aastal Aire Olesk, kes jätkab õpinguid Sydney's New South Wales'i ülikoolis navigatsiooni ja positsioneerimise erialal.
- 21. septembril määras Tartu Observatooriumi teaduslik nõukogu Ernst Julius Öpiku nimelised stipendiumid Tartu Ülikooli magistrandile Jaan Laurile ja Tartu Ülikooli doktorandile Lauri Juhan Liivamäele. Juhan Rossi nimelise stipendiumi sai Tartu Ülikooli doktorant Margit Prüssel.

## IV. TEADUSÜRITUSED EESTIS

- 17.–18. märtsil toimusid Tartus TÜ füüsikahoone suures auditooriumis (Tähe 4–160) XXXIX Eesti füüsikapäevad ja XXXI füüsikaõpetajate päevad. Suulisi ettekandeid oli 20, stendiettekandeid 21, osalejaid ligi 200. Traditsiooniliselt kuulusid füüsikapäevade programmi meie füüsikute viimase aja uurimistulemusi tutvustavad ettekanded. Lisaks sellele arutati füüsika ja füüsikaharidusega seonduvaid probleeme ning esitleti EFS auliikme Harald Kerese elulooraamatut „Sajandi seiklused“. Füüsikapäevade ajal toimusid ka EFS juhatuse koosolek ja üldkogu. Füüsikapäevade korraldustoimkond: Ilmar Kink, Jaak Jõgi, Kaido Reivelt.
- 19. ja 26. märtsil toimus TÜ FI saalis 2008. a lõppenud ETF grante tutvustav seminar. Pooltunnise ettekandega tutvustati iga grandit teadustulemusi. Kokku oli esitlusel 14 granti, sealhulgas 3 järeldoktori granti.
- 27. märtsil toimus Tõraveres kaugeire doktorantide seminar.
- 2.–3. apr korraldas TO atmosfääri seire töörühm EstSpacE'i toetusel Pärnus Põhjamaade Osoonigrupi (NOG) aastakoosoleku. Osavõtjaid oli Eestist, Soomest, Norrast, Rootsist, Taanist, Poolast ja Kreekast, kokku 25 teadlast, kes kahe päeva jooksul esitasid 21 ettekannet.

- 16.–18. apr toimus Tallinnas M. Noorma eestvõttel tudengisatelliidi EstCube kolmas töönoupidamine. EstCube-1 missiooniks on esmakordselt katsetada elektrilise päikesepurje teostamist võimaldavat tehnoloogiat avakosmoses. Elektriline päikesepurje on leiutatud Soome Meteoroloogainstituudis (FMI) 2006. aastal ning see võimaldab kiiret ja odavat planeetidevahelist transporti Päikesesüsteemis. Nõupidamisel osales ja esines ettekannetega päikesepurje leiutaja Pekka Janhunen (FMI), kes on ka EstSpace'i nõuandva kogu liige. EstCube-1 missiooni väljatöötamine käib Eesti Tudengisatelliidi meeskonna, FMI ja teiste Euroopa partnerite koostöös. Eesti Tudengisatelliidi programmis osalevad Tartu Ülikooli, Tallinna Tehnikaülikooli ning Eesti Lennuakadeemia tudengid. EstCube-1 projektijuht on Silver Läht. Lisainfo [www.estcube.eu](http://www.estcube.eu)
- 17. apr tutvustas Eesti Tudengisatelliidi meeskond satelliidi EstCube-1 missiooni Ettevõtluse Arendamise Sihtasutuses.
- 13. mail toimus Tartus Eesti–Hollandi ühisseminar „Vee kvaliteedi hindamine kasutades kaug- ja lähiseire meetodeid“.
- 25.–28. maini organiseeris M. Möttus (TO) Tartus Eesti–Soome taimkatte kaugseire seminari, milles osales 17 teadlast.
- 3.–4. juunini toimus Pärnus hotellis Strand assotsiatsiooni Euratom-Tekes aastaseminar, millest võtsid osa Euroopa termotuumaenergia programmis osalevad Soome ja Eesti teadlased. Eesti poolt oli kavvas kaks ettekannet, autoriteks TÜ FI teadlased Marco Kirm ja Matti Laan.
- 1.–3. juulini korraldas EstSpace'i meeskond Tartus rahvusvahelise suvekooli, kus üliõpilastele ja teadlastele tutvustati suurte kosmiliste taevaülevaadete ja andmebaaside kasutamist. Käsitleti ka teaduslike artiklite kirjutamise põhitõdesid. Osalesid 41 tudengit ja teadlast 7st riigist.
- 17.–21. aug toimus Tallinna Tehnikaülikooli peahoones VII Läänemere Teaduste Kongress. Kongressil osales ligi 300 osavõtjat 13 riigist ja seda korraldasid koostöös Tallinna Tehnikaülikool ning Tartu Ülikool. Seoses kongressi toimumisega korraldas 20.–21. aug EstSpace projekti koordinaator A. Reinart (TO) Tallinnas rahvusvahelise nõupidamise vee kaugseirest ja optikast Läänemere spetsiifilistes tingimustes „Remote Sensing and Water Optics Specifically for Baltic Sea Conditions“. Vahetult pärast nõupidamist toimus 22.–23. aug seiretarkvara BEAM kasutamise kursus.

- 18. aug toimus Teaduste Akadeemia saalis (Tallinn, Kohtu 6) seminar „Globaalsete süsteemide dünaamika perspektiivid“. Vt [wavelab.ioc.ee/gsd-workshop](http://wavelab.ioc.ee/gsd-workshop)
- 5.-7. okt toimus Tallinnas rahvusvaheline konverents *Complexity of Non-linear Waves*. Konverentsi põhikorraldajateks olid A. Berezovski ja T. Soomere TTÜ Küberneetika Instituudist. Konverentsil osales 43 teadlast 12 riigist, kes esitasid 33 ettekannet, mis olid peamiselt pühendatud keerukate dünaamiliste protsesside, eeskätt lainelevi matemaatilisele modelleerimisele. Eesti teadlased esitasid konverentsil 12 ettekannet. Konverentsiga märgiti ühtlasi Mittelineaarsete protsesside uurimise keskuse (CENS) tegetsemise 10. aastapäeva ja selle juhi Jüri Engelbrechti 70. juubelit.
- 9. okt toimus Tallinnas TTÜ matemaatika-loodusteaduskonna teine teaduskonverents. Sõna said nii füüsikud, keemikud, bioloogid kui ka matemaatikud. Konverentsi eesmärgiks oli anda ülevaade kogu TTÜ matemaatika-loodusteaduskonna laialdasest teadustegevusest.
- 29. okt-1. nov toimus Voore Puhkekeskuses M. Noorma korraldamis- lal tudengisatelliidi EstCube neljas töönõupidamine. Osavõtjaid oli 20 kolmest riigist. Taas osales EstSpace'i nõuandva kogu liige Pekka Janhunen, kes selle visiidi raames külastas ka Tartu Observatooriumi Tõraveres, kus seoses sellega korraldati EstSpace projekti arengut käsitlev nõupidamine.
- 30. okt-1. nov toimus Voore Puhkekeskuses EFS täppisteaduste sügis- kool pealkirjaga „Materjalid erinevatelt mätastelt“. Ettekannete tee- madeks olid kvantmehaanika, tahkiste mudelid, kosmosetehnoloogia, mittelineaarsus jt. Osalejaid oli 75. Korraldasid Kaido Reivelt, Aigar Vaigu ja Taavi Adamberg. Täpsem info [www.fysika.ee/fysika/nofy/](http://www.fysika.ee/fysika/nofy/)
- 5. nov toimus Keskkonnaministeeriumi Info- ja Tehnokeskuses õhusei- rele pühendatud Seirefoorum 2009, kus tutvustati õhuseire olemust, uu- rimismeetodeid, aga ka aktuaalseid keskkonnaküsimusi õhuseire vallas.
- 6.-7. nov toimus Voore Puhkekeskuses EFS füüsikaõpetajate sügis- seminar. Kutsutud olid Eesti kõikide üldhariduskoolide füüsikaõpe- tajad. Osalejaid oli 110, neist füüsikaõpetajaid 105. Teemadeks olid füüsikahariduse olukord, virtuaalõpe, füüsika-andekate lastega tege- lemine, füüsikaõpetajate võrgustik ja uued õppekavad. Seminari kor- raldasid Kaido Reivelt, Riina Leet ja Henn Voolaid.
- 14. nov toimus TTÜ Energeetikamajas TTÜ energeetikateaduskonna üliõpilasnõukogu poolt korraldatud teine sügiskool „Alternatiivne särts“. Räägiti tuuma-, tuule-, turba- ja bioenergiast ning tutvustati vesiniku- ja

fusioonienergeetikat. Alternatiivenergeetika teemal esinesid Ülo Kask, Erki Niitlaan, Andres Tropp, Andi Hektor, Ivo Palu ja Dmitri Gurkin.

- 20.–21. dets korraldati Tartu Observatooriumis seoses Toronto Ülikooli professori Jing M. Chen'i visiidiga taimkatte seirele pühendatud minikonverents.
- TLÜs toimusid füüsika seminarid ja mõned *workshop*'id koostöös vene ja poola teadlastega.

## V. TEADUSTÖÖ

- 12. veebr määrati Eesti Vabariigi teaduspreemiad.
  - Innovaatilise tooteni viinud väljapaistva teadus- ja arendustöö eest sai 750 000 krooni suuruse preemia kollektiiv koosseisus Hillar Aben (kollektiivi juht), Leo Ainola, Johan Anton ja Andrei Errapart töö „Integraalse fotoelastsusmeetodi teooria, mõõtmistehnoloogia ja aparatuuri väljatöötamine ja rakendamine jääkpingete mõõtmisel klaasitööstuses“ eest.
  - Eelmise nelja aasta jooksul valminud ja avaldatud parimate teadustööde eest 300 000 krooni suurused riigi teaduspreemiad said:
    - \* täppisteaduste alal Aleksei Šerman (TÜ FI) uurimuste tsükli „Magnetiline ühismöödutis, pseudopilud ja faaside eraldumine vaskperovskiitides“ eest;
    - \* tehnikateaduste alal Malle Krunks (TTÜ) uurimuste tsükli „Vedeliksadestuse tehnoloogiad konkurentsivõimelisele päikeseenergeetikale“ eest.
- Akadeemik Jaan Einasto pälvis maineka Marcel Grossmanni auhinna teedrajava panuse eest tumeaine ja kosmilise kärgstruktuuri avastamisel ning teadustöö edendamisel ajaloolises Tartu Observatooriumis. Rahvusvaheline Relativistliku Astrofüüsika Keskus (ICRA, Itaalia) ja sellega seotud teadusinstituutide võrgustik (ICRANet) annavad Marcel Grossmanni auhinda välja alates 1985. aastast märkimaks väljapaistvaid saavutusi teoreetilise füüsika ja kosmoloogia alal. Koos J. Einastoga said Marcel Grossmanni auhinna ka Christine Jones (Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, USA) galaktikate ja galaktikaparvede röntgenikiirguse uurimise eest ja Michael Kramer (Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Saksamaa, ja University of Manchester Jodrell Bank Centre for Astrophysics, UK) saavutuste eest

- pulsarite füüsikas. Auhinnad anti kätte 12. Marcel Grossmanni konverentsi avapäeval 12. juulil Pariisis UNESCO peakorteris.
- Euroopa Geoteaduste Ühing otsustas anda Irina Didenkulovale 2010. aasta Pliniuse Medali, mis tunnustab tema väljapaistvat panust lahendamaks okeanograafia ja rannikutehnika keerukaid probleeme mittelineaarse laineteooria kasutamise looduslike ohtude, kaasa arvatud tsunamid, hiid-, ja tormilained, kirjeldamisel. Vt [www.egu.eu/awards-medals/award/plinius.html](http://www.egu.eu/awards-medals/award/plinius.html)
  - 14. dets andis SA Vabariigi Presidendi Kultuurirahastu nõukogu 2009. a noore teadlase preemia 75 000 kr KBFI osakestefüüsika töörühma teadurile Mait Müntelile.
  - 1. okt avati TÜ Füüsika Instituudis Eesti esimene skaneeriv elektron- ja ioonmikroskoop Helios NanoLab 600. See on üks alustava tuumiklabori võtmeseadmetest nanomaailma saladustesse tungimisel.
  - 7. okt avati Tartu Teaduspargis peenmehaanika katsetöökoda Protolab. See on üks kolmest Protolab Network katsetöökojast (kaks on Lätis). Protolab Tartu pakub kolmemõõtmelise konstrueerimise/joonestamise ja prototüübitootmise teenust ettevõtetele ning arendus-, uurimis- ja haridusasutustele.
  - TÜ FI Tähe tn hoones toimusid teoreetilise füüsika, meditsiinifüüsika, gaaslahenduse, teadusbussi ja tehnoloogia seminarid. 3. septembrist alustas tööd astrofüüsika seminar.
  - TÜ FI Riia tn hoones jätkasid tööd spektroskoopia ja materjalifüüsika seminar (toimkond: A. Freiberg, V. Hižnjakov, J. Kikas, M. Kirm, A. Luštšik, P. Saari, I. Sildos) ja keskkonnafüüsika seminar.
  - Tartu Observatooriumis toimusid regulaarselt astronoomia (kolmapäeviti kl 15.00) ja atmosfäärifüüsika (reedeti kl 10.00) seminarid.
  - Tallinna Ülikoolis lõppes NATO SfP teadusgrant (2005–2009) „Nanosekundilised kiirgusimpulsid lõhkeainete ja radioaktiivsete elementide kiireks avastamiseks“ (Nanosecond radiation pulses for rapid detection of explosives and nuclear agents); projekti juht emeriitprof Ülo Ugaste. Kestab IAEA teadusgrant (2008–2011) „Stohhastilised protsessid tiheda plasmajoa interaktsioonil konstruktsioonimaterjalidega“, projekti juht vanemteadur Tõnu Laas.
  - TO teadurid Urmas Peterson ja Mait Lang osalevad 2009. a alanud projektis „Metsade pindala muutumise ja raiete jälgimine kaugseire meetoditega“, mida rahastab SA Keskkonnainvesteeringute Keskus metsanduse programmi raames.



- Ettevõtluse Arendamise Sihtasutus eraldas rakendusüüringu toetuse projektile „Silmaläätse hägususe mõõteseade katarakti diagnostikaks“, lepingu maht 7,8 mln kr, kestus 2,5 aastat, projekti juht Koit Mauring (TÜ FI).
- 1. oktoobril algas projekt „Tallinna Tehnikaülikooli ja Tartu Ülikooli biomeditsiinitehnika ja meditsiinifüüsika magistritaseme ühisõppekava arendamine tööturuvajadustest lähtuvalt“ (kogumaksumus 5 179 105 kr, kestus 3 aastat), mis on kaasrahastatav Euroopa Sotsiaalfondi meetme 1.1.4 „Kõrgkoolide koostöö ja innovatsiooni arendamine“ alammeetme „Kõrgkoolide ja ettevõtete koostöö“ kaudu. Projekti juhib Tallinna Tehnikaülikool (projektijuht Kalju Meigas), juhtpartner on Tartu Ülikool (TÜ koordinaator Kalle Kepler). Partnereid on 13: SA Põhja-Eesti Regionaalhaigla, AS Ida-Tallinna Keskhaigla, SA Tartu Ülikooli Kliinikum, AB Medical Teeninduse OÜ, Ldiamon AS, OÜ Girf, Meditsiinigrupp AS, Hansa Medical OÜ, Siemens Osakeühing Eesti filiaal, Humal Elektroonika OÜ, Müomeetria AS, Eesti Biomeditsiinitehnika ja Meditsiinifüüsika Ühing, OÜ Tensiotrace.
- Euroopa Sotsiaalfondi rahastamisel algas TÜ FIs projekt „Nanotehnoloogia moodulite loomine füüsika magistriõppekava jaoks“ (2009–2015). Projekti peamine eesmärk on uuendada füüsika magistriõppekava, luues selle jaoks koostöös ettevõtetega nanotehnoloogia moodulid. Projekti toetus on 2 810 000 krooni ja vastutav täitja Vambola Kisand.
- Euroopa Teadusfond toetas grafeeniüüringuid Tartu Ülikoolis teadlasmobiilsuse programmi raames 7,5 miljoni krooniga aastateks 2009–2014. *MOBILITAS Top Researcher Grant 2009* „Grafeenil põhinevate nanostruktuuride valmistamine, töötlemine ja karakteriseerimine“ vastutav täitja on Harry Alles (TÜ FI).

## **TEADUS- JA ARENDUSASUTUSTE SIHTFINANTSEERITAVAJAD TEADUSTEEMASID 2009. AASTAL**

### **Tartu Ülikool**

- SF0182732s06 Ökosüsteemi süsiniku ja veevoogude interaktsioon muutuvus keskkonnas Söber, Anu 2006-2011, 2 547 900 kr.
- SF0182747s06 Madaltemperatuurilise gaaslahendusplasma ja tahkise vastasmõju uurimine Laan, Matti 2006-2011, 1 536 600 kr.
- SF0182724s06 Keerukate süsteemide modelleerimine stohhastiliste meetoditega Kollo, Tõnu 2006-2011, 693 000 kr.

## FÜÜSIKAKROONIKA

- SF0182712s06 Suuremahuliste ja keeruliste arvutusülesannete lahendamise meetodid, arvutuskeskkonnad ja rakendused  
Vilo, Jaak 2006-2011, 1 687 600 kr.
- SF0180042s07 Infotehnoloogiliste ja nanoelektroniliste rakendustega tahkiskihtruhtuurid  
Kukli, Kaupo 2007-2012, 1 325 500 kr.
- SF0180013s07 Kondenseeritud aine ja fundamentaalväljade teooria  
Hižnjakov, Vladimir 2007-2012, 3 875 500 kr.
- SF0180058s07 Madaladimensionaalsed struktuurid ja nende rakendused  
Kikas, Jaak 2007-2012, 5 489 100 kr.
- SF0180055s07 Bioloogiliselt oluliste molekulide ja molekulaarkomplekside füüsikalised uuringud  
Freiberg, Arvi 2007-2012, 1 979 700 kr.
- SF0180037s07 Kiiritusnähtused laia keelutsooniga funktsionaalmaterjalides  
Luštšik, Aleksandr 2007-2012, 3 948 900 kr.
- SF0180073s07 Uute optika- ja spektroskoopiameetodite arendamine ja rakendamine materjali- ja plasmauuringutes  
Saari, Peeter 2007-2012, 2 228 800 kr.
- SF0180046s07 Pinnanähtused tahkisefüüsikas ja -tehnoloogias  
Sammelselg, Väino 2007-2012, 4 391 900 kr.
- SF0180043s08 Nanomeeterosakeste tekkimine ja aerosooliosakeste mõõtmespektri kujunemine nõrgalt ioniseeritud atmosfääri keskkonnas  
Hõrrak, Urmas 2008-2013, 1 730 500 kr.
- SF0180061s08 Molekulide ja molekulaarsüsteemide keemiliste ja füüsikaliste parameetrite mõõtemetodite arendus ja rakendused  
Leito, Ivo 2008-2013, 1 536 600 kr.
- SF0180081s08 Rakendusmatemaatika ja mehhaanika mudelid  
Lellep, Jaan 2008-2013, 1 585 200 kr.
- SF0180002s08 Protsessid modifitseeritud piirpindadel ja faasides ning nende rakendused uuetüübilistes energia allikates ning superkondensaatorites  
Lust, Enn 2008-2013, 4 900 700 kr.
- SF0180127s08 Maastike aineriingi muutuvates kliima- ja maakasutuse tingimustes ning selle ökotehnoloogiline reguleerimine  
Mander, Ülo 2008-2013, 3 419 300 kr.
- SF0180178As08 Relevantse loodusteadusliku hariduse osa teadmistepõhises ühiskonnas: multidimensionaalse loodusteadusliku kirjaoskuse kujundamise modelleerimine ja rahvusvaheline evalvatsioon  
Rannikmäe, Miia 2008-2012, 361 800 kr.
- SF0180038s08 Numbrilise ilmaennustuse arendamine õhukeskkonna prognooside suunas  
Rõõm, Rein 2008-2013, 1 508 900 kr.
- SF0180135s08 Protsessid makro- ja mikroheterogeensetes ning nanomõõtmes süsteemides ning vastavad tehnoloogilised rakendused  
Tenno, Toomas 2008-2013, 2 017 700 kr.
- SF0180056s09 Kriitilised ja stohhastilised nähtused mittelineaarsetes füüsikalistes süsteemides  
Tammelo, Risto 2009-2014, 1 342 700 kr.

