

## Astrofüüsikast kiirendifüüsika manu

*Peeter Olesk*

Kindlasti on ilusaid ja ülevaatlikke fotosid tähistaevas fikseeritavast ilmaruumist avaldatud võrreldamatult rohkem kui päeva- või pimeduspilte töötavatest kiirenditest, nende osadest ja kiirendis toimivate protsesside parameetritest (näiteks plasma temperatuur). Kui kiirendis on mistahes põhjusel välja lülitatud ja mõni sektor temast on avatud, siis seal sees viibiksid sa nagu valgustatud tunnelis. Olen minagi sellises ringi vaadanud, teejuhiks erakordselt sümpaatne Lundi ülikooli füüsikaproffessor Indrek Martinson (1937–2009). Mismoodi see katseseade töötab, seda polnud mulle vaja tutvustada ning mis on Lundi füüsikutel kavas, selleni me ei jõudnudki. Lugeja leiab need kavad üles ka ilma minuta Lundi ülikooli MAX IV Laboratooriumi koduleheküljelt internetis<sup>1</sup>. Et kiirendis võiks olla tähistaeva tinglik, kusjuures väga selekteeritud analoog, seda tunnet mul Indrek Martinsoni seltsis siiski ei tekkinud. Ei võinudki tekkida, sest kuidas näeb välja ülikõrgtemperatuurne plasma nii lähedalt kui võimalik, sellekohast väga hea kvaliteediga värvifotot pole mulle silma jäänud. Pjotr Kapitsa (1894–1984) jõudis fotografeerida turbulentset plasmat kui ioniseeritud segu deuteeriumist ja argoonist (95/5%) aastaks 1969, kuid tema korduvalt publitseeritud foto on väga umbkaudselt legendeeritud, ei ole värviline ega mitte ka kontrastne. Kuna Kapitsa laboripäevikud on publitseerimata, siis võib vaid oletada, et katsete algul polnud tal NSVL TA hilisema tegevliikme Jevgeni Zavoiski (1907–1976) konstrueeritud ülilühikeste protsesside detektorit veel käepärast ja tema tähelepanek oli puhtvisuaalne.

Seejuures ei huvitanud Kapitsat eraldi probleemina kiirenditüüpide võrdlus, ehkki ta neid kahtlemata tundis, kuna ta 1950. aastate algupoolel otsis visalt tollal uusima ideena välja pakutud tokamaki printsiibile alternatiivi. Oma profiililt oli Kapitsa insener ehk tehnilise füüsika esindaja, keda ennekõike huvitasid suure kasuteguriga tööstuslikud katseseadmed ja protsessid, mida neis seadmes saab suunata: ülikõrgsageduse generaatorid, detanderid, gaaside veeldamine, ülimalad temperatuurid, ülivoolavus, ülitugevad magnetid, plasma kooshoidmine. Ta enese hilisema ülestunnistuse järgi jõudis ta plasma-uuringuteni aastal 1950 täiesti juhuslikult, konstrueerides ja ehitades putkas oma eramukrundil Uspenskoje külas Moskva külje all Odintsovos kõrgsageduse generaatori nimega „Nigotron“. Sellist oli vaja peamiselt diskussiooniks seeütle, kuidas suurendada generaatori võimsust võimalikult väiksemal tööpinnal (Kapitsa oli tollal päikesepatareide veendunud vastane). Kapitsa saavutas taotletud efekti pärast seda, kui oli loobunud türatronimehhanismist ja asendanud selle magnetroniga. Generaatori nimi tuleneb kohanimest „Nikolai mägi“, kus Kapitsa eramu asus. Tema generaator oli võimeline tekitama kõrgsagedust lainepikkusega 20 cm võimsusega kuni mõnisada kilovatti (andmed on kõiguvad). Ühes katses laskis Kapitsa ülikõrge sagedusega (teoreetiliselt kuni 30 gigahertsi) kiirguse läbi kvartsanuma, mis oli täidetud heeliumiga rõhul

<sup>1</sup><https://www.maxiv.lu.se>

100 mm elavhõbedasammast. Mõneks sekundiks märkas ta seepeale kõietaolist plasmajuppi, olemata valmis seda kohe ka pildistama. Seadme projekteerimisest ja esimestest katsetest tema abil saigi aastal 1952 alguse suund, mida Kapitsa ise nimetas suurte võimsuste elektroonikaks, praktilisteks eesmärkideks plasma püsivuse suurendamine ja alternatiivse termotuumareaktori ehitamine eeldusel, et konvektiivne soojusvahetus on „kontrolli all“. Vaatamata katsete intensiivsusele ei ole niisugust kontrolli tänini paraku saavutatud ja juba ammu on ka sellekohased seadmed demonteeritud.

Erinevalt Kapitsa paljude katsete kõikidest eesmärkidest on siinkirjutaja siht hoopis tagasihoidlikum. Ma ei taha rohkemat kui tutvustada magnetismi osakaalu kiirendifüüsikas, tehes seda astrofüüsika vahendusel. Kes rahuldub küsimusega, mis on kiirendifüüsika lihtsureliku tarbeks, mingi taas internetti<sup>2</sup>, kes soovib alga edasijõudmiseks rohkemat, võiks lugeda juurde Mario Conte jt raamatut „Sissejuhatus kiirendifüüsikasse“ (Conte jt, 2008). Conte töötab Genova ülikooli juures ja on tuntud kui Stern-Gerlachi interaktsiooni ning hõbeda magnetmomendi ja spinnide uurija. Tema jt raamatust veelgi kaugemale jõuab asjahuviline siis, kui ta tutvub mõne kiirendikompleksi tehnilise projektiga ja koduleheküljega interneti avarustes<sup>3</sup>. Aastakümnetepikkune kogemus kordab aina üht ja sedasama: üldharriduslik füüsikaprogramm alates progümnaasiumist kuni bakalaureuse-faasini kõrgkooli füüsikakursuses kui kõrvalaines keskendub mitterelativistlikule mehhaanikale, magnetismile, alalisvoolu elektrisjandusele ja tuumafüüsika alustele säärase inertsiga, et tema läbimise käigus astronoomiani praktiliselt ei jõutagi, astrofüüsikast üldse rääkimata. Kuna see nii on, siis võib vaatlusastronoomia osutada küll väga põnevaks, kuid samas paraku ka võrdlemisi elitaarseks valdkonnaks, mis ei ole kuidagi kooskõlas selle eksistentsiaalse sõltuvusega, mis inimesel Kõiksuse üksikasjadest tekib. Et seda disharmooniat pisutki tempereerida, selleks olengi ma mitmes omapoolses artiklis pannud ette läheneda astrofüüsikale füüsika poolelt, võttes jõukohaseks lähtepunktiks valguse morfoloogia ja magnetismi. Nendealaseid katseid saab teha ka kodus, nende teooria ei nõua käsitatuid arvutusi ning nende kõrvale võib lugeda muutuva raskusastmega õpimaterjale küllalt paljudes keeltes. Tarvilikud mõõteriistad ning katseseadmed on seejuures enamasti polüfunktsionaalsed, nii et neid, nagu näiteks testrid või nurgamõõtjad või fotoaparaadid, saab kasutada ka väljaspool pedagoogilist programmi.