### **TÜ Tehnoloogiainstituut**

- SF0180008s08 Ioonised elektroaktiivsed polümeersed materjalid, nende juhtimine ja rakendused  
Aabloo, Alvo 2008-2013, 1 536 600 kr.

### **TÜ Eesti Mereinstituut**

- SF0712699s05 Ranna- ja sisevete optika ning kaugseire Kutser, Tiit 2005-2010, 1 730 500 kr.
- SF0180012s08 Keskkonna väikse- ja suuremastaabilise muutlikkuse interaktiivne mõju Läänemere ökosüsteemi protsessidele Kotta, Jonne 2008-2013, 2 422 700 kr.
- SF0180104s08 Hüdrodünaamiliste protsesside ja nende mõju uurimine põhjelaestikule kõrgtiheda modelleerimise ning eksperimentaal mõtmiste baasil Suursaar, Ülo 2008-2013, 1 730 500 kr.

### **Tallinna Tehnikaülikool**

- SF0142684s05 Toodete ja tootmisprotsesside kiire teostamine - teooria ja metodoloogia. Küttner, Rein 2005-2010, 2 381 000 kr.
- SF0142687s05 Sünteetiliste ja looduslike polümeer materjalide omadused ja väärastamine Viikna, Anti 2005-2010, 1 266 600 kr.
- SF0142737s06 Missioonikriitiliste sardsüsteemide elektroonsed komponendid ja alamsüsteemid Min, Mart 2006-2011, 3 516 300 kr.
- SF0142719s06 Tehnoloogiliste protsesside intensiivistamine aktuaalsete keskkonna-probleemide lahendamiseks Munter, Rein 2006-2011, 1 474 300 kr.
- SF0142714s06 Elektrit juhtivate polümeer materjalide omaduste uurimine ja modifitseerimine kasutamiseks funktsionaalsete materjalidena ning elektronseadiste komponentidena Öpik, Andres 2006-2011, 2 910 600 kr.
- SF0140024s07 Energiaressursside säästlik kasutamine ja protsesside täiustamine põletusseadmetes Ots, Arvo 2007-2012, 3 803 500 kr.
- SF0140070s08 Kolmemõõtmelised mudelid aerosoolsete kanal-, gradient- ja keeris-vooluste modelleerimiseks ning lahendused tehnoloogilistes protsessides Kartušinski, Aleksander 2008-2013, 2 076 600 kr.
- SF0140072s08 Vedeliku ja konstruktsiooni koostoime mehhaanika Koppel, Tiit 2008-2013, 1 650 800 kr.
- SF0140092s08 Õhukesekiliselised ja nanostruktuursed materjalid keemilistel meetoditel Krunk, Malle 2008-2013, 1 806 600 kr.
- SF0140091s08 Kõvapinded ja pinnatehnika Kulu, Priit 2008-2013, 1 958 800 kr.
- SF0140062s08 Mitme faasiliste tribomaterjalide arendamine ja tehnoloogia Kübarsepp, Jakob 2008-2013, 3 495 400 kr.
- SF0140099s08 Uued materjalid ja tehnoloogiad tuleviku päikeseenergeetikale Mellikov, Enn 2008-2013, 4 286 400 kr.
- SF0140090s08 Toidu süsteemibioloogia ja füüsika Paalme, Toomas 2008-2013, 2 007 300 kr.
- SF0140113Bs08 Mehhatroonika- ja tootmissüsteemide proaktiivsus ja käitumismudelid Tamre, Mart 2008-2013, 1 190 500 kr.
- SF0140041s08 Töökindlate sardsüsteemide disain Ubar, Raimund 2008-2013, 4 092 500 kr.
- SF0140028s09 Põlevkivi ja kütuste segude töötlemise uued tehnoloogiad Luik, Hans 2009-2014, 1 460 500 kr.

## FÜÜSIKAKROONIKA

- SF0140011s09 Algebra ja analüüsi kaasaegsed rakendusmeetodid diferentsiaal- ja integraalvõrrandite teoorias, matemaatilises füüsikas ja statistikas  
Puusemp, Peeter 2009-2014, 754 200 kr.

### **TTÜ Küberneetika Instituut**

- SF0322709s06 Usaldusväärsed tarkvara- ja inimkeele tehnoloogiad  
Uustalu, Tarmo 2006-2011, 2 737 200 kr.
- SF014007s08 Mittelineaarne dünaamika ja kompleksüsteemid  
Engelbrecht, Jüri 2008-2013, 4 944 400 kr.
- SF014083s08 Mittelineaarused, puuduliku informatsiooni ja keeruka struktuuriga matemaatilised mudelid  
Kangro, Inga 2008-2013, 1 503 000 kr.
- SF0140018s08 Keerukate mittelineaarsete juhtimissüsteemide süntees  
Kotta, Ülle 2008-2013, 2 107 300 kr.

### **TTÜ Meresüsteemide Instituut**

- SF0140017s08 Läänemere vee- ja ainevahetusprotsessid muutuvate välismõjude tingimustes  
Elken, Jüri 2008-2013, 2 844 900 kr.

### **Tallinna Ülikool**

- SF0132723s06 Mittelineaarused stohhastilised protsessid nano- ja ökosüsteemides: teooria ning rakendused materjaliteadustes ja ökoloogias  
Mankin, Romi 2006-2011, 1 144 000 kr.
- SF0180178Bs08 Erinevate interdistsiplinaarsuse dimensioonide mõju loodusteadusliku kirjaoskuse kujundamisel  
Reiska, Priit 2008-2012, 631 800 kr.

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

- SF0690063s08 Mehhanismid ja interaktsioonid toksikoloogias ja toksinoloogias: in vitro mudelid  
Kahru, Anne 2008-2013, 3 114 900 kr.
- SF0180114Bs08 Integreeritud energeetilise metabolismi regulatsioonimehhanismid lihasrakkudes  
Saks, Valdur 2008-2013, 1 817 000 kr.
- SF0690034s09 Tuumamagnetresonantsi meetodi uued arendused ja rakendused  
Heinmaa, Ivo 2009-2014, 2 353 500 kr.
- SF0690001s09 Põlevkivi töötlemise tahkete jäätmete keskkonnasõbraliku kasutamise strateegia  
Kirso, Uuve 2009-2014, 1 384 400 kr.
- SF0690021s09 Keemiline energiatehnoloogia  
Lippmaa, Endel 2009-2014, 1 730 500 kr.
- SF0690030s09 Kõrgete energiate ja teoreetiline füüsika  
Raidal, Martti 2009-2014, 2 244 000 kr.
- SF0690029s09 Funktsionaalsete materjalide spektroskoopia  
Rõõm, Toomas 2009-2014, 1 806 600 kr.

### **Tartu Observatoorium**

- SF0060030s08 Evolutsiooni hilisfaasis tähtede ja nende ümbriste vaatluslik ja teoreetiline uurimine  
Kipper, Tõnu 2008-2013, 4 845 400 kr.

- SF0060115s08 Optiliselt keerukate looduskeskkondade kaugseire Kuusk, Andres 2008-2013, 1 044 500 kr.
- SF0060067s08 Tumeenergia, tumeaine ja struktuuri teke Universumis Saar, Enn 2008-2013, 3 720 600 kr.

## **EESTI TEADUSFONDI 2009. AASTAL ALANUD UURIMISTOETUSI**

Varasematel aastatel alanud ETF uurimistoetuste nimekirjad on eelmistes EFS aastaraamatutes. Teemad on liigitatud vastavalt ETISE klassifikatsioonile ([www.etis.ee](http://www.etis.ee)). Toodud on grandi teema, grandihoidja ja asutus, grandi number ja lõpuaasta.

### **4. Loodusteadused ja tehnika**

#### **4.2 Maateadused**

- |  |         |      |
|--|---------|------|
| • Kirde-Eesti sinisavi diapiiride ehitus ja teke (Argo Jõelegt, TÜ)  | ETF7860 | 2012 |
| • Neugrundi meteoriidikraater – teke ja areng (Sten Suuroja, TÜ)   | JD172   | 2012 |
| • Spektrofotomeetriliste meetodite rakendamine pärastjääaja keskkonnamuutuste uurimisel (Aina Leeben, TTÜ) | ETF7888 | 2012 |

#### **4.3 Kosmoseuuritud ja astronoomia**

- |  |         |      |
|--|---------|------|
| • Metsa peegeldusindikaator (Andres Kuusk, TO)                 | ETF7725 | 2012 |
| • Nähtav ja varjatud aine galaktikates (Urmas Haud, TO)        | ETF7765 | 2012 |
| • Valguskoonused: kosmiliste struktuuride areng (Enn Saar, TO) | ETF8005 | 2012 |

#### **4.8 Elektrotehnika ja elektroonika**

- |   |         |      |
|---|---------|------|
| • Ioonjuhtivate EAP aktuaatorite parametriseerimine (Andres Punning, TÜ)*                                     | ETF7811 | 2012 |
| • Süsteemitesti meetodid keerukatele trükkplaatidele (Artur Jutman, TTÜ)                                      | ETF7894 | 2012 |
| • Võimsate IGBT muundurite innovatiivsete juhtimis- ja diagnoostikasüsteemide uurimine (Valery Vodovozov, TÜ) | ETF8020 | 2012 |

#### **4.10 Füüsika**

- |  |         |      |
|--|---------|------|
| • Ab-initio, molekulaardünaamika ja Monte-Carlo meetodite kasutamine kristallide mittelineaarsete dünaamika- ja elastsusomaduste arvutamiseks lõplikul temperatuuril (Mihhail Klopov, TTÜ) | ETF7906 | 2011 |
| • Controlled manipulation of nanowires by AFM combined with SEM-FIB (Boris Polyakov, TÜ)   | JD162   | 2011 |
| • Fermi vedelike ja tahkiste kvant- ja mittelineaarne dünaamika: optilised ilmingud (Vladimir Hižnjakov, TÜ)   | ETF7741 | 2012 |

\* osaliselt erialadel 4.10 Füüsika ja 4.12 Protsessitehnoloogia ja materjaliteadus

- Fotoelastsustomograafia kompleksed algoritmid (Hillar Aben, TTÜ) ETF7840 2011
- Infrared spectroscopy of endohedral hydrogen-fullerene and calmodulin-peptide complexes (Min Ge, KBFI) JD187 2011
- Lineaarsete ja mittelineaarsete lokaliseeritud lainete femtosekund-optika (Peeter Saari, TÜ) ETF7870 2012
- Mittelineaarsed optilised efektid ning laserkiirguse transformeerimine gaasides ja tahkistes (Viktor Peet, TÜ) ETF7971 2012
- Nanomõõtmeliste defektide tekkeprotsessid suure tihedusega kiiritamisel ja laia keelutsooniga materjalide kiirituskindluse tõstmise väljavaated (Aleksandr Luštšik, TÜ) ETF7825 2012
- Phenomenology of Anomalous Z' (Antonio Racioppi, KBFI) JD164 2012
- Pöördülesanded keerukate omadustega materjalide identifitseerimisel (Jaan Janno, TTÜ) ETF7728 2012
- Turbulentse segunemise roll kompleksüsteemides toimuvate protsesside dünaamikas (Jaan Kalda, TTÜ) ETF7909 2012
- Uue füüsika otsingud LHC-s (Martti Raidal, KBFI) ETF8090 2012

#### 4.12 Protsessitehnoloogia ja materjaliteadus

- Nanomõõtmelised metall-dielektrik-struktuurid (Jaan Aarik, TÜ) ETF7845 2012
- Sool-geeli meetodil kasvatatud metalli oksiidide kihid optoelektronikale (Ilona Oja Acik, TTÜ) ETF7788 2012
- Tehnomaterjalide ja aurustussadestatud kõvapinnete väsimusmehaanika uurimine (Fjodor Sergejev, TTÜ) ETF7889 2012

#### 4.13 Mehhanotehnika, automaatika, tööstustehnoloogia

- Kõrgtemperatuursete gaaside voolu akustika eksperimentaalsed uurimismeetodid (Jüri Lavrentjev, TTÜ) ETF7913 2011
- Tõenäosuslik prao avastamise modelleerimine mittepurustavas kontrollis (Aleksander Klauson, TTÜ) ETF7900 2012

• 21. dets toimunud Eesti Teadusfondi nõukogu koosolekul otsustati 2010. aastal algavate ja jätkuvate projektide rahastamine. Kuna teadusfondi eelarve 2010. aastal võrreldes 2009. aasta juba vähendatud eelarvega võrreldes vähenes 9,1%, olid ekspertkomisjonid valiku ees, kas vähendada samas ulatuses ka jätkuvate projektide rahastamist või avada selle võrra vähem uusi projekte. Reaalteaduste- ja tehnika programmi raamides otsustati vähendamise kasuks. Reaalteaduste- ja tehnika ekspertkomisjoni laekus 130 taotlust, neist 33 taotlust programmile „Minu esimene grant“. Projekte oli võimalik rahastada 38 kogusummas 7,7 miljonit krooni, lävehindeks kujunes 4,3 ning edukuseks 32,8%.

## VI. RAAMATUD JA KOGUMIKUD

- Harald Keres. Ruum ja aeg (Eesti mõttelugu 89). Koostanud ja tõlkinud Piret Kuusk. // Ilmamaa, 2009, 416 lk.
- Harald Keres. Sajandi seiklused. Väljavõtteid autobiograafiast. // Ilmamaa, 2009, 190 lk.
- Eesti teadlased paguluses. Koostajad Vahur Mägi ja Anne Valmas. // TLÜ Kirjastus, 2009, 272 lk.
- Jack Holbrook, Miia Rannikmäe, Priit Reiska ja Paul Ilsley (toimetajad). The Need for a Paradigm Shift in Science Education for Post-Soviet Societies (Research and Practice: Estonian Example). // Peter Lang GmbH, 2009, 284 lk.

Raamat annab ülevaate teadusuuringutest loodusteadusliku hariduse valdkonnas Eestis aastatel 2003–2008 ja soovitab muuta loodusainete õpetamise süsteemi. Raamat on valminud Tartu Ülikooli juhtimisel kolme ülikooli (TÜ, TLÜ, TTÜ) koostöös ESF toetusel.

- Anneli Roode. Liiklus ja füüsika. Liiklusest nii ja teisiti. Töölehed ja lisalugemine füüsika tundideks. CD-ROM. // Riiklik Eksami- ja Kvalifikatsioonikeskus ning Maanteeamet, 2009.
- Henn Voolaid, Svetlana Ganina. Füüsika. Riigieksamite ülesandeid & soovitusi lahendamiseks. // Atlex, 2009, 100 lk.
- Tähistaevas. Entsüklopeedia. Tõlkinud Peeter Einasto, Indrek Kolka, Laurits Leedjärv, Antti Tamm. Toimetanud Rein Veskimäe. // Kirjastus Koolibri, 2009, 576 lk.
- Jaan Kaplinski. Teispool sinist taevast. // Ajakirjade Kirjastus, 2009, 160 lk.
- Ewald Quak, Tarmo Soomere (toimetajad). Applied Wave Mathematics. Selected Topics in Solids, Fluids and Mathematical Methods // Springer, 471 lk.

Kogumikus tehakse kokkuvõte EL Marie Curie teadmiste ülekandmise projekti „Cooperation of Estonian and Norwegian Scientific Centres within Mathematics and its Applications, CENS-CMA (2005–2009)“ raames saadud teaduslikest tulemustest ning see on pühendatud Mittelineaarsete protsesside uurimise keskuse CENS 10. aasta-päevale ja selle juhi Jüri Engelbrechti 70. juubelile.

## VII. IN MEMORIAM

**Peeter Liblik**

11. V 1944 – 22. VI 2009

Vahetult enne jaanipäeva, suve hakul lahkus ootamatult meie seast Füüsika Instituudi kauaaegne kaastööline Peeter Liblik, jättes järele tühiku, mida on peaaegu võimatu täita.

Peeter Libliku kogu olemus, nii tema tagasihoidlikkus ja delikaatsus, mis samas olid ühendatud ülimalt eetilise nõudlikkusega omaenda suhtes – ta ei läinud kunagi mingitele kompromissidele oma südametunnistusega, mida elu tema elatud ajal alatihi peale sundis – oli nagu selle ennesõjaaegse Tartu intelligentsi, kuhu kuulusid ka tema vanemad (ta isa oli pianist), vaimuse edasikandjaks. Ta õppis Tartu 2. Keskkoolis, paistes juba seal silma oma võimetega reaalteaduste alal. Ta osales väga edukalt õpilaste füüsika-, matemaatika- ja keemiaolümpiaadidel ning võitis abiturientina Eestis kõigi kolme ala kokkuvõttes esikoha. Asudes pärast ülikooli lõpetamist tööle Füüsika Instituuti, ilmutas ta kohe väljapaistvaid võimeid ka eksperimentaatorina töötades. Temale omane loogiline mõtteviis, mida ta oskas rakendada ka kõige praktilisemate probleemide juures, lubas tal enamasti teistest selgemini näha asja sisu ning pakkuda täiesti originaalseid lahendusi.

Koos mõne kaastöötajaga rajasid nad unikaalse seadme, mis lubas registreerida elektronidega ergastatud kristallide luminesentsi suure tundlikkusega ning suures temperatuuri- ja energiavahemikus. Selle tagajärjeks oli rida väljapaistvaid teadustulemusi: vabade eksitonide luminesentsi esmamõõtmine laia keelutsooniga dielektrikuis, aktivatsioonibarjääriga eraldatud vabade ja autolokaliseerunud eksitonide kooseksistentsi nähtuse avastamine, kõrgetemperatuursete ülijuhtide luminesentsi avastamine ja veel palju muud, millest piisaks mitmele füüsikule elutööks. Peeter Liblik ise oma äärmises tagasihoidlikkuses keeldus kategooriliselt raiskama oma aega teaduskraadi bürokraatlikule vormistamisele, samas tundes elavat huvi kõige uue vastu.

Kõigil, kel oli õnn temaga koos töötada, jäävad alatiseks meelde tema lõikavalt loogilised ja sädelevad mõttekäigud kõikvõimalike probleemide arutamisel, olid need siis füüsikalised tööülesanded, matemaatilised pähklid või lihtsalt praktilise eluga seotud asjad; mistahes küsimusega otsiti alati tema juurest abi. Kolleegid ja kaastöötajad väljendavad lahkunule sügavat tänu.



**Artur Suisalu**

22. XI 1951 – 9. XI 2009

Artur Suisalu sündis 22. novembril 1951 Võrus teenistujate perekonnas. Aastatel 1970–1975 õppis ta Tartu Riiklikus Ülikoolis ja lõpetas selle füüsika erialal. Pärast lõpetamist suundus Artur tööle Füüsika Instituuti ja astus siin ka aspirantuuri, kus tema juhendajaks sai dr Rein Avarmaa. Tulemina kaitses ta 1984. a kandidaadiväitekirja teemal „Optilise ja mikrolaine resonantsid mõnede lisandimolekulide tripletses seisundis“. Artur Suisalu oli akad



Karl Rebase ja Rein Avarmaa poolt algatatud fotosünteesivate pigmentide (sh klorofüllil) laserspektroskoopiliste eksperimentaaluuringuute üks alustajatest. Oma juhendajalt Rein Avarmaalt päris Artur täpsuse ja korrektsuse eksperimentide läbiviimisel, nõudlikkuse ja aususe tulemuste töötlusel ja interpreteerimisel. Need omadused iseloomustavad kogu ta teadustegevust, mille tulemused on avaldatud rohkem kui 50 kõrgetasemelises teadusartiklis. Suur osa nendest töödest on seotud tahkistes toimuvate protsesside uurimisega ainesse viidud lisandimolekulide spektrite kaudu (molekulaarsondeerimise meetod). Koos kolleegidega sai Artur selles vallas mitmeid tähelepanu pälvinud tulemusi nagu spektrijoonte rõhuline kitsenemine madalatemperatuursetes klaasides, ühismööduta kristallide omapärane mikrodünaamika, efektid molekulaarkristallide lisandispektrites faasisiirete läheduses jt.

Artur oli üks üksikmolekulide spektroskoopia esmaevitajatest Tartus, nende tööde eest pälvis ta 1996. a Eesti Vabariigi teaduspreemia täppisteaduste alal koos akad Karl Rebase ja dr Viktor Palmiga. Artur Suisalu viimaste aastate teaduslikud huvid olid seotud faasisiirete polarisatsioonmikroskoopiaga molekulaarkristallides – suund, mille rajajaks ta instituudis oli ja kus saadud unikaalsed tulemused viitasid paljulubavatele arenguvõimalustele.

Artur oli alati abivalmis ja sõbralik kaastöötaja, kes ei säästnud oma aega nii individuaalkonsultatsioonidel kui ka ühistel laboriüritustel. Ta juhendas mitmeid magistri- ja diplomitöid, olles juhendajana abivalmis, kuid nõudlik ja kompromissitu töö teadusliku taseme suhtes.

Nädalavahetustel pühendas Artur oma tähelepanu ja hoolitsuse abi-kaasale ja poegadele.

Arturi lahkumine raske haiguse tagajärjel läinud aasta 9. novembril oli kõikidele ta töökaaslastele ootamatuks löögiks ja korvamatuks kaotuseks. Mälestus heast kolleegist ja sõbrast jääb meisse kauaks püsima.

### **Lev Kofman**

17. VI 1957 – 12. XI 2009

Aasta lõpul tabas Eesti astronoomi ootamatu teade – meie keskel lahkus Lev Kofman, kes oli olnud pikka aega meie kolleeg Tartu Observatooriumis.

Lev sündis arstide perekonnas 17. juunil 1957. a Dudinkas Siberimaal. Kümme aastat hiljem kolis pere Tallinnasse, kus Lev lõpetas 1974. aastal keskkooli ja asus seejärel edasi õppima füüsikat Tartu Ülikoolis. Viis aastat hiljem lõpetas ta ülikooli teoreetilise füüsika erialal. Juba õpingute ajal lõi ta sidemed Moskva füüsikutega, eriti Jakov Zeldovitši koolkonnaga.



Pärast Tartu Ülikooli lõpetamist asus Lev tööle Tartu Observatooriumi, algul inseneri, seejärel nooremteaduri, teaduri, vanemteaduri ja lõpuks juhtivteaduri ametikohal. Ta jätkas sidemeid oma Moskva kolleegidega, viibis korduvalt Landau nimelises Teoreetilise Füüsika Instituudis stažeerimas, juhendajaks Aleksei Starobinski. Koos Starobinski ja Andrei Lindega pani Lev Kofman aluse kosmoloogilise inflatsiooni teooriale.

Inflatsiooniprotsessid ja aine tekkimine selle lõpul jäid Lev'i edaspidigi huvitama. Samuti on Lev uurinud universumi suuremastaabilise struktuuri (superparvede ja tühikute võrgustiku) teket.

Pärast Eestist lahkumist töötas Lev Kofman Kanada Teoreetilise Astrofüüsika Instituudis (CITA), Havai Ülikoolis ja viimased aastad jälle CITAs, olles valitud selle tegevdirektoriks.

2006. aastal valiti Lev Kofman Ameerika Füüsika Seltsi liikmeks, tunnustades tema teedrajavaid töid inflatsiooniteooria ja varase universumi kuumenemise alal, tema uurimusi kosmoloogilise konstandi mõjust foonkiirgusele ning tema selgitusi kosmilise võrgustiku tekkimise kohta Gaussi tihedushäiritustest.

Teade Lev Kofmani surmast 12. novembril tabas tema sõpru ootamatult. Teda jäävad leinama ta kolleegid ja sõbrad Eestis ja kogu maailmas.

### **Indrek Martinson**

26. XII 1937 – 14. XI 2009

Eesti füüsikute peret on tabanud valus kaotus. 14. novembril suri ootamatult oma kodus Lõuna-Rootsis Rootsi Kuningliku Teaduste Akadeemia liige, Eesti ja Leedu Teaduste Akadeemiate välisliige, Tartu Ülikooli audoktor professor Indrek Martinson.



Indrek Martinson sündis 26. detsembril 1937. aastal Tartus juristi ja majandusteadlase perekonnas. Sõja lõpul 1944. aastal õnnestus perekonnal põgeneda Saksamaale ja sealt mõni aasta hiljem minna Rootsi. 1957. a lõpetas Indrek Stockholmi eeslinna Brännkyrkä gümnaasiumi ja 1961. a Stockholmi Ülikooli magistrikraadiga matemaatika, füüsika ja astronoomia alal. Seejärel töötas ta algul Rootsis, aastail 1968–1970 aga Ameerikas, Tucsoni ülikoolis Arizonas. Pärast naasmist Rootsi kaitses ta PhD aatomifüüsikas Stockholmi Ülikoolis (1972) ja pärast lühiajalist teadustööd Stockholmi Aatomifüüsika Uurimisinstituudis valiti ta 1975. a Lundi Ülikooli aatomifüüsika professoriks. Sellel ametikohal töötas ta enam kui veerand sajandit, kuni aastani 2002, mil emeriteerus. Professoritöö kõrval jõudis ta mitmel korral olla pikaajaline külalisuurija Toledo Ülikoolis Ohios (USA) ja RIKENi uurimislaboris Jaapanis. Tema teadustööde nimikirjas on enam kui 230 publikatsiooni ja tema juhendamisel on kaitsnud kraadi üle neljakümne doktorandi. Alates 1986. aastast, kui ta valiti Rootsi Teaduste Akadeemiasse, oli ta seotud Nobeli füüsikapremiate määramisega ja 1994. a sai Nobeli füüsikakomitee esimeheks.

Esimest korda pärast sunnitud lahkumist Eestist õnnestus Indrekul Tartut (ja Füüsika Instituuti) külastada 1988. aastal. Tagasi Lundis, asus ta genereerima ideid, kuidas oma siinseid kolleege aidata. Tihedama koostöö võimalused avanesid taasiseseisvumise järel. Tänu Indreku initsiatiivile ja abile on nende aastate jooksul saanud mitukümmend Eesti

füüsikut võimaluse kasutada oma teadustöös unikaalset katseseadet – Lundi MAX-lab'i sünkrotroni. Ajal, mil sinne teadus oli takerdumas rahapuudusesse, aitas Indrek meid raha hankimisega erinevatest Rootsi fondidest. Tänu oma hämmastavale sidemetevõrgule ja diplomaatiale oskas ta ikka leida parima võimaluse raha taotlemiseks nii Eesti füüsikute töödeks Lundis kui ka teadusaparatuuri muretsemiseks Tartusse.

Indrek oli äärmiselt südamlilik ja väga peene huumoritajuga kaaslane. Kuulanud tema lõputuid lugusid vanadest aegadest ja tuntud inimestest, tabasid alles hiljem ära tema elegantse huumori. Lundi lähedal Södra Sandbys oli tema ja ta abikaasa Evi kodu ikka valla Eesti külalistele. Eestluse alalhoidmine oli Indreku hinges ja eestlasteks kasvasid ka tema kolm tütar.

Indrek Martinsoni panust Füüsika Instituudi arengusse on võimatu ülehinnata. Meie mõtetesse jääb Indrek ikka sõbraliku ja abivalmis kaaslasena, toetajana ja teadlasena.

## VIII. FÜÜSIKAHARIDUSLIK TEGEVUS

- SA Archimedes jagas 2009. aasta Eesti teaduse populariseerimise auhinnad (vt [www.archimedes.ee/teadpop](http://www.archimedes.ee/teadpop)). Auhinnale esitati 45 kandidaati, neist 11 isikut, 8 raamatut, 6 meediaprojekti ja 20 tegevust. Auhinnafond oli 320 000 krooni. Anti välja kolm I auhinda (á 50 000 krooni), kolm II auhinda (á 26 000 krooni) ja seitse III auhinda (á 13 000 krooni). Auhindade hulgas oli ka füüsikaga seotuid.
  - I auhinna pälvisid:
    - \* Jaak Kikas, pikaajalise, mitmekülgse ja aktiivse tegevuse eest teaduse populariseerijana (2008. a pidas ta 20 populaarteaduslikku loengut füüsika, materjaliteaduse jt teemadel ca 1000 kuulajale),
    - \* Uno Veismann, populaarteaduslike kirjutiste eest aastail 2001–2008,
    - \* robotivõistluse „Robotex 2008“ meeskond;
  - II auhinna sai Tallinna Reaalkool süstemaatilise teaduse populariseerimise eest oma kooli õpilaste ja laiema üldsuse hulgas;
  - III auhinna said pikaajagne teaduse populariseerija Raivo Sell tegevuse eest mehhatroonika populariseerijana 2008. aastal, Martin Vällik portaali skeptik.ee eest ja MTÜ TalveAkadeemia tudengite teadusartiklite konkursi ja konverentsi „Talveakadeemia“ korraldamise eest.

- Õpilaste teadustööde riikliku konkursi gümnaasiumiastme preemiad said:
  - I preemia (17 000 kr): Riinu Ots (Hugo Treffneri Gümnn) töö „Suitsujoa termilise tõusu mõju õhusaaste leviku arvutusele põlevkivielektri jaamade näitel“ eest;
  - III preemia (9 000 krooni): Kaileen Raudsepp (Tallinna Reaalkool) töö „Askorbiinhappe kapillaarelektroforeetiline analüüs mahlades ja puuviljades“ eest;
  - eripreemiad said Kati Kuld (Jõgeva Ühisgümnn) töö „Katlakivi tekke vähendamine magnetpalli abil“ eest ning Nelli Pavlova ja Sophia Galashuk (Pärnu Vene Gümnn) töö „Kass kui füüsika objekt“ eest.
- Heino Eelsalu Fondi stipendiumi 2010. aastaks pälvis Tõnu Tuvikene Tartu Tähetorni juures tegutseva astronoomiaringi uue programmi väljaarendamiseks.
- Teaduskeskus AHHA on korraldanud mitmeid teadusnäitusi, teaduskohvikuid ja pereüritusi. Alates märtsist asub AHHA keske teadusnäitus Tartu linna lõunapiiril, Riia maantee servas Lõunakeskuses (Ringtee 75), Tartu Teaduspargi kõrval. Alates 15. novembrist on teadusnäituse juures ka arendavate mänguasjade müügipunkt „Taibula“. Samas hoones paikneb AHHA 4D elamusokino.
- TTÜ korraldas ekskursioone Tallinna Tähetornis lasteaia- ja koolilastele ning organisatsioonidele, läbiviijateks Mario Mars ja Voldemar Harvig.
- Avati innovatsiooniaasta 2009 veebiportaal in.ee
- Eesti Infotehnoloogia Sihtasutus valmistub 43. rahvusvahelise füüsikaolümpiaadi IPhO 2012 korraldamiseks. 2. nov kuulutati välja olümpiaadi logokonkurss tähtajaga 14. dets, edasiarendamiseks märgiti ära 2 tööd 248-st esitatust.
- Alustas ilmumist ajakiri LoTe loodusteaduste õpetajatele. Kaks korda aastas väljaantava ajakirja eesmärk on kajastada loodusteadusliku haridusega seonduvat. Ajakiri kasvas välja LoTe projektist ning Tartu Ülikooli, Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Ülikooli koostööst. Ajakirja peatoimetaja on TÜ loodusteadusliku hariduse teadur ning Mii-na Härma Gümnaasiumi bioloogiaõpetaja Anne Laius.
- Valmisid uued riiklikud füüsika ainekavad põhikoolile ja gümnaasiumile. Ainekavade tellijaks oli HTM. Põhikooli ainekava töörühma juht oli Jaak Jõgi, liikmed Riina Leet ja Enn Ööpik. Gümnaasiumi ainekava töörühma juht oli Kalev Tarkpea, liikmed Jaak Jõgi, Riina Leet,

Elmu Mägi, Jaan Paaver ja Aarne Silas. Eesti Füüsika Selts moodustas ainekava töörühmade toetamiseks tugirühma füüsikaõpetajatest ja teistest asjast huvitatud inimestest. Toimused regulaarsed arutelud ning intensiivsed diskussioonid maililistis.

- TÜ koolifüüsika keskuse tegevusi aastal 2009:
  - 7. jaanuaril käis füüsikahoone (Tähe 4) praktikumides tutvumisreisil 33 Viljandi C. R. Jakobsoni nim gümnaasiumi 10. klassi õpilast
  - 20. jaanuaril esines Henn Voolaid Eesti Kirjandusmuuseumis rahvaluuleteadlastele ettekandega „Eesti õpilaste füüsikalised väärusaamad“
  - 5. veebruarist kuni 16. juunini viidi koostöös Avatud Ülikooli keskusega programmi Primus raamides läbi kursus „Reaalteaduste didaktika“, mille lõpetas 31 õppejõudu TÜ FI-st, EMÜ-st ja KVÜÕA-st
  - 7. märtsil käis füüsikahoones (Tähe 4) loengul „Füüsika meie ümber“ 26 õpilast Viljandi Paalalinna Gümni 10. klassist. Lektor oli Henn Voolaid
  - Riikliku õppekava põhikooli loodusõpetuse ainekava töögrupi juht on Enn Pärtel.
- 7.-8. märtsil toimus Tartu Ülikoolis Eesti koolinoorte 56. füüsikaolümpiaadi lõppvoor. Kokku võistles 104 õpilast 8.-12. klassist. Füüsikaolümpiaadi lõppvooru žürii otsus:
  - I Autasustada 1. järgu diplomiga
    - \* Gümnaasiumi arvestuses: Stanislav Zavjalov (12. kl, Narva Humanitaargümni); Ardi Loot (12. kl, Hugo Treffneri Gümni) ja Pavo Parmas (12. kl, Gustav Adolfi Gümni)
    - \* Põhikooli arvestuses: Erik Tamre (9. kl, Tallinna Reaalkool).
  - II Autasustada 2. järgu diplomiga
    - \* Gümnaasiumi arvestuses: Mihkel Soolep (12. kl, Tallinna Reaalkool) ja Kadi Liis Saar (10. kl, Tallinna Reaalkool / Inglise Kolledž).
    - \* Põhikooli arvestuses: Jaan Toots (8. kl, Tallinna Tehnikagümni); Kaur Aare Saar (8. kl, Tallinna Inglise Kolledž); Eva Lotta Käsper (9. kl, Tartu Kivilinna Gümni); Ralf Ahi (9. kl, Tallinna Reaalkool); Karl Oskar Lember (9. kl, Tallinna Reaalkool) ja Sandra Schumann (8. kl, Tallinna Reaalkool).
  - III Autasustada 3. järgu diplomiga
    - \* Gümnaasiumi arvestuses: Taavi Pungas (12. kl, Tallinna Reaalkool); Roland Matt (11. kl, Hugo Treffneri Gümni); Ants Remm

- (10. kl, Hugo Treffneri Gümnn); Heino Soo (12. kl, Hugo Treffneri Gümnn); Viktor Karabut (12. kl, Ahtme Gümnn); Erik Paemurru (11. kl, Tallinna Reaalkool); Siim-Ilmar Nopri (12. kl, C. R. Jakobsoni nim Gümnn); Rauno Siinmaa (11. kl, Pärnu Koidula Gümnn); Andre Tamm (11. kl, Tallinna Reaalkool); Tõnis Ojandu (12. kl, Tallinna Reaalkool) ja Lauri Hämarik (12. kl, Hugo Treffneri Gümnn).
- \* Põhikooli arvestuses: Deiwin Sarjas (9. kl, Tääksi Põhikool); Kaur Karus (9. kl, Miina Härma Gümnn); Ivo Adermann (9. kl, Tallinna Reaalkool), Annika Laidroo (9. kl, Rakvere Gümnn); Anu Ainsaar (9. kl, Tallinna Reaalkool), Sergei Malõšev (9. kl, Narva Pähklime Gümnn), Deniss Tšasovskihh (8. kl, Narva Humanitaargümnn), Taivo Pungas (9. kl, Tallinna Prantsuse Lütseum) ja Henri Rästas (9. kl, Tallinna Reaalkool).
  - IV Autasustada järguta diplomiga
    - \* Gümnaasiumi arvestuses: Jonatan Jõks (12. kl, Tallinna Reaalkool); Mario Reiman (11. kl, Nõo Reaalgümnaasium); Taavi Repän (12. kl, Hugo Treffneri Gümnaasium); Eero Vaher (10. kl, Pärnu Koidula Gümnn); Madis Ollikainen (10. kl, Gustav Adolffi Gümnn); Janno Jõulu (10. kl, Tallinna Reaalkool); Hannes Reinsoo (11. kl, Rakvere Reaalgümnn); Iris Lüsi (10. kl, Nõo Reaalgümnn); Lauri Taaleš (12. kl, Nõo Reaalgümnn); Sandra-Mirella Valdma (11. kl, Tallinna Reaalkool); Risto Reinhold (11. kl, C. R. Jakobsoni nim Gümnn); Rauno Padari (Hugo Treffneri Gümnn); Ivar Kiitam (10. kl, Tallinna Reaalkool); Markus-Eerik Horma (10. kl, Tallinna Reaalkool) ja Robert Arus (12. kl, Tallinna Reaalkool).
    - \* Põhikooli arvestuses: Jaagup Repän (9. kl, Rõngu Keskkool), Karl Väärtmaa (9. kl, Pärnu Koidula Gümnn), Villem Pata (8. kl, Miina Härma Gümnn), Tõnis Soodla (9. kl, Tallinna Reaalkool), Tõnis Peeter Kull (8. kl, Miina Härma Gümnn), Meelis Steinberg (9. kl, Väandra Gümnn).
  - V Eriauhinnad toetajatelt:
    - \* Füüsika Instituudi eriauhind – Stanislav Zavjalov (12. kl, Narva Humanitaargümnn),
    - \* Eesti Füüsika Seltsi eriauhind – Kadi Liis Saar (10. kl, Tallinna Reaalkool / Inglise Kolledž),
    - \* Kirjastuse Avita stipendium – Erik Tamre (9. kl, Tallinna Reaalkool); Ardi Loot (12. kl, Hugo Treffneri Gümnn) ja Paavo Parmas (12. kl, Gustav Adolffi Gümnn),

- \* Stipendium „Benoit Mandelbrot'i jälgedes“ – Mihkel Soolep (12. kl, Tallinna Reaalkool); Kadi Liis Saar (10. kl, Tallinna Reaalkool / Inglise Kolledž); Roland Matt (11. kl, Hugo Treffneri Gümnn); Ants Remm (10. kl, Hugo Treffneri Gümnn); Jaan Toots (8. kl, Tallinna Tehnikagümnn); Kaur Aare Saar (8. kl, Tallinna Inglise Kolledž); Eva Lotta Käsper (9. kl, Tartu Kivilinna Gümnn); Ralf Ahi (9. kl, Tallinna Reaalkool); Karl Oskar Lember (9. kl, Tallinna Reaalkool) ja Sandra Schumann (8. kl, Tallinna Reaalkool).
- \* MTÜ Loodusajakiri eriauhind – Eva Lotta Käsper (9. kl, Tartu Kivilinna Gümnn); Deiwin Sarjas (9. kl, Tääksi Põhikool).
- \* Ajakirja Tarkade Klubi eriauhind – Kadi Liis Saar (10. kl, Tallinna Reaalkool / Inglise Kolledž).
- VI Žürii avaldab tänu õpetajatele õpilaste hea ettevalmistamise eest.
- VII Vastavalt olümpiaadi statuudile arvata Eesti võistkonna liikmeks rahvusvahelisel füüsikaolümpiaadil Stanislav Zavjalov (12. kl, Narva Humanitaargümnn).
- VIII Nimetada rahvusvahelise füüsikaolümpiaadi Eesti võistkonna kandidaatideks Ardi Loot (12. kl, Hugo Treffneri Gümnn); Paavo Parmas (12. kl, Gustav Adolfi Gümnn); Mihkel Soolep (12. kl, Tallinna Reaalkool); Kadi Liis Saar (10. kl, Tallinna Reaalkool / Inglise Kolledž); Taavi Pungas (12. kl, Tallinna Reaalkool); Roland Matt (11. kl, Hugo Treffneri Gümnn); Ants Remm (10. kl, Hugo Treffneri Gümnn); Heino Soo (12. kl, Hugo Treffneri Gümnn); Viktor Karabut (12. kl, Ahtme Gümnn); Erik Paemurru (11. kl, Tallinna Reaalkool); Siim-Ilmar Nopri (12. kl, C. R. Jakobsoni nim. Gümnn); Rauno Siinmaa (11. kl, Pärnu Koidula Gümnn); Andre Tamm (11. kl, Tallinna Reaalkool); Tõnis Ojandu (12. kl, Tallinna Reaalkool); Lauri Hämarik (12. kl, Hugo Treffneri Gümnn); Jonatan Jõks (12. kl, Tallinna Reaalkool); Mario Reiman (11. kl, Nõo Reaalgümnn); Eero Väher (10. kl, Pärnu Koidula Gümnn); Madis Ollikainen (10. kl, Gustav Adolfi Gümnn); Janno Jõulu (10. kl, Tallinna Reaalkool); Hannes Reinsoo (11. kl, Rakvere Reaalgümnn) ja Kert Pütsepp (10. kl, Tallinna Reaalkool).