Samas ei saaks ma väita, et kiirendifüüsikale on lihtsam läheneda astrofüüsika poolelt. Kaevakem üldistele juttudele kraavid sisse ja laskem veepind madalamaks! Kiirendi on suurel määral insenerlik-ehituslik ülesanne ehk nagu ütles millalgi 1950. aastate teisel poolel Moskva lähedal Uus-Ivankovos (nüüdses Dubnas) seal tuuma-uuringute keskust rajav hilisem transuraanide sedastaja Georgi Fljorov (1913–1990) oma põlvkonnakaaslasele, sünkrotronkiirguse kaasennustajale teoreetik Juzik Pomerantshukile (1913–1966): reaktoriehitaja peab töötama nagu majavalitsuse peainsener. Fljorov ütles seda siis, kui asjatundjad enam ei võinudki panna võrdusmärki kiirendi ja tuumareaktori vahele (Ioffe, 2018), aga ikkagi polnud veel selge, kui palju kulub raskete ionide (heeliumi aatomist suurema massi-

---

<sup>2</sup><https://cbp.lbl.gov>;

<https://theconservation.com/new-physics-at-large-hadron-collider-scientists-are-excited-but-its-too-soon-to-be-sure-157871>

<sup>3</sup><https://nica.jinr.ru>;

[https://nucloweb.jinr.ru/nica/TDR/2015/TDR\\_VOLUME\\_1.pdf](https://nucloweb.jinr.ru/nica/TDR/2015/TDR_VOLUME_1.pdf);

<https://www.desy.de>

ga aatomid) kiirendi ehitamiseks betooni, mis marki see betoon peab olema, kuidas see kivineb, kes oskab betooni tugevust määrata jne. Kõik see oli äärmiselt maa-pealne asi, millega tegemisel võidi üles kerkinud suisa anekdootlikele küsimustele anda ka väga kujundirikkaid vastuseid. See ei olnud tollal põrmugi paradoksaalne. Tihtipeale kujutletakse teoreetilist füüsikat ette teadusharuna, mille sisuks on mingi füüsikalise protsessi matemaatiline käsitlus ja jõudmine teatava arvutuseeskirjani. Kiirendifüüsika sündides see nõndamoodi ei olnud. Teoreetikud pidid selal andma ette ka reeglid ehituseeskirjade kehtestamiseks ja suutma põhjendada, mida mingi kiirendiga üldse uurida saab. Mida (st millise perspektiivi ja prognoosiga), kui kaua (st millal mingi kiirendi amortiseerub) ning mis katse tulemusest järgneb? Õppeasutustes ja sihtseminarides loeti üliõpilastele ja kiirendiseadistajatele kiirendi- või ka tuumafüüsikat liiga, ilmselt rohkem kui seda oli vaja mingi konkreetse ülesande lahendamiseks, sest keegi ei teadnudki, milles see ülesanne seisneb ja kui täpset vastust on tarvis. Asjatundjate koolitamiseks suuremal hulgal rajati Moskva Insenerifüüsika Instituut, milles korraline õppetöö algas alles 1946. aastal, ent sellest ei piisanud. Õppetöö Moskva Inseneri-Tehnikainstituudis hakkas toimuma aasta hiljem.

Eestikeelne inimene, kellele füüsika oskussõnavara on võõravõitu, pääseb kiirendi juurde veel harvemini kui teleskoobi taha. Kuidas koduste vahenditega – paber, käärid, kleeplint – ehitada teleskoobi analoogi (mitte mudelit!), selle kohta leiab internetist terve hulga illustreeritud videosalvestisi, ühed algelisel, teised nõudlikumal astmel<sup>4</sup>. Kiirendit samal kombel ei ehita, sest isegi tillukese hadronite põrguti tegemiseks<sup>5</sup> on vaja head lauaarvutit ja mitut küllalt kallist elektroonilist seadet. Jääb üle vaadata kõrvalt, järelikult ka kaugusest, kuidas töötavad kiirendikeskused mujal maailmas, millist sisseaset seal kasutatakse, missugune on nende keskuste uurimisprogramm ning kuidas on neis korraldatud järgmise-ülejärgmise põlvkonna kiirendifüüsikute ettevalmistus.

Üks tõsiasi võiks olla küll arusaadav: mistahes füüsika üldkursus ei sisalda endas kunagi süstemaatilist sissevaadet tehnilisse füüsikasse ja teadusaparatuuri ehitamisse ning ehkki sellealane perioodika võib olla väga kõrge tsiteeritavusega, puudub asjaarmastajal lihtsalt aeg asjaomaste artiklite läbitöötamiseks. 1924. aastal asutas Conrad Wilhelm Röntgeni (1845–1923; Nobeli füüsikapremia 1901) doktorant Abram Ioffe (1880–1960) kuukirja „Tehnilise Füüsika Ajakiri“, mis ilmub nüüdseks juba ammugi nii vene kui ka inglise keeles mõlemal kujul, paberil ja arvutis. Vaatamata sisukorra entsüklopeedilisusele ei ole see ajakiri profileeriv ei teoreetilises ega matemaatilises füüsikas. Ta on juhtiv väljaanne tahke keha füüsikas ja mitmesuguste segude nagu näiteks metallorgaaniliste ühendite parametraalses analüüsis. Et vastavad mõisted ei läheks järgnevas lootusetult sassi, on ehk just siinkohal otstarbekas määratleda, milles seisneb tehniline füüsika (inglise keeles enamasti „applied physics“). Kõrgema astme reaalinete seas on tehniline füüsika bakalaureuse-faasi interdistsiplinaarne ala, mis tegeleb probleemidega uute materjalide, tehnoloogilise progressi ja teadusaparatuuri ehitamise vahel sõltuvalt sellest, kuhu on ühiskond parajasti jõudnud. Oli ennemuiste aeg, mil tehnoloog-

<sup>4</sup><https://www.youtube.com/watch?v=I-Yk9YVbpSc;>

<https://www.wikihow.com/Make-a-Telescope;>

<https://kids.nationalgeographic.com/nature/article/make-a-telescope>

<sup>5</sup>[https://www.instructables.com/The-Small-Hadron-Collider/;](https://www.instructables.com/The-Small-Hadron-Collider/)

[vrd. https://www.youtube.com/result?search.query=physics+accelerators +;](http://vrd.https://www.youtube.com/result?search.query=physics+accelerators+;)

<https://www.youtube.com/warch?v=FUWNp5dgzo>

gilise progressi laeks oli Archimedese kruvi. Palju-palju hiljem, inglise tööstusrevolutsiooni käigus, tõsteti lagi oluliselt kõrgemaks siis, kui hakati kasutama auru- masinat. Praegu veavad progressi mikroprotsessor-elektronika ja nanotehnoloogia. Mõlemad mõjutavad otseselt nii vaatlusastronoomiat, raadioastronoomiat kui ka astrofüüsikat (näit andmetöötlus). Muide võidakse ka kiirendifüüsikat suruda tehnilise füüsika alla, aga minu meelest on see vägivaldne käik ajaloolise aatomi- füüsika ja temast veidi noorema tuumafüüsika arvelt. Arusaadavamalt kui suurte võimsuste elektronikas tuli taoline vägivald esile 1920. aastatel Cambridge'is, kus Kapitsa hakkas konstrueerima ülitugevate magnetväljade tekitamiseks tarvilikke impulssmagneteid.