Jaak Kikas, füüsikaolümpiaadi žürii esimees  
Tartus, 8. märtsil 2009. a.



- 16. märtsil toimus TÜ füüsikahoones (Tähe 4) kaheksas akadeemiline füüsikaolümpiaad. Lahendati teoreetilist laadi ülesandeid ülikooli üldfüüsika programmi teemadel. Rahalised preemiad said füüsika 2. aasta magistrant Mihkel Kree, füüsika 3. aasta üliõpilane Mihkel Heidelberg, 1. aasta magistrant Siim Ainsaar ja 3. aasta üliõpilane Ott Rebane. Märgitigi ära Kaarel Piibu, Grigori Palamartšuki ja Andres Laane tubli esinemine. Vt [www.fyysika.ee/fyysika/akad\\_oly/](http://www.fyysika.ee/fyysika/akad_oly/)
- 17. ja 18. märtsil toimus Tartu Kivilinna Gümnaasiumis ja Tallinna Reaalkoolis teine koolirobootika võistlus „RoboMiku“. Võistlusel osales ligi kolmkümmend 7.–9. klasside võistkonda üle Eesti. Konkursi käigus ehitasid võistkonnad LEGO NXT Mindstorms komplektide baasil roboti. Valmis robotid võistlesid seejärel etteantud ülesande täitmisel. Konkursi eesmärgiks oli populariseerida põhikooli õpilaste hulgas teadust ning äratada neis insenertehnilist ning reaalteaduslikku huvi. Üritust juhtisid Heilo Altin ja Sven Hendrikson Tartu Ülikoolist.
- 29. märtsist–6. apr toimus Hispaanias Euroopa Liidu VII võistkondlik loodusteaduste olümpiaad (EUSO). Kulmedalid tõid Erik Tamre (Tallinna Reaalkool), Uku-Laur Tali (Hugo Treffneri Gümnaasium) ja Kadi Liis Saar (Tallinna Reaalkool, Tallinna Inglise Kolledž). Pronksmedalid said Kert Pütsepp (Tallinna Reaalkool), Eva-Lotta Käsper (Tartu Kivilinna Gümnaasium) ja Sander Siim (Tallinna Vanalinna Hariduskolleegeium). Eesti võistkonna juhendajad olid TÜ lektor Karin Hellat, TÜ teadur Timo Kikas ja TÜ magistrant Jaanus Uibu.
- 27.–29. apr toimus Tallinnas õpilaste VII Eesti–Soome maavõistlus füüsikas, kus osales 41 õpilast. Võitjaks tuli Stanislav Zavjalov (Narva Humanitaargümnaasium, 12. kl), tema ja Taavi Pungas (Tallinna Reaalkool, 12. kl) said I preemia. II preemia said Roland Matt (Hugo Treffneri Gümnaasium, 11. kl) ja Paavo Parmas (Gustav Adolfi Gümnaasium, 12. kl). Eesti võistkonna juhendaja oli TTÜ Kübi vanemteadur Jaan Kalda.
- 10.–16. maini Renos (Nevada, USA) toimunud rahvusvahelisel õpilaste teadustööde konkursil ISEF sai Hugo Treffneri Gümnaasiumi abiturient Riinu Ots keskkonnateaduste kategoorias teise preemia tööga, mis käsitleb ümbritsevast õhust soojema suitsujoa tõusu mudelarvutusi. See on Eesti õpilaste siiani parim saavutus teadustööde võistlustel. Töö kuulub keskkonna- ja atmosfäärifüüsika valdkonda, juhendaja Marko Kaasik.
- 10. juunil toimus füüsika riigieksam. Füüsikaeksami olid valinud 697 õppurit, keskmine saadud punktide arv oli 66,3; 59 eksamitööd sai üle 90 punkti 100st.

- 25.–27. juunini toimus Nõos EFS füüsikaõpetajate suvekool, mille üheks oluliseks teemaks oli astronoomia. Kolme päeva jooksul peeti 8 ettekannet ja 1 seminar, külastati ka Tõravere Stellaariumi.
- 11.–19. juulini toimus Mehhikos 40. rahvusvaheline füüsikaolümpiaad. Olümpiaadil osalesid 76 riigi esindused. Eesti võistkonna edukaim liige Stanislav Zavjalov saavutas 28,55 punktiga hõbemedali. Olümpiaadi pronksmedali vääriliselt lahendas ülesanded Tallinna Reaalkooli vilistlane Taavi Pungas. Roland Matt ja Ants Remm Hugo Treffneri Gümnaasiumist pälvisid diplomid. Võistkonda kuulus veel Siim Nopri (C.R. Jakobsoni Gümni). Juhendajatena olid võistkonnaga Mehhikos kaasas TÜ FI prof Jaak Kikas ja TTÜ KübI vanemteadur Jaan Kalda. Eesti võistkondade ettevalmistamist ja osalemist rahvusvahelistel olümpiaadidel korraldab TÜ Teaduskool ning rahastab Haridus- ja Teadusministeerium.
- 13.–19. juulini korraldas Tartu Ülikool koostöös Eesti Füüsika Seltsiga Kloogaranna Noortelaagris 5.–7. klassi õpilastele Teaduslaagri.
- 17. juulil kinnitas haridus- ja teadusminister oma käskkirjaga loodus-, täppis- ja tehnikateaduseid ning tehnoloogiat populariseeriva programmi TeaMe. Programmil on kolm laiemat eesmärki: suurendada noorte huvi teaduse ja tehnoloogia ning nendega seotud elukutsete vastu, laiendada Eesti teadusmeedia arenguvõimalusi ning levitada täppis- ja loodusteaduslikku mõtteviisi, tuua teadus inimestele lähemale ja meedias nähtavamale. Programmi maht on ligi 52,2 miljonit krooni, millest Euroopa Sotsiaalfondi toetuse osa moodustab 85,3%, riiklik struktuuritoetus 10% ning omafinantseering 4,7%. Programmi viib ellu SA Archimedes teaduse populariseerimise büroo.
- 20. aug avas teaduskeskus AHHA oma filiaali Tallinnas aadressil Vabaduse väljak 9.
- 28. ja 29. aug tähistas Energiakeskus Tallinnas oma 10. sünnipäeva. Tutvustati keskuse uut nime ja logo: Energiakeskusest sai Energia avastuskeskus. Läbi aasta toimusid perepäevad, interaktiivsed näitused ja teadusteatri etendused. Vt energiakeskus.ee
- 9. sept arutasid teadlased ja ajakirjanikud Tallinnas toimuval teadus- ja innovatsioonimeedia konverentsil „Bermuda kolmnurk“ küsimust, kuidas neid teemasid paremini meedias kajastada. Konverents oli jätkuks 2008. aasta kevadel toimunud konverentsile „Teadus – tumm või tummine?“. Lisainfo [www.archimedes.ee/teadusmeedia2009/](http://www.archimedes.ee/teadusmeedia2009/)

- 25. sept korraldas Teaduskeskus AHHAH koos Eesti Teaduste Akadeemia ja Eesti Rahvusringhäälinguga järjekordse Teadlaste Öö (vt [www.ahhaa.ee/TeadlasteOo2009](http://www.ahhaa.ee/TeadlasteOo2009)).
  - Tartus: teadustelk Raeplatsil, Noa laev Emajões, monumentaalfüüsika, salalaborid, muuseumimüstika, põnnifilosoofia, elavmale, tammeteadus, spordispiraal, kirja- ja taevatähevaatlused, Maa- ja Ööülikool, sukelteadlaste auravad katsed. Tähejooks Toomemäel ja AHHAH uue maja nurgakivi asetamine.
  - Tallinnas: teadusmuusika, planeedijooks, AHHAH planetaarium, salalaborid, allmaakatsetused.
  - Narvas: teaduskohvik, AHHAH planetaarium, teleskoop.
  - Pärnus: AHHAH töötoad, teaduskohvik, öised basseinoengud.
  - Rakveres: alkeemia ja arheoloogia, salateaduste tuba.
  - Viljandis: teaduskohvik, robotika-töötuba.
  - Valgas: AHHAH töötoad, teadusteater.
  - Tõraveres: stellaarium.

Tegemist oli üleeuroopalise projekti *Researchers' Night 2009* alamprojektiga, mida rahastas Euroopa Komisjon.
- 19. ja 20. sept toimus Tartus Tähe tänava füüsikahoones teadushariduslik kogupereüritus Tähe Perepäevad ehk TäPe 2009. Seekordne TäPe oli juubelihõnguline – esimene TäPe toimus kümme aastat tagasi, 1999. a. Traditsiooniliselt said külastajad vaadata teadusteatrit, rakette lennutada, traadijuppe painutada, seintele nägusid joonistada. Kohal olid ka tühjad tunnid, vedel lämmastik ja mõningane kogus paukgaasi. Igaüks võis endale ehitada eriti efektiivse elektrilise ärataja, toimusid töötoad. TäPet korraldavad Tartu Ülikooli loodus- ja tehnoloogiateaduskonna tudengid.
- Oktoobrist alates ilmub Eesti Füüsika Seltsi veebiajakiri. See on kokkuvõtte EFS-iga seotud kuutegemistest ja sisaldab ka ühe hiljuti ilmunud Eesti füüsiku artikli tutvustust. Kuukiri saadetakse EFS liikmetele elektronpostiga iga kuu lõpus. EFS (veebiajakirja) kuukirjade arhiivi saab näha siit: [www.fuusika.ee/omad/kuukiri.php](http://www.fuusika.ee/omad/kuukiri.php)
- Novembris alustas populaarteaduslik ajakiri „Tarkade Klubi“ Tallinnas igakuist teaduskohvikute sarja, et pakkuda teadushuvilistele regulaarset võimalust vestelda Eesti teadlastega päevakajalistel ja põnevatel teemadel. Sarja avaüritusel pealkirjaga „Masinad võtavad võimu“ seletasid Juri Gavšin, Tanel Tammet ja Kuldar Taveter, kuidas lennukite juhtimine on libisenud inimeste käest masinatele. 1. det

toimus teine teaduskohvik pealkirjaga „Tere tulemast nanosajandisse“. Lektoriteks olid KBFI vanemteadur Kaja Kasemets *in vitro* toksikoloogia uurimisrühmast ja Rünno Lõhmus Tartu Ülikooli Füüsika Instituudist. Räägiti nanotehnoloogia võimalustest ja ohtudest.

- 2.–11. dets toimus Aserbaidžaanis VI rahvusvaheline loodusteaduste olümpiaad (IJSO). Hõbemedali sai Jaan Toots (Tallinna Tehnikagümn, 9. kl), pronksmedalid Kaur Aare Saar (Tallinna Inglise Kolledž, 9. kl), Lona-Liisa Sutt (Miina Härma Gümn, 9. kl), Sandra Schumann (Tallinna Reaalkool, 9. kl), Taivo Pungas (Tallinna Reaalkool, 10. kl), Kristo Ment (Pärnu Koidula Gümn, 9. kl). Võistkonna juhendajad: TÜ LOTE lektor Karin Hellat, Haridus- ja Teadusministeeriumi nõunik Ülle Kikas ja TÜ üliõpilane Rudolf Bichele.
- 4. dets toimus TTÜ Spordihoones traditsiooniline robotiehitamise võistlus Robotex. Seekord mängisid robotid jalgpalli. Esikoha sai ITK Robootikaklubi robot „Troller-Roller“ (Margus Ernits, Allan Vein, Janek Sarjas, Madis Toom, Martin Müürisepp ja Viljar Vahe-maa), teiseks tuli TTÜ Robotiklubi robot „Mäger“ (Indrek Tubalkain, Ronald Tammepõld ja Andres Vahter) ning kolmandaks ITK Robootikaklubi robot „Digipallur“ (Margus Ernits, Valdur Kaldvee, Kristjan Mölder ja Renno Reinurm). Samal üritusel jagati auhinnad SA Archimedese poolt teistkordselt korraldatud riikliku õpilasleiu-tajate konkursi tublimatele. Konkursile „Hoiame kokku“ laekus 650 tööd, parimate tööde vahel jagati auhinda 400 000 krooni väärtuses. Enamik konkursitöid olid leiutiste joonistused koos selle eesmär-gi ja teostuse kirjeldusega, paarkümmend neist ka realselt valmis ehitatud.
- Läbi kogu aasta organiseeris Eesti Füüsika Selts programmi GLOBE Eesti tegevust. Toimus GLOBE uurimistöde konkurs (laekus 39 tööd), korraldati mitmeid üritusi: 13.–15. aug suvelaager Klooga-rannas (osales 120 õpetajat ja õpilast), 25.–26. sept õpilaskonverents Saaremaa Ühisgümnaasiumis ning 13.–14. nov õpetajate seminar Tartus.

## RAHVUSVAHELINE ASTRONOOMIA-AASTA

Aasta 2009 oli ÜRO otsusega kuulutatud rahvusvaheliseks astronoomia-aastaks (RAA2009), tähistamaks astronoomia panust ühiskonda ja kultuuri ning 400 aasta möödumist esimese astronoomilise teleskoobi ehitamisest Galileo Galilei poolt. Ürituse põhieesmärgiks oli huvi äratamine astronoomia ja üldse teaduse vastu, eriti noorte seas. RAA2009 initsiaatoriks ja põhiliseks koordineerijaks oli Rahvusvaheline Astronoomia Unioon (IAU). Globaalsed üritused olid jagatud 12 projektiks, nn nurgakivideks. Nendeks olid:

- 100 tundi astronoomiat
- Galileoskoop
- Kosmiline päevik
- Portaali Universumisse
- Naisastronoomid
- Pimedate taeva teadvustamine
- IAU/UNESCO astronoomia- ja maailmapärand
- Galileo õpetaja treeningprogramm
- Universumi teadvustamine
- Maalt Universumisse
- Astronoomia arendamine globaalselt
- Galileo ööd

RAA2009 projektiga ühines 148 riiki, Eestis oli RAA2009 ürituste koordineerijaks TO vanemteadur Kalju Annuk. Üritusi korraldasid Tartu Observatoorium, Tartu Tähetorni Astronoomiaring, AHHA keskus, ühendus „Ridamus“, MTÜ Stellaarium jt. Rahvusvahelise astronoomia-aasta raames toimunud arvukate rahvusvaheliste ja kohalike ürituste kohta leiate lisainfot RAA2009 globaalsel veebilehel [www.astronomy2009.org](http://www.astronomy2009.org) ja Eesti lehel [www.astronomy2009.ee](http://www.astronomy2009.ee)

- Eestis toimusid kogu aasta vältel avalikud vaatlusõhtud:
  - Tõraveres 5.–8.02, 5.–8.03, 2.–5.04, 30.04–3.05, 4.09, 22.–24.10
  - Tartu Tähetornis 2.–3.02, 17.02, 2.–3.03, 16.–19.03, 31.03–2.04, 7.04, 28.04
  - Vaatlusõhtud ülemaailmse ürituse „100 tundi astronoomiat“ raames 2.–5.04 Tõraveres, Tartus, Tallinnas, Sindis, Türil, Valgas, Viljandis, Rakveres
  - Rahvusvahelise astronoomia-päeva puhul Savernas 2. mail

- Retlas (Türi vald) 4.05 ja 8.05, organiseeris Sven-Erik Enno (TÜ)
- Teadlaste Öö vaatlusõhtud 25. sept Tõraveres, Tartus ja Narvas
- Avalikud vaatlusõhtud „Galileo ööd“: Tõraveres 22.–24.10, Otepää Kultuurikeskuses 22.10, Rannu Rahvamajas 23.10, Tallinnas Linna-  
halli juures 24.10
- Tartu Tähetornis (TÜ ajaloo muuseumi põhjapoolses tornis)  
27.–28.10, 3.11, 23–24.11
- Astronoomiliste piltide näitused aastal 2009:
  - 1.–28. veebr Tartu Ülikooli Raamatukogu, Tartu
  - 16.–31. märts Tallinna Ülikool, Tallinn
  - 1.–30. apr Tartu Kaubamaja, Tartu
  - 12. juuni–1. juuli Eesti Rahvusraamatukogu, Tallinn
  - 7. juuli–26. aug SPA Estonia, Pärnu
  - 1.–30. sept Tartu Ülikooli Narva Kolledž, Narva
  - 6. okt–15. nov Võrumaa Muuseum, Võru
  - 17. nov–31. dets Eesti Kirjandusmuuseum, Tartu
- Aasta algul kuulutati välja kooliõpilaste joonistuste võistlus, millele olid oodatud astronoomiaga ja tähistaevaga seotud pildid. Tööde esitamise tähtajaks oli 10. mai ja võistlus toimus kolmes vanuseklassis: 1.–4. klass, 5.–9. klass, 10.–12. klass. Võistlusele saabus üle 200 joonistuse, preemiad said:
  - 1.–4. klass:
    - \* I preemia: Lisette Lepp (Tarvastu Gümnn),  
Kristiina Linde (Saverna Põhikool)
    - \* II preemia: Eliise Elken (Tartu Kunstigümnn),  
Cärol Pärtel (Tallinna Lilleküla Gümnn)
    - \* III preemia: Kadri Kalve (Kanepi Gümnn),  
Annika Viiksaar (Kadrina Kunstikool)
    - \* Eripreemia: Võnnu Keskkooli III klassi ühistöö, Ave Vilpo (Tartu Kunstigümnn), Eliise Pajula (Tali Põhikool), Paula Kingissepp (Tali Põhikool), Liisi Tamm (Saverna Põhikool), Marius Paavel (Tallinna 21. Kool)
  - 5.–9. klass:
    - \* I preemia: Inger Padari (Ilmatsalu Põhikool),  
Anastassia Malkova (Kanepi Gümnn),  
Silvia Sigrid Sillaots (Tartu Kommertsgümnn)
    - \* II preemia: Maarja Liis Stadnik (Kadrina Kunstikool),  
Geneli Shonja (Ilmatsalu Põhikool)

- \* III preemia: Viivika Veski (Kanepi Gümnn)
- \* Eripreemia: Taimo Priinits (Tarvastu Gümnn), Kevin Lippe (Pärnu Ülejõe Gümnn), Sanna Siliksaar (Saverna Põhikool), Karmel Mänd (Tallinna Lilleküla Gümnn), Siret Lõinus (Tarvastu Gümnn), Guido Välja (Tarvastu Gümnn)
- 10.–12. klass:
  - \* I preemia: Oksana Verbenets (Kehra Gümnn), Jaanika Linde (Pärnu Ülejõe Gümnn)
  - \* II preemia: Jaanika Linde (Pärnu Ülejõe Gümnn)
  - \* III preemia: Tiina Siman (Pärnu Ülejõe Gümnn)
  - \* Eripreemia: Tairi Toomsoo (Tarvastu Gümnn), Enelin Anvelt (Pärnu Ülejõe Gümnn)
- Paralleelselt joonistuste võistlusega toimus kooliõpilaste esseede ja lühiuurimuste võistlus. Võistlus toimus samuti kolmes vanuseklassis.
- Astronoomid Tõnu Viik, Laurits Leedjärv, Elmo Tempel, Tõnu Tuvikene, Alar Puss ja Kalju Annuk käisid esinemas nii koolides ja asutustes kui ka mitmesugustel üritustel laiale kuulajaskonnale mõeldud loengute sarjaga astronoomiast ja kosmosest.
- Ilmus astronoomiat tutvustavate kirjutiste sari ajakirjas „Horisont“.
- Jätakuvalt külastas Tõravere palju ekskursioone: 233 gruppi rohkem kui 5100 huvilisega.
- Traditsiooniliselt peeti Tartu Observatooriumis astronoomialoenguid Nõo Reaalgümnaasiumi 12. klasside õpilastele (K. Annuk, L. Leedjärv, M. Ruusalepp, E. Saar, T. Viik).
- Toimused astronoomia-aastale pühendatud saated ERR Vikerraadio programmides Huvitaja ja Keskööprogramm (KÖP), samuti Kuku Raadios, Pereraadios ning ETV programmides Terevisioon, Pealtnägija, Osoon ja Saame kokku Tomi juures.
- Tartu Observatooriumi teadlased andsid arvukalt intervjuusid BNS-ile, raadiole ja televisioonile (neist enim Ain Kallis – 43, Tõnu Viik – üle 30 ja Laurits Leedjärv – 14 korda).
- Tartu Observatooriumi tegevuse tutvustamiseks alustati koduleheküljel [www.aai.ee](http://www.aai.ee) pressiteadete ja teadusuudiste avaldamist.
- Taavi Tuvikene lõi Eesti Astronoomia Seltsi egiidi all keskse astronoomia-alase veebilehe [www.astronoomia.ee](http://www.astronoomia.ee). Veebilehe olulisemateks osadeks on uudiseid ja teateid kajastav ajakiri „Vaotleja“, sündmuste kalender, Eestiga seotud pilte avaldav „Astronoomiapildi“ rubriik ning astronoomiahuviliste infovahetuseks mõeldud foorum.