Esiotsa ei huvitanud noort Pjotr Kapitsat ülimalad temperatuurid ja ülitugevad magnetväljad veel üldse. Tema esimeseks tööks Cavendishi laboris Ernest Rutherfordi (1871–1937; Nobeli keemiapremia 1908) käe all oli vaadelda, kuidas käituvad alfa-osakesed Wilsoni kambris ja missugusena võiks hinnata magnetvälja mõju nende osakeste liikumisele. Kuidas kujuneb ferromagneetikute magneetuvus piki nende pöörlemist oma telje ümber, selle selgitamiseks tuligi magnetvälja tugevust radikaalselt tõsta. Sellealaste töödega oli alustanud juba inglase Owen Richardson (1879–1959; Nobeli füüsikapremia 1928), kes parajasti töötas Suure Lombi taga Princetoni ülikooli professorina. Tema publitseeris oma katsete tulemused aastal 1908. Aasta hiljem jätkas samas suunas California ülikooli professor Samuel Barnett (1873–1956), kelle uurimused ilmusid aastail 1909–1915. Rutherford tundis neid töid ja tema laboris leidis ka analoog Barnetti katseseadmele, aga Rutherford oli selle tõstnud kolikambrisse, kust Kapitsa ta leidiski. Katse jätkamisel peamiselt mõõtmistulemuste täpsustamiseks põrkus Kapitsa kahele takistusele. Üks seisnes selles, et püsimagnetid ei pidanud ülekuumenemisele vastu, vaid hakkasid sulama ja purunema. Teise põhjustas seni puudunud oskus luua suure võimsusega elektrienergia impulss-režiimil töötav allikas. Selleks ehitas Kapitsa aku, mis koosnes seatinast konstrueeritud plaatidest, mille vahele oli valatud väävelhape. Niisugune aku genereeris voolu võimsusega kuni 300 kilovatti.

Jäi üle lahendada ülitugevate magnetväljade saamise probleem. Prantslase, Kõrgemas Normaalkoolis ja Optika Kõrgkoolis töötava Aimé Cottoni (1869–1951) laboris saavutati vesijahutusega püsielekromagnetite välja tugevuseks 70 kiloörstedit (magnet ise kaalus rohkem kui 100 tonni). Pärastpoole suurendas USA-s töötav Francis Bitter (1902–1967) samal põhimõttel rakendatava püsimagneti poolt genereeritud välja tugevust 200 kilogaussini. Kapitsa meelest oli seda ikkagi veel vähe ja tal õnnestus saada „kätte“ väljad tugevusega kuni 400 kiloörstedit. Nii suur tugevus kestis küll ülilühikest aega, ent lubas viia läbi kõik olulised mõõtmised. Hiljem on Kapitsa märkinud kahetsusega, kuidas tema töö ülitugevate magnetväljade uurimisel korduvalt katkes. Algul (1934) tingis seda väljasõidukeeld Nõukogude Liidust, ettekäändeks kollaboratsioon saksa tööstusluurega. Siis tuli peale Teine maailmasõda, mil ta korduvalt muutis teemat, seejärel repressioonid, mille tagajärjel kõrvaldati Kapitsa oma kõikidelt vastutusrikastelt ametikohtadelt ja nii saigi tema kõige püsivamaks asukohaks Nikolai mägi, kaaslasteks perekond ning mõned sõbrad ja lähemad naabrid (Kapitsa, 1990). Nagu juba eespool on jutuks olnud, muutis Kapitsa oma suvilas töötades teaduslikku teematikat uuesti ega pöördunudki ülitugevate magnetite juurde tagasi. Katseseadmed jäid küll alles, kuid Kapitsa vaatas neist mööda ega lubanud neid ka kolleegidel kasutada.

Siiski pole usutav, et ta ei teadnud mitte kõige vähematki Andrei Sahharovi

(1921–1989; Nobeli rahupreemia 1975) ideedest ja katsetest magnetilise kumulatsiooni vallas (Сахаров, А. 1991; Сахаров, А. jt, 1991). Algul jõudis Sahharov koos oma kolleegidega impulssväljadeni tugevusega 10 miljonit örstedit, aastaks 1964 saavutas ta välja tugevuseks 25 miljonit gaussi. Millal täpselt külastasid Kapitsat ta „maakodus“ Sahharovi vahetu ülemus, nõukogude tuumapommi peakonstruktor ja Kapitsa hea tuttav Julii Hariton (1904–1996) ning Kapitsa instituudi teooriaspektori juhataja, elementaarosakeste füüsik ja ülivoolavuse teoreetik, termotuumapommi plahvatusest järgnenud lööklainete uurija Lev Landau (1906–1968; Nobeli füüsikapreemia 1962), ei tule külaskäikudelt tehtud fotodelt esile, aga piibujutte nad kindlasti ei puhunud. Tagantjärele võiks öelda, et Kapitsa uuris loomulike magnetväljade meetodikindlat tugevdamist selleks, et fikseerida selliste magnetväljade neid omadusi, mis muidu on nii nõrgad, et nad jäävad traditsioonilistele mõõtmisviisidele kättesaamatuks. Niisuguseks omaduseks on näiteks tunneliefekt, nimetatud nõnda waleslase Brian Josephsoni (1940) järgi, kes sai selle avastamise eest Nobeli füüsikapreemia aastal 1973. Õigluse nimel olgu sel puhul siiski õiendatud: alati ei ole selge, millal avastas Kapitsa midagi ise, millal aga korras kellegi teise katset varasemast suurema täpsusega.

Mida võidab sellest astrofüüsika? Lähtugem alustuseks paarist eeldusest. Esimene seisneks selles, et tavaline inimene on konkreetsete tähtede nagu näiteks Põhjanaanel vaatlemisest huvitatud võrreldamatult rohkem kui Maa magnetväljast. Teiseks tuleb arvata, et igapäevases elus sõltub inimene astrofüüsikalistest protsessidest märksa enam kui vajadusest eksperimenteerida elektromagnetilise induktiooniga. Selleks puudub praktiline sund. Lisagem nendele eeldustele negatiivses mõttes veel kaks. Neist ühe kohaselt ei tea tavaline taeva all kõnnikleja kuigi täpselt, mis on sünkrotron, kuidas ta töötab, kus asub tema elukohale lähim kiirguskeskus, kus ta saaks käia sünkrotroni juures ekskursioonil niisamasugusel viisil, nagu käiakse Tõravere Tuulemäel või Tartu Tähetornis Toomel ja Tallinna Tähetornis Hiiul, ning mis on sünkrotronikiirgus. Kuna ta seda kõike ei tea, siis pole tal (eeldus nr 4) ka aimu sünkrotronikiirguse teooriast ja selle ajaloost. On aga kolm erinevat asja, kas mingi osake (1) asub Kõiksuses väljaspool Maa atmosfääri või (2) selle mingis kihis või (3) maapinnal ja selle aluses ning kus nendes kihtides sünkrotronikiirgus tekib ja kuidas teda registreerida. Kiirgus ise avastati järkjärgult aastail 1898–1949.