- Tartu Observatooriumi Publikatsioonide väljaanded 1–30 aastatest 1817–1940 on nüüd PDF formaadis kättesaadavad Tartu Observatooriumi Virtuaalses Muuseumis [www.aai.ee/muuseum/Main/HTML/](http://www.aai.ee/muuseum/Main/HTML/). Rohkem kui 8000 lehekülge ajaloolisi dokumente digitaliseeris TO vanemteadur Jaan Pelt.
- Tartu Tähetorni astronoomiaringi astronoomialoengud toimusid regulaarselt iga kuu esimesel, kolmandal (ja viiendal) teisipäeval Tähetorni läänesaalis, alates septembrist Tartu Ülikooli ajaloo muuseumi konverentsisaalis. Seoses tähetornis toimuvate restaureerimis- ja remonttöödega on ta ajutiselt külastamiseks suletud (kavandatud avada 2010. a lõpus). Võimalusel toimuvad tähistaeva vaatlused muuseumi vaatlusplatvormil. Vt [www.obs.ee](http://www.obs.ee)
- Astronoomia-aasta puhul andis Eesti Post välja 2 x 5-margilistesse poognatesse trükitud kaks 9-kroonilist marki. Markidel on esitatud Eesti astronoomide suuremaid saavutusi – galaktikates oleva tu-meaine ning Universumi suuremastaabilise struktuuri avastamist. Mõlemad avastused tegi Jaan Einasto poolt juhitud töörühm Tartu Observatooriumis. Esmäümbrikul on kujutatud Tartu Tähetorni muuseumis asuvat Fraunhoferi refraktorit, mis omal ajal oli maailma kõige kvaliteetsem ja suurem refraktorteleskoop.
- 13. veebr tutvustati Tartu Näituste Messikeskuses toimuval Haridusmessil kosmosehariduse omandamise võimalusi Eestis ja välismaal. Jagati informatsiooni astronoomia ja rahvusvahelise astronoomia-aasta kohta.
- 26. veebr avati Energiakeskuses Eesti esimene täisdigitaalne kuppelplanetaarium Põhjatäht. Planetaariumi läbimõõt on 10 meetrit ja korraga mahub sellesse loengut kuulama kuni 30 inimest.
- 8. märtsil toimus TÜ Teaduskoolis astronoomia lahtine võistlus, millest võttis osa 13 noorema ja 18 vanema rühma õpilast. Nooremas rühmas sai I koha Kaur Aare Saar (Tallinna Inglise Kolledž), II koha Sandra Schumann (Tallinna Reaalkool) ja III koha Jaan Toots (Tallinna Tehnikagümn). Vanemas rühmas sai I koha Jonatan Jõks (Tallinna Reaalkool), II koha Erik Tamre (Tallinna Reaalkool) ja III koha Robert Arus (Tallinna Reaalkool).
- 16.–28. märtsini toimus pimeda taeva teadvustamise nurgakivi-projekti raames üritus *GLOBE at Night*, mille käigus kutsuti kõiki inimesi maailmas hindama öötaeva heledust oma kodukohas. Ürituse eesmärgiks oli teadvustada tehisvalgustuse mõju keskkonnale ja tutvus-



tada võimalusi asjatult kulutatud energia vähendamiseks. Vaatlusjuhendi ja olulisemad abimaterjalid tõlkis eesti keelde Tõnis Eenmäe, vt [www.globe.ee/gan](http://www.globe.ee/gan)

- 20.–22. märtsini toimus Rõuge rahvamajas rahvusvahelisele astronoomia-aastale pühendatud konverents „Õöbikuoru Tähed 2009“. Populaarteaduslikul foorumil esinesid loengutega Tõnu Viik, Tõnu Tuvikene, Laurits Leedjärv, Elmo Tempel, Urmas Sisask, Mare Kõiva. Nii õhtul kui päeval toimusid taevavaatlused erinevate teleskoopidega. Lisaks neile tegevustele esinesid konverentsi raames helilooja Urmas Sisask ja tema tütar, pianist Tiiu Sisask.
- 25. märtsil korraldasid Tartu Observatoorium ja Eesti Teaduste Akadeemia konverentsi „200 aastat Universumi uudistamist Eestis“ tähistamaks rahvusvahelist astronoomia-aastat. Konverents toimus Tallinnas Teaduste Akadeemia majas. Ettekannetega esinesid Tõnu Viik, Laurits Leedjärv, Kalju Annuk ja Elmo Tempel, musitseeris Urmas Sisask. Pärast pidulikku osa toimus Eesti Astronoomia Seltsi aastakoosolek.
- 26. märtsist–27. sept oli TÜ ajaloo muuseumis rahvusvahelisele astronoomia-aastale pühendatud näitus „Struveta poleks satelliittelevisiooni“. Näitus aitas vaatajal sammuda läbi olulisemad etapid teel, mis on teinud võimalikuks kosmosereisid, kaugseire, satelliittelevisiooni ja GPSi – protsessi, millesse on andnud omapoolse olulise panuse ka Eesti teadlased. Näitusel sai näha esemeid, millega astronoom F.G.W. Struve mõõtis meridiaanikaart ning täpsustas seeläbi Maa mõõtmeid ja kuju. Näidati ka kosmose-teleradiomeetreid ja lunoidivaatlusjaama. Näitusega kaasnes põhikoolidele suunatud pedagoogiline programm „Muutuv tähistaevas“. Näituse koostasid Urmet Paloveer ja Lea Leppik.
- 30. märtsil esines TÜ ajaloo muuseumi konverentsisaalis populaarteaduslikul teeõhtul „Huvitavat teadusest ja elust“ Tõnu Tuvikene teemal „Kuulendude minevikust ja tulevikust“.
- 2.–5. apr korraldati üle Eesti vaatlusõhtud globaalse nurgakivi-ürituse „100 tundi astronoomiat“ raames. Ürituse eesmärgiks oli näidata võimalikult paljudele inimestele üle kogu maailma tähistaevast läbi teleskoopide. Enam kui 100 maailma riigis toimus neil päevil 2370 erinevat üritust – vaatlused, loengud, etendused, filmiõhtud jne. 24 tunni jooksul sai vaadata reaalses veebiülekanal reaalsetest astronoomilistest vaatlustest 80 erinevas observatooriumis. Nende veebi-

ülekannete arhiivi ja info mitmekesiste ürituste kohta leiate veebilehelt [www.100hoursofastronomy.org](http://www.100hoursofastronomy.org)

- Dokumentaal- ja väärtfilmiõhtute sarjas „OoofilmiõhtuooO“ näidati filme:
  - 14. apr „100 greatest discoveries: astronomy“, juhatas sisse ja kommenteeris Elmo Tempel (TO)
  - 15. okt „The View from the Center of the Universe“, kommenteeris Tõnu Viik (TO)
- 18. apr toimusid rahvusvahelise muinsuskaitse päeva puhul ekskursioonid Tartu Ülikooli ajaloo muuseumis ja Tartu Tähetornis. Giidi juhatusel sai tutvuda astronoomianäitusega „Struveta poleks satelliit-televisiooni“ ja osa saada planetaariumietendusest.
- 4.–15. maini oli Prantsuse teaduskuu raames Tallinnas Energiakeskuses avatud astronoomiale pühendatud näitus.
- 18. mail toimus Tartu Ülikooli Kohvikus astronoomialoeng „Siin, seal ja igal pool“. Esinejaks oli dr Radu Stoica (Université Lille 1, Prantsusmaa). Üritus toimus Prantsuse teaduskuu raames.
- 18.–27. maini sai teaduskeskuses AHHA vaadata astronoomiale pühendatud näitust „Astro“.
- 23. mail toimus Kohtla-Järvel TTÜ Virumaa Kolledži astronoomiapäev. Loenguid lugesid külalislektorid Tartu Observatooriumist Tõnu Viik, Laurits Leedjärv ja Kalju Eerme.
- 31. mail korraldas teadusajakirjanik Rein Veskimäe Vihasoo rahvamajas küla teaduspäeva. Rahva ette astusid Eesti Teaduste Akadeemia akadeemik Ene Ergma, aastaid Tartu Observatooriumi juhtinud Tõnu Viik, helilooja ja pianist Urmas Sisask ning Eesti Füüsika Seltsi teadusbussi Suur Vanker noored füüsikud Kaido Reivelti juhtimisel. Vaheajal oli võimalus vaadata Päikest läbi rahvamaja ette üles seatud teleskoobi, mille tõi kaasa ja seadis üles harrastusastronoom Martin Vällik.
- 11.–18. juulini toimus Järvemaal Tagametsas skautide ja gaidide suur-laager „Tähemets“, kus telkis 800 gaidi ja skauti Eestist, mujalt Euroopast ja kaugemaltki. Suurlaagri teema oli täheteadus, mis haakus rahvusvahelise astronoomia-aastaga. Laagrilised said öösiti koos Tartu Observatooriumi astronoomidega teleskoobiga tähistaevast uurida, laagris oli avatud planetaarium ning tegutseti tegevusväljadel ehk „Päikesesüsteemi planeetidel“. Vt [www.suurlaager.ee](http://www.suurlaager.ee)
- 12.–16. aug toimus Tõraveres astronoomiahuviliste XIV üle-Eesti kokkutulek, kus osales ca 100 inimest. Kokkutuleku juhtteemaks oli „400

aastat teleskoope ja 200 aastat taeva uurimist Eestis“. Kavast olid taeva-vaatlused, loengud ja ekskursioonid. Räägiti kaugseirest ja amatöör-astronoomiast. Vt [www.obs.ee/kokkutulekud](http://www.obs.ee/kokkutulekud)

- Septembrist novembrini kestis EENeti ja Tartu Observatooriumi koostöös korraldatud arvutijoonistuste võistlus „Uudista Universumit“. Viieliikmeline žürii valis parimad tööd välja neljas vanuserühmas:
  - Kuni 10-aastased joonistajad: I koht – Maria Guljavina (10 a), II koht – Jelena Tosjatova (10 a, Narva Pähklime Gümnaasium, juh Svetlana Jefimova), III koht – Oleg Markelov (10 a, Narva Pähklime Gümnaasium, juh Svetlana Jefimova)
  - 11–13 aastased joonistajad: I koht – Helena Karu (12 a, Nõmme Erakool), II koht – Artur Tarassevski (11 a, Kohtla-Järve Tammiku Gümnaasium, juh Irina Gritsinenko), III koht – Janar Aesma (12 a, Jämeda Kool)
  - 14–18 aastased joonistajad: I koht – Jelizaveta Sestakova (18 a, Narva Humanitaargümnaasium), II koht – Jaanus Jaggo (18 a, Nõo Realgümnaasium), III koht – Tõnis Jakobsoo (15 a, Tartu Karlova Gümnaasium, juh Ako Rääbis)
  - Vanemad kui 18-aastased joonistajad: I koht – Maarja Andla (21 a, Tartu Kõrgem Kunstikool), II koht – Ruudu Rimmelgas (25 a), III koht – Maria Evestus (23 a, Tartu Kõrgem Kunstikool).
  - Parimaks juhendajaks osutus Svetlana Jefimova Narva Pähklime Gümnaasiumist, kelle juhendatud joonistajate piltidest jõudis lõppvõistlusele 31 pilti. Järgnesid Aime Peever Rapla Vesiroosi Gümnaasiumist 20 ja Vlada Teus-Miller Karjamaa Gümnaasiumist 17 lõppvõistluse pildi juhendajatena. Võidutöid saab näha veebilehel [joonistaja.eenet.ee](http://joonistaja.eenet.ee)
- Septembris alustas ilmutumist astronoomiateemaline veebisaade (*podcast*), milles tutvustatakse tähistaevast ja räägitakse huvitavatest teemadest astronoomias: [www.astronoomia.ee/minutid](http://www.astronoomia.ee/minutid)
- 24. sept toimus Tartus teaduskommunikatsiooni konverents „Tähe-teadlus: astroloogiast astronoomi pilgu läbi“.
- 24. sept–24. okt oli Tartu Linnaraamatukogu II korruse näitusruumis (Kompanii 3/5) avatud rahvusvahelisele astronoomia-aastale pühendatud raamatunäitus „200 aastat Universumi uurimist Eestis“.
- 2. okt toimus Tartu Linnaraamatukogu saalis loeng-kohtumisõhtu, külas oli akadeemik Ene Ergma. Juttu oli nii tähefüüsikast kui Eesti võimalusest saada kosmoseriigiks.

- 22.–24. okt korraldati üle maailma avalikke vaatlusõhtuid ühtse nimetusega „Galileo ööd“ (vt [www.galileannights.org](http://www.galileannights.org)). Eesmärgiks oli näidata võimalikult paljudele inimestele seda, mida nägi 400 aastat tagasi Galileo Galilei oma esimeste teleskoopidega. Eestis toimusid vaatlusõhtud Tõraveres, Otepääl, Rannus ja Tallinnas.
- 8.–16. nov toimus Hiinas XIV rahvusvaheline astronoomiaolümpiaad (IAO). II diplomi said Sandra Schumann (Tallinna Reaalkool, 9. kl) ja Jaan Toots (Tallinna Tehnikagümn, 9. kl). III diplomi said Kadi Liis Saar (Tallinna Reaalkool, 11. kl) ja Erik Tamre (Tallinna Reaalkool, 10. kl). Eesti võistkonna juhendajad olid Eesti Maaülikooli dotsent Jaak Jaaniste ja TÜ FI infotehnoloogia peaspetsialist Tõnis Eenmäe.
- 22. nov esines ETV saates Tähelaev akadeemik Jaan Einasto.
- 17.–18. dets toimus Tartus Eesti Kirjandusmuuseumis 53. Kreutzwaldi päevade teaduslik konverents, mille üldteemaks oli tähistaevas ja kosmos.
- Detsembris ilmus Tähetorni Kalender 2010 (86. aastakäik) ja juba traditsiooniline Tähistaeva Kalender 2010.

Kroonika koostasid Helle Kaasik (TÜ FI), Anna Aret (TO) ja Piret Kuusk (TÜ FI). Andmeid andsid Henn Voolaid (TÜ koolifüüsika keskus), Tõnu Laas (TLÜ) ja Maarja Grossberg (TTÜ). Andmed ETF uurimistoetuste kohta pärinevad ETISest ([www.etis.ee](http://www.etis.ee)). Andmed sihtfinantseeritavate teadusteemade kohta pärinevad ETISest ning Haridus- ja Teadusministeeriumi koduleheküljelt [www.hm.ee](http://www.hm.ee). Kasutatud on ka veebilehti [www.ahhaa.ee](http://www.ahhaa.ee), [www.akadeemia.ee](http://www.akadeemia.ee), [www.archimedes.ee](http://www.archimedes.ee), [www.astronoomia.ee](http://www.astronoomia.ee), [www.astronomy2009.ee](http://www.astronomy2009.ee), [www.eitsa.ee](http://www.eitsa.ee), [www.energiakeskus.ee](http://www.energiakeskus.ee), [www.fysika.ee](http://www.fysika.ee), [www.robotex.ee](http://www.robotex.ee), [www.ttkool.ut.ee](http://www.ttkool.ut.ee), [www.ut.ee](http://www.ut.ee) jt.

# VIHIKUTE „FÜÜSIKA“ 1973–1987 JA EESTI FÜÜSIKA SELTSI AASTA- RAAMATUTE 1989/90–2009 KOONDSISUKORD

## EESTI FÜÜSIKA SELTSI AASTAPREEMIA LAUREAATIDE ETTEKANDED

- Aarik, Jaan.** Aatomkihtsadestamine: alusuuringutest rakendusteni (EFS aastapreemia 2005 laureaadi ettekanne). // EFS aastaraamat 2005, 37–56.
- Heinsalu, Els.** Difusioonist jõuväljades (EFS aastapreemia 2009 laureaadi ettekanne). // EFS aastaraamat 2009, 62–92.
- Hižnjakov, Vladimir.** Spontaansed ja stimuleeritud kahefootonilised protsessid aegsõltuvas keskkonnas (EFS aastapreemia '95 laureaadi ettekanne). // EFS aastaraamat 1995, 23–33.
- Kaarli, Rein.** Footonkaja ja spektraalsälgatavate materjalide rakendusvõimaluste eksperimentaalne uurimine optilises infotöötluses ja spektroskoopias (EFS aastapreemia '93 laureaadi ettekanne). // EFS aastaraamat 1993, 30–40.
- Kalda, Jaan.** Füüsikaväline füüsika: kompleksüsteemid ja pehmis (EFS aastapreemia 2007 laureaadi ettekanne). // EFS aastaraamat 2007, 64–75.
- Kristoffel, Nikolai.** Lokaalsetest struktuursetest faasisiiretest (EFS aastapreemia 2000 laureaadi ettekanne). // EFS aastaraamat 2000, 13–22.
- Liidja, Georg.** Krüoogenika ja optiline spektroskoopia (EFS aastapreemia '94 laureaadi ettekanne). // EFS aastaraamat 1994, 33–41.
- Lõhmus, Ants.** Teravikmikroskoopia osast nanotehnoloogias ja mis meil sellega asja on (EFS aastapreemia 2001 laureaadi ettekanne). // EFS aastaraamat 2001, 47–58.
- Mankin, Romi; Ain Ainsaar.** Trihhotoomne müra ja stohhastiline transport (EFS aastapreemia 2002 laureaadi Romi Mankini ettekanne). // EFS aastaraamat 2002, 29–37.

- Peet, Viktor.** Mittegaussilised laserikimbud mittelineaarses optikas (EFS aastapreemia 2003 laureaadi ettekanne). // EFS aastaraamat 2003, 13–27.
- Realo, Enn.** Kiired siirdenähtused Mössbaueri spektroskoopias ja tuu-mapolariton. (EFS aastapreemia '92 laureaadi ettekanne). // EFS aastaraamat 1992, 143–150.
- Saar, Enn.** Universumi suuremastaabiline struktuur (EFS aastapreemia 2006 laureaadi ettekanne). // EFS aastaraamat 2006, 37–62.

## FÜÜSIKATEADUS

- Aabloo, Alvo; Aksel Haav, Harri Tipp, K. Truus.** Agarooši röntgenograafilisest uurimisest. // EFS aastaraamat 1989/90, 89–97.
- Aarik, Jaan; Jüri Lembra, Hele Siimon.** Binaarühendite kasvumehhanismist aatomkihtepitaksia meetodil. // EFS aastaraamat 1989/90, 81–85.
- Ainsaar, Ain; Ilmar Ots.** 1979. aasta Nobeli füüsikapreemia laureaadid (S. L. Glashow, A. Salam ja S. Weinberg). // Füüsika 1979, 3–8.
- Ainsaar, Ain.** Neutriino massi mõõtmisest. // EFS aastaraamat 1994, 110–117.
- Ainsaar, Ain – vt R. Mankin (EFS aastapreemia 2002 laureaadi ettekanne). // EFS aastaraamat 2002, 29–37.
- Aints, Märt – vt T. Plank. // EFS aastaraamat 2000, 40–50.
- Aksela, Seppo – vt E. Nõmmiste. // EFS aastaraamat 1995, 34–54.
- Alles, Harry.** Ülivoolav tahke heelium? // EFS aastaraamat 2007, 76–84.
- Allikas, R.** Kõrgtemperatuurse ülijuhtivuse energiasalvestina rakendamise probleeme. // EFS aastaraamat 1989/90, 86–88.
- Ausmees, Andrus; Mart Elango, Arvo Kikas, Ergo Nõmmiste.** Esimesi tulemusi Füüsika Instituudi ja Lundi Ülikooli koostööst röntgenspektroskoopias. // EFS aastaraamat 1989/90, 101–107.
- Ausmees, Andrus – vt S. Svensson. // EFS aastaraamat 1995, 55–69.
- Avarmaa, Tea – vt A. Stolovitš. // EFS aastaraamat 1994, 78–87.
- Avarmaa, Tea – vt R. Kink jt. // EFS aastaraamat 1997, 104–111.
- Avaste, Olev; Kalju Eerme, Uno Veismann.** Maapinna ja atmosfääri uuringud kosmosest AAI-s. // EFS aastaraamat 1989/90, 43–49.
- Eerme, Kalju – vt O. Avaste jt. // EFS aastaraamat 1989/90, 43–49.
- Eerme, Kalju.** Stratosfääri osoonikihi muutlikkus ja Rossby lained. // EFS aastaraamat 1997, 150–158.