Sõnastagem vastus eespool püstitatud küsimusele etapiviisiliselt. Väga lühidalt öeldes võib sünkrotron olla esmajoones elektronide kiirendi, milles vaakumkambri liikuvate osakeste kiirust pidurdab elektromagnetite toime, mis ei lase osakeste voolul minna „mööda ilma rändama“. Et seda ei juhtuks, peab magnetvälja tugevuseks olema umbes 13 000 örstedit. Niisuguse suurusjärguni jõuti Uus-Ivankovos 1957. aastal, ent asjakohase teooria lahtikirjutamisega alustas hilisem NSV Liidu TA tegevliige Vladimir Veksler (1907–1966) juba aastal 1944. Ta ei projekteerinud universaalset kiirendit, vaid selle üht tüüpi nimega sünkrofasotron (Векслер, 1973; 1958).

Muidugi ei rajatud nüüdsesse Dubnasse hiiglaslikku masinavärki väga suure kubatuuriga korpusesse rekordiliste parameetrite saavutamiseks. Enne seda töötas sealsamas väike, 5-meetrine sünkrotsüklotron, mis käivitati 1949. aasta lõpus (Джелепов, 1981). See püstitati sinna, tollase nimega NSV Liidu Mõõtevahendite Laboratooriumi Hüdrotehnika Laborisse, umbes paari aasta jooksul ja tootis deutroneid, alfa-osakesi ja prootoneid (enne seda nime kutsuti sama laborit Etalonide

laboriks). Tema magnet kaalus 7000 tonni. Nii suurt kaalu võib hinnata selle järgi, et päris esimese nõukogude kiirendi elektromagnet aastal 1933 kaalus 2 tonni. Tegelikult oli see sünkrotroni mudel, mis pidi näitama, et „asi“ on võimalik. 1953. aastaks suurendati Uus-Ivankovo kiirendi 6-meetriseks, mille kõrvale sünkrofasotroni oligi ehitama hakatud. Uus ettevõtmine pidi aitama uurida, mis võib ülisuurt energiat (10 gigaelektronvolti) omavate osakeste kokkupõrkel juhtuda ja kuidas magnetiline pidurdamine katses toimub. Üldpildis on see võrdlemisi lihtne: andes osa oma energiast ära „mujale“, kaotab kiiratud osake oma energiat ka magnetvälja „takerdudes“. Ent mismoodi ta takerdub ja kui kiiresti see juhtub ning mis saab teel tuumaenergia rakendamisel edasi (Гуревич jt, 1991; Коваленко, 2007; Никитин, 2007; Панасюк, 1986) – see kõik oli veel pildilt puudu. Täispildi saamiseks lastigi esimene sünkrotron Ameerika Ühendriikides käiku kompaniis „General Electric“ Illinois juba 1946 (aastarv ei ole ühemõtteline), kiirendi juhtivaks konstruktoriks Robert Langmuir (1912–1992), keda aitasid paljud kolleegid. Järgmine kiirendi hakkas tööle Michigani ülikooli juures aastal 1949. Kui me nüüd lehitseme mõnd üldfüüsika õpikut, siis kõige levinumadki neist (Halliday jt sa; Tsokos, 2014) ei sisalda kiirendite tehnoloogiat, vaid piirduvad enamasti valguse, röntgenkiirte ja klassikalise optikaga, jõudes tuumafüüsika, subatomaarsete elentaarosakeste ja mittelineaarse optika lävele. Püsin endiselt sel seisukohal, et isegi asjaarmastajal on kasulik töötada läbi vähemasti üks üldfüüsika õpik ning mitte valitud peatükkidena, vaid tervikuna. Et seejuures õpib ka füüsika keeli, see on paratamatu. Võib-olla on kvarkide roll elementaarosakeste ehituses liiga postulaatiivne ja liiga vähe empiiriline või fenomenoloogiline. Ikkagi ei tohiks nüüdisaegne inimene võõristada sääraseid mõisteid nagu „magnetmoment“, „spinn“ ja „isospinn“ ning seda mitte leksikonipõhiselt, vaid ajaloo- ja funktsioonipõhiselt. Spinn viidi füüsika sisse aastal 1925, seega kvantmehhaanika lävel. Niisiis on ta sobivaks võtmeks magnetismi üksikasjalisel avamisel, aga ka konkreetseks sissejuhatuseks kvantfüüsikasse ning füüsikale tarvilikku vektoralgebrasse.

Aforistlikult väljendudes – kui pole hiidmagnetite ehitamiseks vajalikku eriterast, kõrgvaakumi tekitamiseks tarvilikke pumпасid, vee- ja elektrivarustust, siis pole ka kiirendit. Dubna kiirendikeskust toidab vee ja elektriga Ivankovo veehoidla ehk Moskva meri, mille ühte serva rajati ligi 90 aastat tagasi hüdroelektrijaam. Kiirendusprotsessi käivitamiseks tarvilikud ülikõrgsageduslikud aparaadid konstrueeriti ja ehitati NSV Liidu TA hilisema tegevliikme, raadioinsener Aleksandr Mintsi (1894–1974) juhtimisel. Magnetiks kogukaaluga 36 000 tonni kasutati eriteraseid, millest kahjuks pole teada, kus neid valmistati ja proovitükkidena katsetati. Võime siit õigusega järeldada, et kui magnetism on füüsikaline nähtus, siis funktsionaalsete magnetite tehnoloogia ja seadistamine on insenerlik probleem ega ole kuigivõrd oluline, kas me vastavaid probleeme endid ning nende lahendusi nimetame tehniliseks füüsikaks või kuidagi teisiti. Eriti rõhutasid seda teoreetikud ise – ehkki mitte alati ühepoolselt. Lev Landaul oli kombeks astuda enne minekut oma sektorisse läbi eksperimentaatorite tööruumidest ja küsida, kas on vaja täiendavaid arvutuseeskirju või uusi arvutusi. Kuna Füüsikaprobleemide Instituudi peakorpus oli projekteeritud nõnda, et teoreetikuteni jõudis ükskõik kes ainult eksperimentaatorite kaudu, siis muudmoodi Landau oma ruumidesse ei pääsenudki. Ilmselt seda teades päriti temalt kord, mida ta eksperimentaalsest füüsikast üldse arvab. Vastuseks kuulis küsija, et Landau võtab sõna ainult asjades, millest ta midagi mõistab. Niisugune vastus oli tegelikult mitmetähenduslik. Landau ei tahtnud arvustada oma ma-

ja rahva katselisi töid ja suhtus üldse skeptiliselt eksperimentaalfüüsikute töödese mujal, näiteks Peterburis või ka Kaasanis. Võib-olla ei tahtnud ta lisaks tüli direktor Pjotr Kapitsaga, kes suhtus teoreetikutesse märgatava põlglikkusega ja tahtis üks-vahe Landaust oma instituudis päriselt vabaneda. Seejuures ei olnud Kapitsa hoiak põrmugi ainuisiklik, Landau pidi teadma, et eksperimentaatorid olid teooria suhtes sageli norijad. Teoreetikud vastasid sellele äratuntava kõrkusega, paljud eksperimentaalfüüsikud olidki nende jaoks esmajoones insenerid. Insenerifüüsikaks peeti algul koguni mittelineaarset optikat ehk laserite konstrueerimist.