- Einasto, Jaan.** Kaos ja kord Universumis. // EFS aastaraamat 1997, 85–93.
- Elango, Mart.** Nobeli füüsikalaureaadid '81 (K.M. Siegbahn). // Füüsika 1981, 11–13.
- Elango, Mart – vt A. Ausmees jt. // EFS aastaraamat 1989/90, 101–107.
- Elango, Mart.** Resonantsergastusega Auger' spektroskoopia. // EFS aastaraamat 1993, 77–92.
- Ergma, Ene; Ivar Piir.** Neutronitähed ja Nobeli füüsikapreemia (R.A. Hulse ja J.H. Taylor) // EFS aastaraamat 1994, 42–54.
- Erni, D. – vt O. Ollikainen jt. // EFS aastaraamat 1995, 84–95.
- Feldbach, Eduard – vt A. Luštšik jt. // EFS aastaraamat 1995, 70–83.
- Filippova, Irina – vt K. Kepler. // EFS aastaraamat 2004, 64–75.
- Froelich, Piotr – vt J. Wallenius. // EFS aastaraamat 1996, 42–48.
- Frorip, Aleksander – vt A. Luštšik jt. // EFS aastaraamat 1995, 70–83.
- Gramann, Mirt.** Suureskaalalised liikumised Universumis. // EFS aastaraamat 1997, 94–103.
- Haav, Aksel – vt A. Aabloo jt. // EFS aastaraamat 1989/90, 89–97.
- Haljaste, Ants – vt T. Plank // EFS aastaraamat 2000, 40–50.
- Helde, Paavo; Piret Kuusk.** Kvantmehaanika ja klassikaline determinism. // EFS aastaraamat 1995, 107–129.
- Helde, Paavo.** Lõpmatused füüsikas. // EFS aastaraamat 1998, 147–154.
- Hižnjakov, Vladimir; Dmitri Nevedrov.** Quantum explosions of localized vibrations in anharmonic lattices. // EFS aastaraamat 1996, 114–129.
- Holmberg, Peter.** X-rays – risk and protection. // EFS aastaraamat 1992, 40–48.
- Holmberg, Peter – vt A. Servomaa jt. // EFS aastaraamat 1994, 149–163.
- Husainova, Irina.** Rekombinatsioonkiirguse kvantitatiivse analüüsi rakendused rakendusfüüsikas. // EFS aastaraamat 1989/90, 112–116.
- Hõrrak, Urmas – vt H. Tammet. // EFS aastaraamat 2009, 93–104.
- Iher, Hilja.** Õhu kompleksuuringud Tahkuse õhuseirejaamas. // EFS aastaraamat 2008, 55–66.
- Jõgi, Hudo.** Nobeli füüsikapreemia 1986 – mikroskoopide loojatele (E. Ruska, G. Binnig ja H. Rohrer). // Füüsika 1986, 3–8.
- Jõgi, Jaak; Rein Koch, Küllike Realo, Enn Realo.** Gammaspetspektroskoopia Eesti keskkonnauuringutes. // EFS aastaraamat 1992, 49–60.
- Kaasik, Helle; Laur Paldi.** Nobeli preemia neutriino ja tauoni avastajatele (F. Reines ja M.L. Perl). // EFS aastaraamat 1996, 24–27.

- Kaasik, Helle; Laur Palgi.** Neutrino '98 järgselt neutriino massidest ja segunemistest. // EFS aastaraamat 1998, 77–88.
- Kaasik, Marko; Rein Rõõm.** Õhusaaste hajumismudelid. // EFS aastaraamat 1995, 183–192.
- Kaasik, Marko; Mikhail Sofiev, Marje Prank, Mirjam Paales.** Keemilise ilma mudelid ja prognoos. // EFS aastaraamat 2008, 91–107.
- Keevallik, Sirje; Olavi Kärner.** Mis on Maa pilveväljas stabiilne ja kuidas seda leida. // EFS aastaraamat 1991, 72–85.
- Keevallik, Sirje.** Kasvuhooneefekt ja globaalne soojenemine. // EFS aastaraamat 1993, 126–136.
- Keevallik, Sirje.** Aluspinnas neeldunud päikesekiirguse mõõtmine satelliitidelt. // EFS aastaraamat 1994, 139–148.
- Keevallik, Sirje.** Uusimad teated kliimamuutustest ja regionaaleksperiment BALTEX. // EFS aastaraamat 1995, 152–164.
- Kepler, Kalle; Antti Servomaa, Irina Filippova.** Patsiendidoosi optimeerimine röntgenuuringutel Eesti haiglates. // EFS aastaraamat 2004, 64–75.
- Kikas, Arvo – vt A. Ausmees jt. // EFS aastaraamat 1989/90, 101–107.
- Kikas, Arvo; Rein Ruus, Agu Saar, Anti Maiste.** Resonantsergastusega Auger' spektroskoopiast röntgenkiirguse mitteeastse hajumiseni (pühendatud EFS aastapremia '96 laureaadi Mart Elango mälestusele). // EFS aastaraamat 1996, 78–96.
- Kikas, Arvo.** 50 aastat sünkrotronkiirgust ja 30 aastat eesti füüsikute tööd sünkrotronidel. // EFS aastaraamat 1998, 35–47.
- Kikas, Jaak.** Lebedevi kuldmedal Karl Rebasele. // Füüsika 1981, 16.
- Kikas, Jaak; Karl Rebane.** Foononvabad jooned, spektrite fotosälkamine ning mis sellest tänaseks saanud on. // EFS aastaraamat 1989/90, 18–42.
- Kikas Jaak.** Törts torujuttu. // EFS aastaraamat 2008, 77–86.
- Kink, Rein.** Kõrgtemperatuursete ülijuhtkristallide luminesents. // EFS aastaraamat 1992, 61–69.
- Kink, Rein – vt A. Luštšik jt. // EFS aastaraamat 1995, 70–83.
- Kink, Rein; Tea Avarmaa, Juri Maksimov, Ants Lõhmus.** Vaseaurude laser ja selle kasutamise perspektiivid nahahaiguste ravis. // EFS aastaraamat 1997, 104–111.
- Kipper, Tõnu.** Süsiniktähed galaktika halos. // EFS aastaraamat 1992, 118–129.
- Kirm, Marco – vt A. Luštšik jt. // EFS aastaraamat 1995, 70–83.
- Koch, Rein – vt J. Jõgi jt. // EFS aastaraamat 1992, 49–60.



- Konsin, Peet; Nikolai Kristoffel, Teet Örd.** Perovskiidide kõrgtemperatuurne ülijuhtivus kahetsoonilises mudelis. // EFS aastaraamat 1992, 26–39.
- Konsin, Peet.** Kõrgtemperatuurne ülijuhtivus ja elektriväli. // EFS aastaraamat 1995, 96–106.
- Konsin, Peet.** Grafiitinterkalatsioonühendite ülijuhtivuse elektron-foononmudel. // EFS aastaraamat 1996, 64–76.
- Konsin, Peet; Boris Sorkin.** Ferroelekter ja ülijuhtivus nanostruktuurides. // EFS aastaraamat 2000, 67–76.
- Konsin, Peet; Boris Sorkin.** Ferroelekter ja isotoop efektid. // EFS aastaraamat 2002, 48–57.
- Koppel, Ilmar; Uldo Mölder.** Süsinikmaailma füüsikast ja keemiast. // EFS aastaraamat 1992, 78–81.
- Korrovits, Viktor.** Ülimadalatest temperatuuridest. // Füüsika 1985, 12–18.
- Kristoffel, Nikolai.** 1987. aasta Nobeli füüsikapreemia (J.G. Bednorz ja K.A. Müller). // Füüsika 1987, 3–8.
- Kristoffel, Nikolai – vt P. Konsin jt. // EFS aastaraamat 1992, 26–39.
- Kristoffel, Nikolai.** Kristalsete dielektrikute polarisatsiooni uudest käsitlemisest. // EFS aastaraamat 1996, 57–63.
- Kristoffel, Nikolai.** Struktuurse mälu stabiilsusest mesoskoopilistes objektides. // EFS aastaraamat 1996, 107–113.
- Kristoffel, Nikolai; Pavel Rubin.** Pseudopilu tüüpi ergastuslävi kahetsoonilises ülijuhhis. // EFS aastaraamat 2000, 61–66.
- Kudu, Kalju – vt T. Plank. // EFS aastaraamat 2000, 40–50.
- Kuusk, Piret.** Kas gravitatsioonivälja kvantiseerimine on võimalik? // EFS aastaraamat 1991, 58–71.
- Kuusk, Piret.** Hawkingi kiirgus ja mustade aukude kvantmehaanika. // EFS aastaraamat 1992, 109–117.
- Kuusk, Piret – vt P. Helde. // EFS aastaraamat 1995, 107–129.
- Kuusk, Piret.** Raskusjõud tänapäeva füüsikas. // EFS aastaraamat 1996, 145–150.
- Kuusk, Piret; Madis Kõiv.** Kvantmaailma ehitus. // EFS aastaraamat 1998, 126–146.
- Kuusk, Piret; Madis Kõiv.** Aja operaator kvantmehaanikas – mis see on, kui ta on? // EFS aastaraamat 1999, 58–78.
- Kõiv, Madis – vt P. Kuusk. // EFS aastaraamat 1998, 126–146.
- Kõiv, Madis – vt P. Kuusk. // EFS aastaraamat 1999, 58–78.

- Kärner, Olavi – vt S. Keevallik. // EFS aastaraamat 1991, 72–85.
- Kärner, Olavi.** Arvutusi kliima muutlikkusest. // EFS aastaraamat 2001, 59–76.
- Käämbre, Henn.** Nobeli füüsikalaureaadid '81 (N. Bloembergen ja A.L. Schawlow). // Füüsika 1981, 3–10.
- Käämbre, Henn.** Eksoemissioon kui müra. // EFS aastaraamat 1992, 100–108.
- Käämbre, Henn.** Udukambrist kannelkambrini. // EFS aastaraamat 1993, 41–50.
- Käämbre, Henn.** Laserkülmutus tõi Nobeli preemia (S. Chu, C. Cohen-Tannoudji ja W.D. Phillips). // EFS aastaraamat 1998, 48–58.
- Käämbre, Henn.** Universumi külmim aine (2001. aasta Nobeli füüsikaauhinnast – E.A. Cornell, W. Ketterle ja C.E. Wiemann). // EFS aastaraamat 2002, 38–47.
- Laan, Matti – vt P. Paris. // EFS aastaraamat 2001, 78–87.
- Laan, Matti.** ITER – tee energiaprobleemideta maailma? // EFS aastaraamat 2009, 105–116.
- Lantto, Vilho.** Pooljuht-gaasitajurid – näide tahkistajurite ja -täiturite uuringutest Oulu Ülikoolis. // EFS aastaraamat 1992, 12–25.
- Leedjärv, Laurits.** Kahepalgelised tähed ehk sümbioos astrofüüsikas. // EFS aastaraamat 1991, 86–95.
- Leedjärv, Laurits.** Komeedi Shoemaker-Levy 9 põrge Jupiteriga ja teised kosmilised katastroofid. // EFS aastaraamat 1995, 139–149.
- Lembra, Jüri – vt J. Aarik jt. // EFS aastaraamat 1989/90, 81–85.
- Liidja, Georg.** Kiisa sündroom ja retrospektiivne odontodosimeetria. // EFS aastaraamat 1996, 151–168.
- Liidja, Georg.** Nobeli 1996. a füüsikapreemia (D.M. Lee, D.D. Osheroff, R.C. Richardson). // EFS aastaraamat 1997, 46–51.
- Liivat, Hannes – vt I. Ots. // EFS aastaraamat 2004, 46–57.
- Liivat, Hannes – vt I. Ots. // EFS aastaraamat 2008, 6–47.
- Liivat, Hannes – vt I. Ots. // EFS aastaraamat 2009, 37–52.
- Lindau, Ingolf.** X-ray free-electron lasers: scientific opportunities and technological challenges – a perspective from the Linac Coherent Light Source at Stanford. // EFS aastaraamat 2003, 28–30.
- Lipmaa, Helger.** Kvantarvutid. // EFS aastaraamat 1998, 102–125.
- Loide, Rein-Karl – vt I. Ots jt. // EFS aastaraamat 2000, 51–60.
- Lust, Enn.** Kütuseelementide ja vesinikuenergeetika hetkeseis. // EFS aastaraamat 2004, 76–78.

- Luštšik, Aleksander; Tšeslav Luštšik, Rein Kink, Eduard Feldbach, Aleksander Frorip, Marco Kirm, Indrek Martinson.** Elektronergastuste kordistamine luminesceeruvates kristallides. // EFS aastaraamat 1995, 70–83.
- Luštšik, Tšeslav – vt A. Luštšik jt. // EFS aastaraamat 1995, 70–83.
- Lõhmus, Ants – vt R. Kink jt. // EFS aastaraamat 1997, 104–111.
- Lõhmus, Jaak.** Nobeli füüsikapreemia 1980 (J.W. Cronin ja V.L. Fitch). // Füüsika 1980, 3–6.
- Lõhmus, Jaak.** Nobeli füüsikapreemia 1982 (K.G. Wilson). // Füüsika 1982, 3–8.
- Lõhmus, Jaak.** Nõrga mõju kandjad lõpuks leitud (1979. a. Nobeli füüsikapreemia juurde). // Füüsika 1983, 21–29.
- Lõhmus, Jaak.** Nobeli füüsikapreemia 1984 (C. Rubbia ja S. van der Meer). // Füüsika 1984, 3–8.
- Lõhmus, Jaak; Leo Sorgsepp.** Mitteassotsiatiivsus fundamentaalprintsiibina. // EFS aastaraamat 1991, 47–57.
- Lõhmus, Jaak; Leo Sorgsepp.** Assotsiaatorkvantimisest. // EFS aastaraamat 1992, 70–76.
- Lõhmus, Jaak; Leo Sorgsepp.** Mikrofüüsika infoaspekt. // EFS aastaraamat 1993, 67–76.
- Lõhmus, Jaak; Leo Sorgsepp.** Materia laengulis-algebralisest struktuurist. // EFS aastaraamat 1996, 28–41.
- Lõhmus, Rünno.** Skaneeriv tunnelmikroskoop FI-1. // EFS aastaraamat 1997, 112–119.
- Maiste, Anti – vt A. Kikas jt. // EFS aastaraamat 1996, 78–96.
- Maksimov, Juri – vt R. Kink jt. // EFS aastaraamat 1997, 104–111.
- Martinson, Indrek.** Paljulaenguliste ionide spektroskoopiast. // EFS aastaraamat 1991, 25–31.
- Martinson, Indrek – vt A. Luštšik jt. // EFS aastaraamat 1995, 70–83.
- Mirme, Aadu – vt P. Paris. // EFS aastaraamat 2001, 78–87.
- Männik, Rein.** XI Euroopa Molekulaarspektroskoopia Kongress. // Füüsika 1973, 3–4.
- Männik, Rein.** 1977. a. Nobeli füüsikapreemia laureaadid (P.W. Anderson, N.F. Mott ja J.H. van Vleck). Ajakirjast „Природа“ nr 1, 1978. // Füüsika 1977, 3–9.
- Männik, Rein.** NSV Liidu 1977. a. riiklikud preemiad ja NSV Liidu Teaduste Akadeemia 1977. aasta füüsika-alased preemiad. // Füüsika 1977, 9–11.

- Männik, Rein.** 1978. a. Nobeli füüsikapreemia laureaadid (P.L. Kapitsa, A.A. Penzias ja R.W. Wilson). Ajakirjadest „Вестник Академии Наук СССР“ nr 4, 1979 ja „Природа“ nr 1, 1979. // Füüsika 1978, 3–11.
- Männik, Rein.** NSV Liidu Teaduste Akadeemia 1978. a. M. Lomonosovi nimeline preemia, A. Joffe nimeline preemia ja P. Lebedevi nimeline kuldmedal. // Füüsika 1978, 12–14.
- Männik, Rein.** Eesti füüsikud – NSV Liidu teaduspreemia laureaadid (kommenteerib üks laureaatidest Jaak Kikas) // Füüsika 1986, 9–11.
- Mölder, Uldo – vt I. Koppel. // EFS aastaraamat 1992, 78–81.
- Nagel, Urmas.** Varjatud mateeria otsimine ülimaladal temperatuuril töötava osakeste detektoriga Gran Sasso maa-aluses laboratooriumis. // EFS aastaraamat 1995, 130–138.
- Nevedrov, Dmitri – vt V. Hižnjakov. // EFS aastaraamat 1996, 114–129.
- Niilisk, Ahti.** Tehisteemandi saamisest ja kasutamisvõimalustest. // EFS aastaraamat 1993, 93–104.
- Niilisk, Ahti.** Veel kord tehisteemandist. // EFS aastaraamat 1994, 118–119.
- Nõmmiste, Ergo – vt A. Ausmees jt. // EFS aastaraamat 1989/90, 101–107.
- Nõmmiste, Ergo; Seppo Aksela.** Soome kiirekanal MAX-laboratooriumis – parim ultrapehmes röntgenpiirkonnas (UPRP) töötav kiirekanal maailmas. // EFS aastaraamat 1995, 34–54.
- Nõmmiste, Ergo.** 20 aastat koostööd Rootsi rahvusliku sünkrotronkiirguse keskuse MAX-lab'i ja Füüsika Instituudi vahel. // EFS aastaraamat 2009, 16–36.
- Ollikainen, Olavi; A. Rebane, D. Erni, H. Schwoerer, U.P. Wild.** Ajaseri vaha hologrammid. // EFS aastaraamat 1995, 84–95.
- Ots, Ilmar – vt A. Ainsaar. // Füüsika 1979, 3–8.
- Ots, Ilmar.** TRÜ füüsik – avastuse kaasautor (Hilda Teral). // Füüsika 1983, 30–31.
- Ots, Ilmar – vt. A. Rosental. // Füüsika 1985, 3–11.
- Ots, Ilmar.** Coulomb'i ja Ampère'i seadused ning footoni mass. // Füüsika 1985, 19–27.
- Ots, Ilmar.** Veideraine. // EFS aastaraamat 1999, 80–87.
- Ots, Ilmar.** Kolmas Nobeli füüsikapreemia elektronõrga vastastikmõju uurijatele (G. 't Hooft ja M. Veltman). // EFS aastaraamat 2000, 23–37.
- Ots, Ilmar; Rein Saar, Rein-Karl Loide.** Kõrgemad spinnid ja güromagnetiline suhe. // EFS aastaraamat 2000, 51–60.

- Ots, Ilmar; Hannes Liivat.** Asümptootiline vabadus kvantkromodünaamikas. Nobeli 2004. a füüsikapreemia elementaarosakeste füüsika teoreetikutele (D.J. Gross, H.D. Politzer ja F. Wilczek). // EFS aastaraamat 2004, 46–57.
- Ots, Ilmar.** Relatiivne ja invariantne mass relatiivsusteoorias. // EFS aastaraamat 2007, 5–38.
- Ots, Ilmar; Hannes Liivat.** Elementaarosakeste standardmudeli ehitajad – 2008. aasta Nobeli füüsikapreemia elementaarosakeste füüsika teoreetikutele (Y. Nambu, M. Kobayashi, T. Maskawa). // EFS aastaraamat 2008, 6–47.
- Ots, Ilmar; Hannes Liivat.** Elementaarosakeste kiirendite olevikust ja tulevikust. // EFS aastaraamat 2009, 37–52.
- Paales, Mirjam – vt M. Kaasik. // EFS aastaraamat 2008, 91–107.
- Paesalu, Joel; vt – H. Sildvee. // EFS aastaraamat 1994, 95–109.
- Palgi, Laur; Hannes Uiho.** 60 aastat neutriinofüüsikat. // EFS aastaraamat 1989/90, 59–69.
- Palgi, Laur – vt H. Kaasik. // EFS aastaraamat 1996, 24–27.
- Palgi, Laur – vt H. Kaasik. // EFS aastaraamat 1998, 77–88.
- Palgi, Laur.** 2002. a Nobeli füüsikapreemiast (R. Davis, M. Koshiba ja R. Giacconi). // EFS aastaraamat 2003, 31–36.
- Paris, Peeter; Matti Laan, Aadu Mirme, Eduard Tamm.** Nanoosakeste mõõtmine, tekitamine ja kasv. // EFS aastaraamat 2001, 78–87.
- Parts, Tiia-Ene.** Õhu saastatus ja ioonid õhus. // EFS aastaraamat 1993, 105–113.
- Piir, Ivar – vt E. Ergma. // EFS aastaraamat 1994, 42–54.
- Plank, Toomas; Märt Aints, Ants Haljaste, Kalju Kudu.** Segapinge koornalahendus saastegaaside detektorina. // EFS aastaraamat 2000, 40–50.
- Prank, Marje – vt M. Kaasik. // EFS aastaraamat 2008, 91–107.
- Priiman, Reet; Lembit Visnapuu.** Tehnoloogia- ja ametiruumide siseõhu seisundist ja selle parendamisest. // EFS aastaraamat 1989/90, 50–58.
- Rannikko, Simo.** Risk management: ionizing radiation as an example. // EFS aastaraamat 1994, 88–94.
- Rannikko, Simo – vt A. Servomaa jt. // EFS aastaraamat 1994, 149–163.
- Realo, Enn – vt J. Jõgi jt. // EFS aastaraamat 1992, 49–60.
- Realo, Küllike – vt J. Jõgi jt. // EFS aastaraamat 1992, 49–60.
- Rebane, Aleksander – vt O. Ollikainen jt. // EFS aastaraamat 1995, 84–95.