Eespool esitatud märkmed ei ole mõeldud üksikasjaliseks sissejuhatuseks kiirendifüüsikasse, isegi mitte magnetismi ei selle teoreetilises ega mitte ka tehnilises läbilõikes. Kui alustada magnetismi uurimise ajalugu kuninganna Elisabeth I ihuarsti William Gilberti (1544–1603) tööddest, siis tema postuleeris, et juba Maad ennast võib käsitleda magnetina, aastal 1600. Tema tähelepanekutest kuni elektromagnetite kasutamiseni kiirendiehituses kulus seega kolm ja pool sajandit. Ka sel juhul, kui võtta nii pikk protsess kokku valitud peatükkidena, oleks see tõeline kunsttükk. Olgu näiteks kasvõi killuke kosmose uurimise ajaloost, nimelt avakosmoses viibiva astronaudi skafandri katmine millimeetrise magnetekraaniga kaitseks gammakiirguse destruktiivse toime eest. Magnetismi teoorias näikse olevat moodsaks sõnaks Monte-Carlo arvutustehnika (Diep, 2014). Kujunenud olukorras soovitaksin ma õppida ära mõned klassikalised protsessid ning nähtused nagu elektromagnetiline induksioon, resonants, dia- ja paramagnetism, magnetismi sõltuvus temperatuurist, ferromagnetism ja antiferromagnetism ning magnetvälja peamised karakteristikumid. Lugejal, kes on materjali nii kaugele juba omandanud ja tahab sedakaudu jõuda kiirendifüüsikani, on õpetlik teha enesele selgeks kiirendi töö põhimõtted, olulisemad tingimused kiirendi funktsioneerimiseks (kõrgvaakum, ülimalad temperatuurid), kiirendite tähtsamad tüübid ja nende parameetrid ning luua endale ettekujutus mõnest reaalselt talitlevast kiirendist. Oleks hea, kui lugeja tunneks üht või teist osa kiirendikompleksist ja seal uuritavast lähemalt. Niisugusteks osadeks sobivad näiteks mass ja vaakum, millest esimest läheb vaja praktiliselt kõikjal (Ожухъ, 1989), teise puhul aga võivad pakkuda huvi meetodid ideaalilähedase vaakumi tekitamiseks.

Need probleemid bakalaureuse-faasi lõpetamiseks selgeks saanud, on juba senisest jõukohasem mõista kiirendifüüsika kohta mõne teise riigi tuumaprogrammis. Näiteks Pakistani Islamivabariigi rahuotstarbeliste tuuma-uuringute programm on kooperatiivne Hiina Rahvavabariigi ja CERN-iga ning põhiliselt arvuti-põhine. Programm sai alguse aastal 1956 ja on olnud tugevasti rakenduslik, pühendatud toidutehnoloogiale ning vähi-uuringutele. Kooperatsioon CERN-iga seisneb selles, et Pakistan maksab kinni teatava osa CERN-i kulutustest, ent mitte kõiges, vaid eeskätt müüonkatalüüsis. Täiesti teadusprogrammivälisel asjaarmastajal pole Pakistani territooriumil asuvasse uurimiskeskustesse ligipääsu, sest töö, mida neis tehakse, on kaitstud intellektuaalse omandina ja järelikult kehtivad tema suhtes ärisaladuse kaitse ja tööstusluure vastased nõuded. Need ei sega aga kuidagi äraõppimist, mis on müüon ja mis on müüoankatalüüs. Müüon on osake, mis on klassifitseeritav kui lepton ja ühtlasi ka nagu fermion. Meditsiinis võib tema detekteeritavus olla tõhusam uurimisviis kui röntgenanalüüs.

Kõik see kokku ei ole aga veel sugugi rahuldav vastus küsimusele, mida võidab eespooltoodust astrofüüsika või õigemini, miks on tarvis tunda teda enne kiirendifüüsikat? Lähtudes arusaamast, et astrofüüsika uurib füüsikalisi protsesse tähis-

taevas, millele omistatakse maapealse füüsikateaduse poolt sedastatavad omadused, on spontaanselt loomulik arvata, et seda, mis toimub seal, saab korrata ka siin. Mitte ainult korrata, vaid ka võimendada või teravustada ja jälgida isegi neil juhtudel, kus mingi protsessi kohta puudub vahemikus „kõiksus–maapealne detektor“ tõend silmaga registreeritava nähtava valguse kohta. Asjaarmastajale on sellistest protsessidest vahest kõige tuntum kosmiline kiirgus, mida väga üldistes joontes saab jagada kaheks, (meie) galaktika väliseks ehk metagalaktiliseks (see on muide vaieldav) ja siseseks. Sissejuhatavaid märkmeid võib algaja vaadata Tartu Ülikooli teaduskooli minikursusest „Kosmilistest kiirtest tuumajaamani“<sup>6</sup>. Siinkohal on oluline öieti vaid üks küsimus, nimelt selle kiirguse avastamis- ja uurimisloo algus, mida on nihutatud edasi ja tagasi (Гинзбург, 2004; Панасюк, 2011; Строжков, 2011). Aastal 1900 oletasid radioaktiivsuseuurijad, austerlane Julius Johann Philipp Ludwig Elster (1854–1920) ja tema sõber, sakslane Hans Geitel (1855–1923) ning nendest sõltumatult šotlane Charles Tomson Reed Wilson (1869–1959; Nobeli füüsikapreemia 1927), et kosmiline kiirgus seisneb gammakiirguses. 1912 tegi Victor Hess (1883–1964; Nobeli füüsikapreemia 1936) oma katsetega rohkem kui 5 km kõrgusel kindlaks, et problemaatiline kiirgus langeb ülevalt alla, mitte ei tõuse merepinna kõrguselt üles. Vastav ionisatsioon kasvas juba 2 km kõrgusel.

1930. aastatel muutis seniseid arusaamu tuumafüüsikas ja elementaarosakeste füüsikas väga palju positroni avastamine, tuumajõudude ja osakestevaheliste vastastikmõjude eristamine ning tegelemine neutrontähtedega. Mida tähendab „väga palju“? Oli selge, et kõiki punkte, kust kosmilised kiired võivad lähtuda, inimene Maa peal fikseerida ei suuda. Realistlikum oli jälgida, millised on Maale jõudnud kosmosekiirte parameetrid (van Alleni-Tšudakovi vööndi läbimõõtu hakati määratlema alles 1950. aastatel (Krimigis, 2004)). Vöönd on saanud nime ameeriklase James Alfred van Alleni (1914–2006) ja venelase Aleksandr Tšudakovi (1921–2001) järgi. Jõukohasem on olnud uurida ka seda, kuidas muutuvad teatavat tüüpi tähtede omadused nende evolutsiooni käigus. Seetõttu on astrofüüsika sõbral otstarbekas tutvuda mõne suhteliselt uuema ülevaatega näiteks tugevast vastastikmõjust (Christmas, 2001), mida näitliku kokkuvõttega täiendab Berni Ülikooli helveetslasest professori, kvantkromodünaamika ühe rajaja Heinrich Leutwyleri loeng Cornelli ülikoolis 2012 „Tugeva vastastikmõju ajaloo“<sup>7</sup>. Leutwyler ise tunnistab kohe algul, et ta ei ole ajaloolane. Protsess, mida ta kirjeldab, on niisiis mitte sündmuste rida, vaid mõtlemisviisi dünaamika, mida jälgides võib jõuda üllatava küsimuseni. Sõnastaksin selle järgmisel viisil: kas Lev Landau, kes püstitas oma neutrontähe-tõlgenduse laiema avalikkuse ees 1932, jõudis selleni aga juba aasta varem (Яковлев, 2013), pidas oma tõlgendust kinni seepärast, et ei usaldanud oma astrofüüsika-alaseid kogemusi ega saanud Peterburis töötava teoretiku Jakov Frenkeliga (1894–1952) läbi, või pidas ta isiklikku käsitlust neutrontähtede ehitusest puhtmatemaatiliseks või – mis on samuti mõeldav – ei rahuldanud teda oma töö kontrastsus väga värske kvantmehhaanikaga? Esiotsa mõistis Landau

<sup>6</sup>Lust, M. Kosmilisest kiirgusest tuumajaamani. –

[https://sisu.ut.ee/kiirgusest\\_tuumajaamani](https://sisu.ut.ee/kiirgusest_tuumajaamani); Murray 2014. Kes tahab lugeda Merle Lusti konspektile kõrvale kas ülevaatlikumat või ka sädelevamat käsitlust, küsigu, miks hindasid Tartu vanemad üldfüüsikud kõrgelt Moskva professori Dmitri Sivuhhini (1914–1989) venekeelset õpikut „Füüsika üldkursus“ I-V (1979–1989). Sellest märksa vastsem on professor Carlo Rovelli itaaliakeelne „Seitse lühiloengut füüsikast“ (2014), mida on ohrtrasti tõlgitud, sh ka inglise ja vene keelde ning eesti keelde!

<sup>7</sup>Leutwyler, H. On the history of the strong interaction. –

<https://arxiv.org/pdf/1211677v1.pdf>

<https://www.lpi.usra.edu/exploration>



neutrontähte kui punktmassi, mis on üksainus suur aatomituum. Võib-olla oli nii talle harjumuspärasem, sest Landau füüsikakursus algaski mehhaanikast ja molekulaarfüüsikast (Ландау jt, 2014), kuid võib-olla otsis ta ka vasturääkivusi Niels Bohri aatomiteoorias. Seda on tegelikult võimatu kindlaks teha, sest probleem võeti kõne alla äärmiselt kitsas ringis ja suulises vormis. Veel on võimalik, et Landau jõudis neutrontähe omapoolse käsitluseni viisil, mis oligi talle kui õpetlasele eriomane, nimelt sedakaudu, et kandis esmalt kellegi teise tõlgenduse üle talle isiklikult vastuvõetavale kujule ja leidis alles siis lahenduse nende põhimõtete järgi, mida ta pooldas. Need põhimõtted on teada: vähima mõju printsiip, Lagrange'i printsiip ja Hamiltoni printsiip.

Kuidas luges üldfüüsikat Jakov Frenkel, see on üldjoontes teada. Loengu teemaks valis ta tavaliselt probleemi, millega ise parajasti tegeles ja tutvustas siis üliõpilastele nii probleemi sisu kui ka selle lahendust esimeses lähenduses. Tegelikult oli see improvisatsioon. Kui ta enne järgmist loengut oli samas küsimuses jõudnud hoopiski teistsugustele järeldustele, palus ta tudengeid varasem osa konspektist maha tõmmata ning kirjutada uus asemele. Lev Landau loengud olid märksa klassikalisemad, need algasid põhimõistetest ja matemaatilise aparatuurist tähenduses „füüsika kõrgemat järku matemaatilise analüüsi vaatekohalt“. Lahtikirjutatuna seisnes see selles, et mingit üldisemat protsessi, näiteks impulssi suletud mehhaanilises süsteemis, tuli osata kirjeldada võrrandisüsteemide kaupa koos vajalike matemaatiliste operatsioonide ja nende teisendustega. Oli vaja omandada Landau terminoloogia näiteks temperatuuri suhtes, teha enesele selgeks temperatuuri seos osakeste kineetilise energiaga, tunda Avogadro arvu, Boltzmanni konstanti ja mõõta temperatuuri täiesti erinevates ühikutes (paberil muidugi ümberarvutuste kaudu). Sel asjahuvisel, kes võtab vaevaks töötada läbi termodünaamika Lev Landau järgi kahel madalamal astmel<sup>8</sup>, ei ole enam ületamatult raske mõista ka landaulikku temperatuuriõpetust tema ja ta nooremate kolleegide kirjutatud „Teoreetilise füüsika“ kursuse järgi, kus see seni viimases väljaandes (2002–2013) on esitatud köites „Statistiline füüsika“ I (2013. Kuna see kursus täienes ja tema osi on hiljem ümber tõstetud, on otstarbekas lähtuda võimalikult viimasest väljaandest).

Landau jt teoreetilise füüsika õpik oli mõeldud erisugustele asjatundjatele, sellest siis ka aine esitamine hoopis teisiti kui gümnaasiumiõpikutes. Seda võis kasutada valmistumisel Landau ja tema kolleegide juures nn teormiinumumi eksamite sooritamiseks, ent Landau ei eksamineerinud tulevasi filosoofia- ja teadusdoktooreid oma õpiku järgi, vaid ta püstitas vastaja ette ülesande, kontrollis selle lahendamise käiku ja asjast arusaamist ning, kui vastus oli õige (Landau ei armastanud vastust „rahuldav“), püstitas seejärel juba raskema ülesande. Kui lõpuks võis Landau kõik saadud vastused tunnistada headeks, siis andis teormiinumumi läbimine Landau meelest vastajale küllaldase põhja tegelemiseks füüsika mistahes haruga. See asjaolu seletab – muidugi osalt! –, miks Landau jt. käsitlevad paljude fenomenide (näiteks ülijuhtivus) füüsikalist mõtet, mitte aga katsetehnikat ülijuhti-

<sup>8</sup>Kui Landau jt. vastab landaulikele arusaamadele kolmandas raskusastmes, siis madalamale asetub kahasse professor Aleksandr Kitaigorodskiga (1914–1985) kirjutatud venekeelne „Füüsika kõigile“ (seni viimane trükk 1984), eriti selle esimene osa „Füüsikalised kehad“ ja teine osa „Molekulid“ (5. tr. 1982, lk. 57–115). Iseasi on Lev Landau jt. ühiste käsitluste raskusastmete arv – kas 3 või 4 või 5 või koguni 6. Kolmandale raskusastmele vastasid Landau loengud üldfüüsikast, neljandale eksamid ja seminaritööd, viiendale tema jt. teooriaõpikud ning kuuendale koos teistega kirjutatud üksikuurimused. Landau ise hindas füüsikuid logaritmiliselt, asetades kõige tippu Enrico Fermi ja mõõnis, et tema ei ole Fermi.

vuse saavutamiseks ja tehnoloogiat selle rakendamiseks. Viidatud asjaolu avamine omakorda aitab selgitada, miks pidas Lev Landau paljusid seiku enesestmõistetavaks ja miks ta sageli lähtus teatud aksiomaatilistest kaalutlustest ilma igasuguste arvutusteta. Nii oli ta näiteks arvamisel, et nn mikromaailmas ei saa olla väga palju elementaariosakesi.