- Rebane, Inna.** Analoogia ajast sõltuvate foononvabade joonte kitsenemise ja kaheastmelisel spektraalsälkamisel saadud sälkude kitsenemise vahel. // EFS aastaraamat 1997, 75–84.
- Rebane, Karl – vt J. Kikas. // EFS aastaraamat 1989/90, 18–42.
- Rebane, Karl.** Spektraalsälkamise optiliste mälude kasulikke omadusi ja probleeme. // EFS aastaraamat 1991, 32–46.
- Rebane, Karl.** Ühe lisandimolekuli spektroskoopia uusi tulemusi ja rakendusvõimalustest DNA struktuuri uurimisel. // EFS aastaraamat 1997, 61–74.
- Rosental, Arnold; Ilmar Ots.** Nobeli füüsikapreemia 1985 (K. von Klitzing). // Füüsika 1985, 3–11.
- Rosental, Arnold.** Heteroepitaksia probleeme. // EFS aastaraamat 1991, 96–102.
- Rosental, Arnold.** Optiline *in situ* sond (epitaksiaal)sadestamisel. // EFS aastaraamat 1994, 63–77.
- Rosental, Arnold; Aivar Tarre.** Nobeli füüsikapreemia 1998 (R.B. Laughlin, H.L. Störmer ja D.C. Tsui)). // EFS aastaraamat 1999, 49–57.
- Rubin, Pavel – vt N. Kristoffel. // EFS aastaraamat 2000, 61–66.
- Russak, Viivi.** Kasvuhooneefekti tugevnemine Tõraveres. // EFS aastaraamat 1993, 137–145.
- Ruus, Rein – vt A. Kikas jt. // EFS aastaraamat 1996, 78–96.
- Rõõm, Rein – vt M. Kaasik. // EFS aastaraamat 1995, 183–192.
- Rõõm, Rein.** Füüsika variatsioonprintsibid ja ilmaennustus. // EFS aastaraamat 1997, 134–149.
- Rõõm, Toomas.** Kas  $^3\text{He}/^4\text{He}$  lahustumiskrüostaat ja tuumamagnetresonants-spektromeeter sobivad kokku? // EFS aastaraamat 1989/90, 70–80.
- Saal, Margus.** Stringikosmoloogia. // EFS aastaraamat 1999, 88–98.
- Saar, Agu – vt A. Kikas jt. // EFS aastaraamat 1996, 78–96.
- Saar, Rein – vt I. Ots jt. // EFS aastaraamat 2000, 51–60.
- Saari, Peeter – vt H. Sõnajalg. // EFS aastaraamat 1996, 49–56.
- Saari, Peeter.** Iseenesest kiirenevad laineimpulsid. // EFS aastaraamat 2008, 67–76.
- Saari, Peeter.** Ülevalguskiirusega ja allvalguskiirusega, kiirenevaist ja aeglustuvaist Besseli impulssidest teoreetiku pilguga. // EFS aastaraamat 2009, 122–133.
- Sapar, Arved.** Panspektraalne astrofüüsika. // EFS aastaraamat 1993, 51–66.

- Schwoerer, H – vt O. Ollikainen jt. // EFS aastaraamat 1995, 84–95.
- Selg, Matti.** Täppisarvutuste kasulikkusest kvantmehaanikas. // EFS aastaraamat 1994, 122–138.
- Selg, Matti.** Kvantmehaanika pöördülesanne – mis see on ja kuidas seda lahendada. // EFS aastaraamat 2005, 57–70.
- Servomaa, Antti; Simo Rannikko, Peter Holmberg.** Performance and quality assurance measurements of diagnostic X-ray units. // EFS aastaraamat 1994, 149–163.
- Servomaa, Antti – vt K. Kepler. // EFS aastaraamat 2004, 64–75.
- Siimon, Hele – vt J. Aarik jt. // EFS aastaraamat 1989/90, 81–85.
- Sildvee, Heldur; Joel Paesalu.** Raskuskiirenduse uuringutest Eesti territooriumil. // EFS aastaraamat 1994, 95–109.
- Sofiev, Mikhail – vt M. Kaasik. // EFS aastaraamat 2008, 91–107.
- Sorgsepp, Leo – vt J. Lõhmus. // EFS aastaraamat 1991, 47–57.
- Sorgsepp, Leo – vt J. Lõhmus. // EFS aastaraamat 1992, 70–76.
- Sorgsepp, Leo – vt J. Lõhmus. // EFS aastaraamat 1993, 67–76.
- Sorgsepp, Leo – vt J. Lõhmus. // EFS aastaraamat 1996, 28–41.
- Sorkin, Boris – vt P. Konsin. // // EFS aastaraamat 2000, 67–76.
- Sorkin, Leon; Eero Vainikko.** ATM – võrgutehnoloogiate uus põlvkond. // EFS aastaraamat 1998, 89–96,
- Stolovitš, Andres; Tea Avarmaa.** Nõrk lokalisatsioon ja ülijuhtivus. // EFS aastaraamat 1994, 78–87.
- Svensson, Svante; Andrus Ausmees.** High-resolution synchrotron radiation excited core electron spectroscopy on molecules. // EFS aastaraamat 1995, 55–69.
- Svensson, Svante.** Auger Resonant Raman Spectroscopy at MAX: A Finnish-Swedish-Estonian Success Story. // EFS aastaraamat 2009, 6–15.
- Sõnajalg, Heiki; Peeter Saari.** Valgusimpulsid, mis levivad laienemata, kuid pole solitonid. // EFS aastaraamat 1996, 49–56.
- Šerman, Aleksei.** Laengukandjate tugevad korrelatsioonid ja kõrgtemperatuurne ülijuhtivus. // EFS aastaraamat 1996, 130–141.
- Tamkivi, Raivo.** Eesti teadlaste avastus – kuumluminestsents. // Füüsika 1981, 14–15.
- Tamm, Eduard – vt P. Paris. // EFS aastaraamat 2001, 78–87.
- Tammelo, Risto.** 80 aastat üldrelatiivsusteooriat. // EFS aastaraamat 1997, 52–60.
- Tammet, Hannes; Urmas Hõrrak.** Nanomeeterosakeste tekkimine vee pritsimisel. // EFS aastaraamat 2009, 93–104.

Tarre, Aivar – vt A. Rosental. // EFS aastaraamat 1999, 49–57.

**Tauts, Ants.** Paljuparameetrilise füüsikalise-tehnilise süsteemi stabiilsuseisundi leidmise mõningaid aspekte. // EFS aastaraamat 1989/90, 108–111.

**Tehver, Imbi.** Transformseosed valguse neeldumis- ja hajumisspektrite vahel. // EFS aastaraamat 1993, 114–124.

Tipp, Harri – vt A. Aabloo jt. // EFS aastaraamat 1989/90, 89–97.

Truus, K. – vt A. Aabloo jt. // EFS aastaraamat 1989/90, 89–97.

Uibo, Hannes – vt L. Palgi. // EFS aastaraamat 1989/90, 59–69.

**Uus, Undo.** 1983. a. Nobeli füüsikapreemia laureaadid (S. Chandrasekhar ja W.A. Fowler). // Füüsika 1983, 14–20.

Vainikko, Eero – vt L. Sorkin. // EFS aastaraamat 1998, 89–96,

Veismann, Uno – vt O. Avaste jt. // EFS aastaraamat 1989/90, 43–49.

Visnapuu, Lembit – vt R. Priiman. // EFS aastaraamat 1989/90, 50–58.

**Wallenius, Janne; Piotr Froelich.** Meta-stable states of muonic molecules and their impact on the muon catalyzed fusion ( $\mu$ CF) cycle. // EFS aastaraamat 1996, 42–48.

Wild, U.P. – vt O. Ollikainen jt. // EFS aastaraamat 1995, 84–95.

**Õrd, Jüri.** Stringiteooriate unifikatsioon. // EFS aastaraamat 1996, 97–106.

Õrd, Teet – vt P. Konsin jt. // EFS aastaraamat 1992, 26–39.

## FÜÜSIKA ÕPETAMINE

**Ganina, Svetlana; Henn Voolaid.** Füüsikaõppe efektiivsuse mõõtmine. // EFS aastaraamat 2007, 86–92.

**Ganina, Svetlana; Henn Voolaid.** Hajusandmetega ülesannete lahendamise mõju füüsikaõppe efektiivsusele. EFS aastaraamat 2008, 108–114.

**Karu, Gunnar; Henn Voolaid.** Eesti koolifüüsika eile, täna, homme. // EFS aastaraamat 1991, 110–116.

**Karu, Gunnar; Henn Voolaid, Koit Timpmann, Enn Pärtel, Jaan Susi.** Põhikooli füüsikastandardist. // EFS aastaraamat 1992, 130–139.

**Kikas, Ülle; Feliks Miller, Indrek Peil.** Kooliõpilaste keskkonnaprojekt „Tahm Eesti õhus“. // EFS aastaraamat 1995, 165–182.

**Kikas, Ülle.** GLOBE programm toetamas uuenduslikkust loodusteaduslikus koolihariduses. // EFS aastaraamat 2002, 60–66.



- Krikmann, Ott – vt H. Voolaid jt. // EFS aastaraamat 1999, 99–108.
- Luik, Aile – vt H. Voolaid jt. // EFS aastaraamat 1999, 99–108.
- Miller, Feliks – vt Ü. Kikas jt. // EFS aastaraamat 1995, 165–182.
- Peil, Indrek – vt Ü. Kikas jt. // EFS aastaraamat 1995, 165–182.
- Pärtel, Enn – vt G. Karu jt. // EFS aastaraamat 1992, 130–139.
- Pärtel, Enn – vt H. Voolaid jt. // EFS aastaraamat 1999, 99–108.
- Seeba, Mari – vt H. Voolaid jt. // EFS aastaraamat 1999, 99–108.
- Susi, Jaan – vt G. Karu jt. // EFS aastaraamat 1992, 130–139.
- Susi, Jaan – vt H. Voolaid jt. // EFS aastaraamat 1999, 99–108.
- Tamm, Urmas – vt H. Voolaid jt. // EFS aastaraamat 1999, 99–108.
- Tamm, Urmas.** Interaktiivne füüsika käsiraamat. // EFS aastaraamat 2001, 88–90.
- Tarkpea, Kalev – vt H. Voolaid jt. // EFS aastaraamat 1999, 99–108.
- Timpmann, Koit – vt G. Karu jt. // EFS aastaraamat 1992, 130–139.
- Timpmann, Koit – vt H. Voolaid jt. // EFS aastaraamat 1999, 99–108.
- Voolaid, Henn – vt G. Karu. // EFS aastaraamat 1991, 110–116.
- Voolaid, Henn – vt G. Karu jt. // EFS aastaraamat 1992, 130–139.
- Voolaid, Henn; Kalev Tarkpea, Ott Krikmann, Aile Luik, Enn Pärtel, Jaan Susi, Mari Seeba, Urmas Tamm, Koit Timpmann, Enn Ööpik.** Loodusteaduslik mõtlemisviis koolifüüsikas. // EFS aastaraamat 1999, 99–108.
- Voolaid, Henn – vt S. Ganina. // EFS aastaraamat 2007, 86–92.
- Voolaid, Henn – vt S. Ganina. // EFS aastaraamat 2008, 108–114.
- Ööpik, Enn – vt H. Voolaid jt. // EFS aastaraamat 1999, 99–108.

## FÜÜSIKA AJALUGU, PÄEVAPROBLEEMID JA KÕIK MUU

- Aaviksoo, Jaak.** Avasõna (XXIII füüsikapäevadel). // EFS aastaraamat 1993, 29.
- Aaviksoo, Jaak.** Avasõna (XXIV füüsikapäevadel). // EFS aastaraamat 1994, 32.
- Aaviksoo, Jaak.** Muutustes füüsika muutustes riikides. (Ettekanne füüsikaühingute kolmandal maailmakongressil Berliinis.) // EFS aastaraamat 2000, 5–8.
- Freiberg, Arvi.** Tartu Institute of Physics – a future-oriented retrospect. // EFS aastaraamat 1993, 4–15.

- Haller, Kristjan.** Füüsika Instituut läbi aegade. // EFS aastaraamat 1997, 4–17.
- Helde, Paavo.** Füüsika, poliitika ja raha. // EFS aastaraamat 1994, 4–15.
- Ibrus, Hans.** 20 aastat Tõravere Observatooriumi. // Füüsika 1984, 9–14.
- Jaanis, Raivo.** Milline oli aasta 2003 füüsikas ja Eesti füüsikas? // EFS aastaraamat 2003, 5–8.
- Jõgi, Hudo; Ilmar Ots.** Eesti NSV TA Füüsika Instituut 10, luminestsentsi labor 30, füüsikateadused TA Tartu asutustes 35. Küsitlusele vastavad K. Rebane, H. Keres, T. Luštšik, H. Öiglane, P. Saari. // Füüsika 1983, 3–13.
- Järv, Laur,** Bogdanovite afäär. // EFS aastaraamat 2002, 21–24.
- Kalder, Helju – vt H. Voolaid. // EFS aastaraamat 1991, 103–108.
- Kasak, Enn.** Astroloogia ajaloo Mesopotaamias. // EFS aastaraamat 1998, 60–76.
- Keres, Harald.** Avasõna (XXI füüsikapäevadel). // EFS aastaraamat 1991, 24.
- Kikas, Jaak.** Euroopa Füüsika Ühingust. // EFS aastaraamat 1992, 4–8.
- Kikas, Jaak.** Teadusuuringud ja kommunikatsioon füüsikas. Füüsikaseltside Tokyo deklaratsioon (vastu võetud füüsikaseltside ülemaailmsel kongressil 22. september 1995). // EFS aastaraamat 1995, 4–8.
- Kikas, Jaak.** Avasõna (XXV füüsikapäevadel). // EFS aastaraamat 1995, 21–22.
- Kongo, Linda; Valdur Tiit.** Loodusuurijate Selts ja täppisteaduste sektor teesillutajatena. // EFS aastaraamat 1989/90, 4–5.
- Korrovits, Viktor.** Füüsika oskussõnu. // EFS aastaraamat 1989/90, 119–124.
- Kuusk, Piret; Indrek Martinson.** Villem Koern 25.06.1903–2.11.1973. // EFS aastaraamat 1993, 16–23.
- Kuusk, Piret; Indrek Martinson.** Wilhelm Anderson (1880–1940). // EFS aastaraamat 1994, 16–28.
- Kuusk, Piret; Indrek Martinson.** Eesti füüsikud võõrsil I (Ernst Kilkson, Endel Aruja, William Muld, Evald Pääsuke, Muusa Punnis, Harry Kord). // EFS aastaraamat 1996, 4–18.
- Kuusk, Piret; Indrek Martinson.** Eesti füüsikud võõrsil II (Harald Perlitz, Aleksandra Link). // EFS aastaraamat 1997, 24–40.
- Kuusk, Piret; Indrek Martinson.** Eesti füüsikud võõrsil III (Boris Punnis, Richard Härm, Einar Hinnov). // EFS aastaraamat 1998, 6–22.
- Kuusk, Piret – vt I. Lindau. // EFS aastaraamat 2002, 7–20.

- Kuusk, Piret; Indrek Martinson.** Eesti füüsikud võõrsil IV (Hinrek Neuhaus, Uuno Öpik, Olev Mathiesen). // EFS aastaraamat 2004, 35–45.
- Kuusk, Piret.** Eesti Füüsika Selts 20. // EFS aastaraamat 2009, 59–61.
- Kõiv, Madis.** Aeg ja nool. // EFS aastaraamat 2001, 6–42.
- Käämbre, Henn.** Füüsikainstituudi promotsiooninõukogu 1976–1990. // EFS aastaraamat 1991, 10–20.
- Käämbre, Henn.** Füüsika ja kultuur. // EFS aastaraamat 1997, 18–23.
- Käämbre, Henn.** Tšeslav Luštšik – 80. // EFS aastaraamat 2008, 48–50.
- Liidja, Georg.** Eötvösi ühingu sajas juubel. // EFS aastaraamat 1991, 4–9.
- Liidja, Georg.** Eestist pärinev füüsik Uno Kopvillem (1923–1991). // EFS aastaraamat 1992, 91–99.
- Lindau, Ingolf; Indrek Martinson, Piret Kuusk.** Sohk ja füüsika. // EFS aastaraamat 2002, 7–20.
- Lõhmus, Jaak.** Harry Õiglase teadustegevusest ja raamatutest. // EFS aastaraamat 2007, 39–44.
- Martinson, Indrek – vt P. Kuusk. // EFS aastaraamat 1993, 16–23.
- Martinson, Indrek – vt P. Kuusk. // EFS aastaraamat 1994, 16–28.
- Martinson, Indrek – vt P. Kuusk. // EFS aastaraamat 1996, 4–18.
- Martinson, Indrek – vt P. Kuusk. // EFS aastaraamat 1997, 24–40.
- Martinson, Indrek – vt P. Kuusk. // EFS aastaraamat 1998, 6–22.
- Martinson, Indrek – vt I. Lindau. // EFS aastaraamat 2002, 7–20.
- Martinson, Indrek – vt P. Kuusk. // EFS aastaraamat 2004, 35–45.
- Mullari, Tanel.** Goethe värviõpetuse seosest geomeetriaga. // EFS aastaraamat 1997, 120–132.
- Müürsepp, Peeter.** 300 aastat I. Newtoni „Looduse matemaatiliste printsiipide“ ilmumisest. // Füüsika 1987, 9–11.
- Ots, Ilmar – vt. H. Jõgi. // Füüsika 1983, 3–13.
- Ots, Ilmar; Laur Palgi.** Kas Eestis on elementaarosakeste füüsikal väärtust? // EFS aastaraamat 1992, 82–90.
- Ots, Ilmar.** Kui populariseerija sulg veab viltu. // EFS aastaraamat 1998, 26–30.
- Paal, Eugen – vt E. Vesman. // EFS aastaraamat 2006, 19–20.
- Palgi, Laur – vt I. Ots. // EFS aastaraamat 1992, 82–90.
- Piir, Ivar.** Kaksikümmend aastat Eesti füüsikapäevi. // EFS aastaraamat 1989/90, 6–13.
- Piir, Ivar.** Võtkem vahel aeg maha! // EFS aastaraamat 1999, 14–24.
- Piir, Ivar.** Teoreetilise füüsika ajaloost Tartus (1921–1960): õppeainest uurimisobjektiks. // EFS aastaraamat 2004, 5–34.

- Rebane, Karl-Samuel.** Füüsika Tartu Ülikoolis 1802–1982. // Füüsika 1982, 9–17.
- Rebane, Karl-Samuel.** Tartu Riikliku Ülikooli elektroluminestsentsi ja pooljuhtide labor. // Füüsika 1985, 28–38.
- Reivelt, Kaido.** Füüsika-aasta 2005 Eestis. // EFS aastaraamat 2005, 5–30.
- Salm, Jaan.** TRÜ AEL 20. // Füüsika 1984, 15–22.
- Silberberg, Rein.** Minu elu ja töö. // EFS aastaraamat 1999, 6–13.
- Stolovitš, Leonid.** Poeg. (Essee.) // EFS aastaraamat 2006, 5–18.
- Suckewer, Szymon.** How do I remember Einar Hinnov. // EFS aastaraamat 1998, 23–25.
- Tamkivi, Raivo.** Tartu Teaduspark oktoobris 1994. // EFS aastaraamat 1994, 55–62.
- Tamkivi, Raivo.** Tartu Teaduspark novembris 1995. // EFS aastaraamat 1995, 9–16.
- Tiit, Valdur – vt L. Kongo. // EFS aastaraamat 1989/90, 4–5.
- Vesman, Elmar; Eugen Paal.** Jaak Lõhmus (28.09.1937–23.02.2006). // EFS aastaraamat 2006, 19–20.
- Vesman, Elmar.** Jaak Lõhmuse bibliograafia. // EFS aastaraamat 2006, 21–32.
- Vesman, Elmar.** Harry Õiglase bibliograafia. // EFS aastaraamat 2007, 45–60.
- Voolaid, Henn; Helju Kalder.** Füüsikud Tartu Ülikoolist 1945–1990. // EFS aastaraamat 1991, 103–108.