Ma ei kirjelda siin Landau jt õpiku ülesehitust ega juhatust selle kohta, kuidas Landaud lugeda. Minu märkus juhib asjahuvilise tähelepanu lihtsalt sellele, et näiteks Landau käsitus neutronist ei maksa tema jt õpikust otsida mingist ühest paragrahvist või aineregistri järgi. Pisut sarnaselt erinesid muide ka Jakov Frenkeli õpikud tema loenguist. Näiteks Frenkeli algupäraselt muidugi venekeelne „Teoreetilise mehhaanika kursus vektor- ja tensoranalüüsi põhjal“ (esmatrükk 1925, 4. tr. 2010) käsitleb mitmes peatükis just teoreetilises mehhaanikas (mida Landau kunagi ei õpetanud) vajalikku matemaatilist aparatuuri (Landaule jäi iseseisev, st temapärane matemaatikaõpik ainult unistuseks), misjuures ta vaatleb selle rakendusi üksnes mõnes valdkonnas, sealhulgas tahketes kehaes ja vedelikes. Võib-olla oli Frenkeli vaatekoht Landau jaoks liiga praktiline või ülearu rakenduslik. Niisama hästi on võimalik ometi ka see, et Landaule ei sobinud Frenkeli ekslevad tuletuskäigud seal, kus ta ise oli ühemõttelise tuletuse juba lõpetanud.

Juba pikemat aega on siinkirjutajat vaevanud küsimus, kui värske peab üldhariduslikus õppeasutuses ja kõrgkoolis enne erialast profileerimist olema õppuritele ning üliõpilastele tarvilik astrofüüsika-alane informatsioon ja mis õigupoolest moodustab sellekohase klassika, mida peaks teadma igaüks sõltumatult sellest, kas aine talle meeldib või mitte. Minu isiklik vaatlusastronoomiline kogemus on algoritmiline, millest esimeseks sammuks on kodutöö enne teleskoobi ülesseadmist. Kodutöö sisuks on korralik tähistaeva kaart (E. ja V. Paju, 2009), oskus hinnata valgusreostust, mõned sellised põhitõed ja –asjaolud, mida saab jälgida ka ilma teleskoobita (näiteks päikese loojumine, kuuvarjutus, sobiv vaatlusaeg jne), ning teleskoobi üldine ehitus. Järgmiseks sammuks ei ole paradoksaalsel kombel mitte kiikamine teleskoobi okulaari, vaid vaatlemiseks valitud taevakeha kõigi parameetrite fikseerimine paberite ja kuvarite järgi nii autonoomselt kui ka võrdlevalt suureduse põhjal. Ka kolmas samm on veel tubase teleskoobi eelne. Selleks on internetis leiduvate andmete võrdlemine sõltuvalt viisist, kuidas ning kust need on saadud. Küllalt ülevaatliliku pilti Kuu ja ilmaruumi uuringutest pakub ses suhtes Ameerika Ühendriikide Kosmoseagentuuri NASA 1968. aastal uurimuste virtuaalseks arendamiseks loodud sellekohane keskus<sup>9</sup>. Alles pärast kodutööde sooritamist on viljakas suunata teleskoop näiteks Kuule ja harjutada silmad jälgima muudatusi selles sektoris, mille vaatlemise kasuks oled sa otsustanud.

Muidugi ei anna internet vahetut ning samas kõikehõlmavat vastust küsimusele, kuidas uurida ülinõrku magnetvälju Kõiksuses ja eriti Kuul. Vastav märksõnastik ei olegi ülipikk, ent kindlasti nõuab tema läbitöötamine rohkem aega kui üks nupulevajutus. Minupoolne märksõnastik on järgmine: Kuu magnetväli, Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928; Nobeli füüsikapreemia 1902), Lorentzi jõud, Maa magnetväli, magnetiline induksioon, väljateooria, Pieter Zeeman (1865–1943; Nobeli füüsikapreemia 1902), Zeemani efekt. Temperatuur puutub asjasse muuhulgas ka seepoolest, et mistahes kosmilist päritolu kiirgusosake jõuab Maal asuva detektorini läbi mitme temperatuurivööndi, magnetism seepoolest, et magnetosfäär ei ole homogeenne. Viimasena nimetatud ala on astrofüüsikas jälle üks aktuaalseid

<sup>9</sup><https://www.lpi.usra.edu/exploration>

valdkondi nii ühenduses magnetväljade genereerimise kui ka sellekohaste katseriistade (MHD-Dynamo; alfa-omega-dünamo) konstrueerimisega.

Eespool visandatud märksõnastik magnetismi kohta ei ole kuidagi viisi korreleeritud seostega astrofüüsikaliste teadmiste ja kiirendifüüsika-alaste alusmõistetega ei nende seoste optimumis ega maksimumis. Ülemal on esitatud mainitud seoste äärjooned. Didaktiline probleem seisneb järgnevas: kui suur võiks olla märksõnastikul põhineva asjatundmise miinimum vahemikus „rahuldav-väga hea“ vana skaala järgi? Rahuldavaks hindaksin ma säärase inimlapse teadmisi, kes mõistab (1) magneti mikroskoopilist struktuuri, (2) magnetvälja ja selle teket, (3) elektromagnetilist induksiooni, (4) dia- ja paramagnetismi, (5) Lorentzi jõudu. Head oleksid sellesama inimlapse teadmised siis, kui ta lisaks eelnevale tunneks veel kiiratud osakeste käitumist erineva tugevusega magnetväljades ja magnetite osa toroidaalsetes plasmotronides ning suudaks hinnata vastavate mõõtühikute suurusjärke. Väga head oleksid niisuguse õppuri teadmised, kes oleks võimeline lisaks juba mainitule kirjeldama lähemalt ka Maa magnetismi ja ionosfääri. Kui seda on tahetud liiga palju, siis olgu siin tunnistatud, kuidas ühes hilisõhtuses telefonikõnes arvas filosoofiadoktor (phys.) Erko Jalviste, et see kõik mahub õpilase pähe küll, kui suruda ta nutitelefoniga mällu ja teha kuvaril nähtavaks. Mõistagi jääksid sel juhul ära viited üksikkäsitlustele, ent suureneks matemaatiline aparatuur.

Olemata nutipedagoogika jäägitu pooldaja, aga pidades seda siiski üheks meetoodiliseks lahenduseks, mille vastu on mõttetu sõnida, illustreerin ma selle arendamisel tekkida võivaid probleeme järgmiselt. Olgu meil vaja vaadelda Kuud täiskuu ajal olukorras, kus Kuu ise on tolles geograafilises punktis, kus me parajasti asume, üleni paksude pilvede taga. Kuski mujal võib ta aga olla vabalt nähtav. Kus ja millises olukorras, seda saab jälgida arvuti eriprogrammist NASA „Kuu-elu“ kohta<sup>10</sup>, ainult et – kõige olulisem fakt, mis võiks sealt asjaarmastajale huvi pakkuda, on temperatuur Kuu pinnal. Kas meil on vaja teada seda mitu korda päevas? Arvan, et ei. Rohkem parameetreid võib leida programmist „The Sky Live. Your guide to the Solar System and the night sky“<sup>11</sup>, mis „tuleb“ Greenwich'ist, kuid jällegi – kas meil on ilmingimata tarvis seda topeldada? Kuna sellistel programmidel harjutustik üldiselt puudub, siis jään ma oma senise seisukoha juurde. Kui me sooviksime, et harjutustel oleks mingi praktiline sisu, siis võiks selleks olla ülekanne ühest mõõtühikute süsteemist teise või isegi mõõtühiku sisu avamine või fundamentaalkonstandi numbriline suurus teatava „komakohani“ või valem mingi seose kirjeldamiseks vms. Kui me tahaksime olla järguvõrra nõudlikumad, siis võiks nutitelefoniga abil kirjeldada toateleskoobi ehitust, seadistamist ja taevaalaotuse vaatlemist tema abil. Nagu siinkirjutaja esimesed kogemused juba ülesseatud teleskoobiga on näidanud, algavad võhikute küsimused päris elementaarsetest üksikasjadest: kuidas on teleskoop üldse ehitatud, kust otsast tuleb tema „sisse“ vaadata, mida sellega õieti vaadata saab jne. Kuu ehitus neid väga ei huvita, sest maalase jaoks vahest kõige olulisem tõik on neil teada juba 1969. aastast: Kuu pinnale saab astuda sealt läbi vajumata.