## FÜÜSIKAPÄEVADE ETTEKANNETE SISUKOKKUVÕTTED

- XXXIII Eesti füüsikapäevad 14.–15. II 2003. // EFS aastaraamat 2002, 67–82.
- XXXIV Eesti füüsikapäevad 13.–14. II 2004. // EFS aastaraamat 2003, 41–58.
- XXXV Eesti füüsikapäevad 22.–23. II 2005. // EFS aastaraamat 2004, 79–100.
- XXXVI Eesti füüsikapäevad 21.–22. III 2006. // EFS aastaraamat 2005, 75–98.
- XXXVII Eesti füüsikapäevad 20.–21. III 2007. // EFS aastaraamat 2006, 66–70.
- XXXIX Eesti füüsikapäevad 17.–18. III 2009. // EFS aastaraamat 2008, 115–130.
- XL Eesti füüsikapäevad 22.–23. III 2010. // EFS aastaraamat 2009, 134–138.

## EESTI FÜÜSIKA SELTS

- Eesti Füüsika Seltsi põhikiri (19. mai 1989). // EFS aastaraamat 1989/90, 127–133.
- EFS põhikirja muutused: 27. jaanuar 1992 (EFS aastaraamat 1993, 149–153); 22. aprill 1995 (EFS aastaraamat 1995, 195–196).
- Eesti Füüsika Seltsi põhikiri (10. september 1998). // EFS aastaraamat 1998, 156–167.
- EFS põhikirja muutused: 12. veebruar 2001 (EFS aastaraamat 2001, 94); 14. veebruar 2003 (EFS aastaraamat 2003, 62); 15. august 2007 (EFS aastaraamat 2008, 134).
- Eesti Füüsika Seltsi aastapreemia statuut. // EFS aastaraamat 1989/90, 136.
- Eesti Füüsika Seltsi üliõpilaspreeemia statuut (1989). // EFS aastaraamat 1989/90, 137.
- Eesti Füüsika Seltsi üliõpilaspreeemia statuut (1993). // EFS aastaraamat 1993, 154.
- Eesti Füüsika Seltsi üliõpilaspreeemia statuut (2002). // EFS aastaraamat 2002, 87.
- Eesti Füüsika Seltsi aukirja statuut (1999). // EFS aastaraamat 1999, 111.
- EFS õpilaspreeemia statuut (2004). // EFS aastaraamat 2004, 104.
- EFS aukirjad ja preemiad 1990–2009. // EFS aastaraamat 2009, 142–144.
- EFS juhatuse 1989. a aruanne (Jaak Aaviksoo). // EFS aastaraamat 1989/90, 134–135.
- EFS juhatuse 1990. a aruanne (Jaak Aaviksoo). // EFS aastaraamat 1991, 118–119.
- EFS juhatuse 1991. a aruanne (Jaak Aaviksoo). // EFS aastaraamat 1993, 154–155.
- EFS juhatuse 1992. a aruanne (Jaak Kikas). // EFS aastaraamat 1993, 155–158.
- EFS juhatuse 1993. a aruanne (Jaak Kikas). // EFS aastaraamat 1994, 167–168.
- EFS kroonika 1996. // EFS aastaraamat 1996, 189–190.
- EFS kroonika 1997. // EFS aastaraamat 1997, 177–178.
- EFS kroonika 1998. // EFS aastaraamat 1998, 171–172.
- EFS juhatuse 1999. a tegevusaruanne (Piret Kuusk). // EFS aastaraamat 1999, 112–113.
- EFS juhatuse 2000. a tegevusaruanne (Piret Kuusk). // EFS aastaraamat 2000, 81–83.

- EFS juhatuse 2001. a tegevusaruanne (Raivo Jaaniso). // EFS aastaraamat 2001, 93–94.
- EFS juhatuse 2002. a tegevusaruanne (Raivo Jaaniso). // EFS aastaraamat 2002, 88–89.
- EFS juhatuse 2003. a tegevusaruanne (Raivo Jaaniso). // EFS aastaraamat 2003, 63–64.
- EFS juhatuse 2004. a tegevusaruanne (Arvo Kikas). // EFS aastaraamat 2004, 105–106.
- EFS juhatuse 2005. a tegevusaruanne (A. Kikas, I. Kink, P. Tenjes, A. Hektor). // EFS aastaraamat 2005, 106–108.
- EFS juhatuse 2006. a tegevusaruanne (A. Kikas, I. Kink, K. Reivelt, P. Tenjes). // EFS aastaraamat 2006, 75–77.
- EFS juhatuse 2007. a tegevusaruanne (K. Reivelt, I. Kink, S. Lätt, R. Stern). // EFS aastaraamat 2007, 97–98.
- EFS juhatuse 2008. a tegevusaruanne (K. Reivelt, I. Kink, S. Lätt, R. Stern). // EFS aastaraamat 2008, 134–136.
- EFS juhatuse 2009. a tegevusaruanne (K. Reivelt, I. Kink, S. Lätt, R. Stern). // EFS aastaraamat 2009, 145–146.
- Füüsika arenguteedest Eestis (23. mai 1991). // EFS aastaraamat 1991, 121–126.
- Liikmeskonna vastastikuste privileegide kokkulepe Ameerika Füüsika Seltsi ja Eesti Füüsika Seltsi vahel (19. september 1995). // EFS aastaraamat 1995, 197–198.
- Eesti Füüsika Seltsi seisukoht füüsikahariduse küsimustes (22. mai 2000). // EFS aastaraamat 2000, 79–80.
- Eesti Teaduste Akadeemia ja Eesti Füüsika Seltsi assotsiatsioonileping (14. juuni 2005). // EFS aastaraamat 2005, 104–105.
- EFS liikmeskond ja juhatus (1989–1990). // EFS aastaraamat 1989/90, 138–141.
- EFS uued liikmed: EFS aastaraamat 1991, 127; EFS aastaraamat 1992, 151; EFS aastaraamat 1993, 158; EFS aastaraamat 1994, 169; EFS aastaraamat 1995, 198; EFS aastaraamat 1996, 190; EFS aastaraamat 1997, 178; EFS aastaraamat 1998, 168; EFS aastaraamat 1999, 114; EFS aastaraamat 2002, 89; EFS aastaraamat 2003, 66; EFS aastaraamat 2004, 108; EFS aastaraamat 2005, 110; EFS aastaraamat 2006, 79; EFS aastaraamat 2007, 101; EFS aastaraamat 2009, 149.
- Eesti Füüsika Seltsil oma list (Jaak Jõgi). // EFS aastaraamat 1994, 168–169.
- Eesti Füüsika Seltsi veebiajakiri (Aile Tamm). // EFS aastaraamat 2009, 148.

**IN MEMORIAM**

- Matt Anso 30. VIII 1943 – 24. IV 1989. // EFS aastaraamat 1989/90, 174.
- Endel Aruja 5. VII 1911 – 4. II 2008. // EFS aastaraamat 2008, 169–170.
- Heinrich Aruksaar 7. IX 1914 – 26. VII 2001. // EFS aastaraamat 2001, 118.
- Andrus Ausmees 16. X 1960 – 26. XII 2008. // EFS aastaraamat 2008, 171–172.
- Rein Avarmaa 26. XII 1940 – 7. VIII 1987. // Füüsika 1987, 43.
- Olev Avaste 18. II 1933 – 18. VII 1991. // EFS aastaraamat 1991, 131–132, 155.
- Gleb Bichele 30. VII 1909 – 28. XII 2004. // EFS aastaraamat 2004, 144–145.
- Heino Eelsalu 8. V 1930 – 26. VII 1998. // EFS aastaraamat 1998, 191.
- Mart Elango 8. I 1936 – 12. II 1996. // EFS aastaraamat 1996, 23; 192–193.
- Ülo Haldre 24. X 1930 – 18. X 1995. // EFS aastaraamat 1995, 223.
- Einar Hinnov 17. III 1930 – 23. X 1995. // EFS aastaraamat 1995, 223–224.
- Arnold Humal 10. III 1908 – 13. XII 1987. // Füüsika 1987, 44–45.
- Galina Hütt 17. II 1937 – 6. IX 2000. // EFS aastaraamat 2000, 107; 2001, 116.
- Emil Ilmas 1. VI 1931 – 4. VIII 1992. // EFS aastaraamat 1992, 181.
- Mihkel Jõeveer 3. VIII 1937 – 6. VI 2006. // EFS aastaraamat 2006, 113–115.
- Peep Kalv 25. XI 1934 – 1. I 2002. // EFS aastaraamat 2002, 119–120.
- Paul Kard 15. XII 1914 – 3. IX 1985. // Füüsika 1985, 84.
- Aksel Kipper 5. XI 1907 – 25. IX 1984. // Füüsika 1984, 23–24, 65.
- Jaak (Jakov) Kirs 2. I 1927 – 16. IX 1998. // EFS aastaraamat 1998, 191–193.
- Feodor Klement 30. V 1903 – 28. VI 1973. // Füüsika 1973, 5.
- Lev Kofman 17. VI 1957 – 12. XI 2009. // EFS aastaraamat 2009, 178–179.
- Aare Koppel 7. VII 1934 – 8. II 1991. // EFS aastaraamat 1991, 128–129, 155.
- Hillar Koppel 21. IX 1931 – 8. III 2006. // EFS aastaraamat 2006, 112–113.
- Rutt Koppel 29. X 1938 – 25. IX 2004. // EFS aastaraamat 2004, 142–143.
- Uno Kopvillem 4. X 1923 – 23. IX 1991. // EFS aastaraamat 1991, 155–156.
- Kalju Kudu 16. III 1930 – 13. VII 2001. // EFS aastaraamat 2001, 117–118.

- Peeter-Enn Kukk 2. IX 1934 – 11. II 2003. // EFS aastaraamat 2003, 101–102.
- Enn Kundla 14. VI 1934 – 22. XII 2006. // EFS aastaraamat 2006, 118–119.
- Grigori Kuzmin 8. IV 1917 – 22. IV 1988. // EFS aastaraamat 1989/90, 154.
- Liidia Lembra 11. VIII 1932 – 26. XI 1982. // Füüsika 1982, 54.
- Peeter Liblik 11. V 1944 – 22. VI 2009. // EFS aastaraamat 2009, 176.
- Märt Liigant 28. VIII 1936 – 27. XII 1996. // EFS aastaraamat 1996, 193.
- Nikolai Lump 9. XII 1924 – 3. III 1978. // Füüsika 1978, 15.
- Lauri Luud 25. VIII 1933 – 12. V 1989. // EFS aastaraamat 1989/90, 174.
- Jaak Lõhmus 28. IX 1937 – 23. II 2006. // EFS aastaraamat 2006, 19–20, 111–112.
- Indrek Martinson 26. XII 1937 – 14. XI 2009. // EFS aastaraamat 2009, 179–180.
- Rein Männik 27. VIII 1945 – 21. I 1994. // EFS aastaraamat 1994, 195.
- Herman Mürk 21. VIII 1908 – 12. VIII 1988. // EFS aastaraamat 1989/90, 154.
- Vladimir Mürk 1. IX 1947 – 17. IX 1997. // EFS aastaraamat 1997, 179–180.
- Peeter Mürsepp 21. III 1918 – 3. XI 1999. // EFS aastaraamat 1999, 137.
- Herbert Niilisk 18. II 1930 – 16. X 2006. // EFS aastaraamat 2006, 115–116.
- Uno Nõmm 4. V 1930 – 16. XI 1988. // EFS aastaraamat 1989/90, 154.
- Aleksander Pae 2. VIII 1916 – 27. XI 2001. // EFS aastaraamat 2001, 120–121.
- Roul Pakkas 22. X 1930 – 5. V 1998. // EFS aastaraamat 1998, 191.
- Izold Pustõlnik 17. III 1938 – 2. V 2008. // EFS aastaraamat 2008, 170–171.
- Hugo Raudsaar 14. I 1923 – 17. XI 2006. // EFS aastaraamat 2006, 117–118.
- Küllike Realo 14. VI 1942 – 10. XI 2006. // EFS aastaraamat 2006, 116–117.
- Karl Rebane 11. IV 1926 – 4. XI 2007. // EFS aastaraamat 2007, 137–139.
- Karl-Samuel Rebane 23. VII 1928 – 30. III 1987. // Füüsika 1987, 42.
- Ljubov Rebane 6. IX 1929 – 13. VI 1991. // EFS aastaraamat 1991, 130, 155.
- Jaan Reinet 8. V 1905 – 29. XI 1991. // EFS aastaraamat 1991, 133–134, 156.



- Vladimir Riives 28. X 1916 – 23. V 1978. // Füüsika 1978, 15.
- Juhan Ross 14. VIII 1925 – 21. VI 2002. // EFS aastaraamat 2002, 120–121.
- Vello Ross 21. VIII 1935 – 26. X 2003. // EFS aastaraamat 2003, 103.
- Ira Saar 27. II 1943 – 27. II 2006. // EFS aastaraamat 2005, 151.
- Veikko Saar 15. IV 1971 – 12. IX 1998. // EFS aastaraamat 1998, 191.
- Rauli Sarapuu 11. XI 1959 – 21. VII 1990. // EFS aastaraamat 1989/90, 194.
- Kaljo Schults 26. XII 1925 – 18. X 2004. // EFS aastaraamat 2004, 143–144.
- Osvald Seeman 2. III 1915 – 14. X 1994. // EFS aastaraamat 1994, 195.
- Rein Silberberg 15. I 1932 – 31. VIII 2001. // EFS aastaraamat 2001, 118–120.
- Tiit Soovik 6. VI 1930 – 8. XII 1988. // EFS aastaraamat 1989/90, 154.
- Leo Sorgsepp 1. V 1928 – 1. IX 2003. // EFS aastaraamat 2003, 102–103.
- Andres Stolovitš 11. VIII 1958 – 14. VII 2006. // EFS aastaraamat 2006, 5–18, 115.
- Artur Suisalu 22. XI 1951 – 9. XI 2009. // EFS aastaraamat 2009, 177–178.
- Grigori Zavt 23. XII 1938 – 13. XI 1994. // EFS aastaraamat 1994, 195.
- Elmar Talviste 27. VII 1937 – 12. IX 1985. // Füüsika 1985, 85.
- Arved-Aleksander Tammik 5. IV 1934 – 24. III 1994. // EFS aastaraamat 1994, 195.
- Ilmar Tigane 3. II 1925 – 31. VII 1985. // Füüsika 1985, 84.
- Leon Tuvikene 24. VII 1924 – 19. XI 1992. // EFS aastaraamat 1992, 181.
- Leonid Uibo 25. XII 1917 – 25. VIII 1988. // EFS aastaraamat 1989/90, 154.
- Alfred Vaht 1. VII 1911 – 14. XI 1997. // EFS aastaraamat 1997, 180.
- Jaan Valdur 28. III 1936 – 6. IX 1999. // EFS aastaraamat 1999, 136.
- Charles Villmann 18. III 1923 – 25. III 1992. // EFS aastaraamat 1992, 181.
- Harry Õiglane 5. III 1927 – 17. VII 1999. // EFS aastaraamat 1999, 135–136.
- Uuno Õpik 19. X 1926 – 30. IV 2005. // EFS aastaraamat 2006, 111.

## FÜÜSIKAKROONIKA

Füüsikakroonikad 1973–1987 on vihikutes „Füüsika“ 1973–1987.

Füüsikakroonikad 1988–1990 on EFS aastaraamatus 1989/90.

Füüsikakroonikad 1991–2009 on EFS aastaraamatutes 1991–2009.

## **FÜÜSIKAKROONIKATE KOOSTAJAD**

Rein Männik: 1973–1978, 1986–1989.

Eele Roon ja Rein Männik: 1979.

Rein Männik ja Ilmar Ots: 1980–1985.

Ants Haljaste ja Piret Kuusk: 1990–1993.

Piret Kuusk: 1994–2001.

Anna Aret: 2002–2004.

Helle Kaasik, Anna Aret ja Piret Kuusk: 2005–2009.

## SUMMARY

In 2009 the Estonian Physical Society (EFS) celebrated its 20<sup>th</sup> anniversary. Anniversary issue of the Annual of the Estonian Physical Society begins with two articles devoted to the 20-year cooperation between Estonian and Swedish physicists. These articles are dedicated to the memory of Professor Indrek Martinson, who died on November 14, 2009.

The second part of the Annual contains the programme of the 39<sup>th</sup> Estonian Days of Physics (Tartu, March 17–18, 2009), opening speech held by Dr. Piret Kuusk and the report of the laureate of the EFS Annual Prize 2009 Dr. Els Heinsalu. Presentations given at the 39<sup>th</sup> Estonian Days of Physics by H. Tammet & U. Hõrrak and M. Laan are also published here.

In the third part of the Annual, the programme of the 40<sup>th</sup> Estonian Days of Physics, to be held on 22<sup>nd</sup> and 23<sup>rd</sup> March 2010, is published, together with the paper by P. Saari and the abstracts of the reports.

In the Estonian Physical Society's section, official documents of the Society are presented. The EFS Annual Prize and the Medal of the Society 2009 were given to Dr. Els Heinsalu, the Student Prize 2008 was granted to Martin Järvekülg. The Honorary Citations winners were Ergo Nõmmiste, Arvo Kikas and Arvi Freiberg. The High School Student Award was granted to the student of the Hugo Treffner Gymnasium Riinu Ots, whose work was completed under supervision of Dr. Marko Kaasik (University of Tartu). List of all EFS award winners in the years 1990–2009 is published in the Annual. The Society section includes also the Annual Report for the year 2009, and the list of Board members and new members of the Society. At the end of the section, the programmes of the Young Physicists' Autumn School and of the Summer School and Autumn Workshop of Physics Teachers for the year 2009 can be found.

The last section of the Annual contains the physics chronicle of 2009, the last part of which provides a summary of the events of the International Year of Astronomy in Estonia.

The anniversary issue of the Annual provides a consolidated table of contents of all brochures "Physics" (1973–1987) and Annuals of the EFS (1989/90–2009).

## RAAMATUS KASUTATUD LÜHENDID

BNS	<i>Baltic News Service</i>
CENS	TTÜ Kübi mittelineaarsete uuringute keskus ( <i>Centre for Nonlinear Studies</i> )
CERN	Euroopa tuumauuringute keskus ( <i>Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire</i> )
EMÜ	Eesti Maaülikool
ERR	Eesti Rahvusringhääling
ETF	Eesti Teadusfond
ETIS	Eesti Teadusinfosüsteem
FMI	Soome Meteoroloogia Instituut ( <i>Finnish Meteorological Institute</i> )
HTM	Haridus- ja Teadusministeerium
IAEA	Rahvusvaheline Aatomienergiaagentuur ( <i>International Atomic Energy Agency</i> )
ITK	Infotehnoloogia Kolledž
KBFI	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut
KTH	Rootsi Kuninglik Tehnikaülikool ( <i>Kungliga Tekniska högskolan</i> )
KVÜÖA	Kaitseväe Ühendatud Õppeasutused
MSU	Montana Riiklik Ülikool ( <i>Montana State University</i> )
REKK	Riiklik eksami- ja kvalifikatsioonikeskus
TLÜ	Tallinna Ülikool
TO	Tartu Observatoorium
TPÜ	Tallinna Pedagoogikaülikool (praegu TLÜ)
TRÜ	Tartu Riiklik Ülikool (praegu TÜ)
TTÜ	Tallinna Tehnikaülikool
TTÜ Kübi	TTÜ Küberneetika Instituut
TÜ	Tartu Ülikool
TÜ FI	TÜ Füüsika Instituut
TÜ KI	TÜ Keemia Instituut
TÜ LOTE	TÜ loodus- ja tehnoloogiateaduskond
TÜ ÖMI	TÜ Ökoloogia ja Maateaduste Instituut
VTT	Soome Riiklik Tehniline Uurimiskeskus ( <i>Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus</i> )

# MÄRKUSED