Põhimõtteliselt saaks nutitelefoniga formaadis kirjeldada ülimaldalaate temperatuuride saamist nii matemaatiliselt, katses kui ka tööstuslikult. Neid saamisteid võib omavahel võrrelda näiteks energiakulu tasemel, kuid neid saab ka illustreerida mitme efekti kaudu, olgu sellisteks kas Tallinnas sündinud saksa eraõpetlase

---

<sup>10</sup><https://moon.nasa.gov>

<sup>11</sup><https://theskylive.com>

Thomas Johann Seebecki (1770–1831) efekt, mis on teada aastast 1821, või prantsuse eraõpetlase Jean Charles Peltier' (1785–1845) efekt aastast 1834 või lord Kelvini ehk William Thomsoni (1824–1907) efekt aastast 1856. Mida on võimalik niisuguse andmestiku põhjal õpetada? Temperatuuriskaala pikkust alates absoluutsest nullist kuni „kõtuli“ kaheksani, teatavaid kriitilisi punkte sel skaalal (jäätumistemperatuur, sulamispunkt, keemistemperatuur, temperatuurid agregaatoleku muutumisel), ülimaldaste temperatuuride tehnoloogiat, gaaside veeldamist jne. Alati ei pruugigi pisendada selleks mikrofüüsikalist pilti tingimata just pihufurmaadini, näiteks ränisändvitši võib vabalt kujutada ka harilikul tahvlil.

Kujutlegem nüüd korra läbilõikelist füüsikatundi progümnaasiumis. Jaotugu see tund kolmeks: (1) eelmises tunnis läbivõetud aineosa ja kodutöö kontrollimiseks, (2) uue materjaliga tutvumiseks ja (3) uue materjali esmaseks kinnistamiseks. Neist on kõige fakultatiivsem kindlasti kodune töö, ehkki põhjusi selleks on mitu, mitte sugugi vaid see, et igasugused muud huvid võivad olla paeluvad. Kui tõenäoline on ses olukorras see, et astrofüüsikast ei tarvitse inimlapse kodus leida mitte ainsatki abivahendit ja järelikult saab ta oma reaalsed teadmised selles aines ainult tunnis? See tõenäosus võib olla isegi linnakoolides 90%. Kuna üksnes ühele õpilasele jõuab õpetaja pühenduda tunni vältel ülimalt paar minutit, siis on välditamatu, et osal õpilastest hakkab tunnis lihtsalt igav – kuigi ma ei kahtle selles, et igas klassis leidub keegi, kes on füüsikas tugev ja kelle pealt on kasulik maha kirjutada (kui ta seda lubab!).

Et progümnaasiumi õpilasel igav ei hakkaks, laseksin ma tal omandada neli mõistet hindede „väga hea“. Need on 1) kvant (sh valguskvant ja mõjukvant), 2) optiline foonon, 3) footon ja 4) massikese. Viimase leidmiseks etteantud tingimusel piisab tunnis harilikust joonestuskolmnurgast ja ühest valgest paberilehest suurusega A4. Kui siit edasi lähtuda Landau kunagisest hüpoteesist, et Kõiksuses on neutrontäht üksainus suur punktmass läbimõõduga 10 km, siis tema massikeskme leidmine nõuab juba väga tõsist peamurdmist, mille puhul kool võib olla õnnelik, kui tema kasvandike hulgas leidub kümnekonna aasta kohta vähemasti üks säärast, kellest saabki tõeline astrofüüsik.

Paar soovitus.

Kõige ülevaatlikumaks tähekaardiks eesti keeles tuleb lugeda „Tartu Tähetorni Taevakaarti“ (3. tr 2014), ent asja ajavad ära ka kaart Erna ja Venda Paju ülesandekogu (E. ja V. Paju, 2009) kaante sisekülgedel või siis kaart Enn Pärteli ja Jaak Lõhmuse õpikus (Pärtel jt, 2003; lk 90). Vt ka: <https://stellarium-web.org>. Üldfüüsika sissejuhatavatest õpikutest on vahest kõige haaravam Richard Ph. Feynmani algupäraselt ingliskeelne „The Feynman Lectures on Physics“ (seni viimane trükk 2011, ülesandekogu 2014, nõuanderaamat 2013). Feynmani loenguid on palju tõlgitud ja nendest on tehtud ka populaarseid temaatilisi lühendusi, kuid lugeja peab pidama üha meeles, et need lühendused, nagu ka Feynmani arvukad biograafiad, ei asenda tema loengukursust ja viimane ise ei ole üldarusaadav füüsikaentsüklopeedia. Kui kellelegi käib algupärase Feynmani läbitöötamine üle jõu, võib ta lugeda selle tõlget vene keelde.

## Kasutatud kirjandus

Christmas, J.R. (2001). The Strong Interaction. Füüsikasõber, kes jaksab võtta omaks Feynmani käsitluse kvantelektrodünaamikast, võib proovida, kas tema

- jõud käib üle ka C. A. Garcia Canali preprintist „Neutrinos and strong interactions: QCD (and beyond?)“ 2021.
- Conte, M. jt (2008). An Introduction to the physics of particle accelerators. 2. tr.
- Diep, H.T. (2014). Theory of Magnetism. Application to Surface Physics. lk. 177–200. Meetodini jõudis Enrico Fermi juba 1930. aastatel, kuid jättis tulemused avaldamata.
- Halliday, D. jt. Füüsika põhikursus. Õpik kõrgkoolile II. s.a., lk. 1157–1209. David Halliday vaatab tuumafüüsika põhiprobleeme üldfüüsika seisukohast. Seda võib teha ka inimkonna energiapoliitika aspektist /Letcher T. M. 2014/.
- Ioffe, B. (2018). Atom Projects. Event and People.
- Kapitza in Cambridge and Moscow. Life and letters of a Russian Physicist. Com. And Ed. J. W. Boag, P. E. Rubinin, D. Shoenberg. 1990.
- Krimigis, S.M. (2004). Planetary Magnetospheres. Van Allen Belts of Solar Planets.
- Letcher T.M. (2014). Editor. Future Energy. Improved, Sustainable and Clean Option for Our Planet. lk. 181–214.
- Leutwyler, H. On the history of the strong interaction.  
<https://arxiv.org/pdf/1211.6777v1.pdf>.
- Mansfield, M. jt (2014). Understanding Physics. lk. 589–628.
- Murray, R.L. jt (2014). Nuclear Energy. An Introduction to the Concepts, System and Application of Nuclear Processes. 7. tr; lk. 123–137.
- Paju, E. ja V. (2009). Füüsika ülesannete kogu gümnaasiumile. 4. tr.
- Pärtel, E. jt (2002). Füüsika IX klassile. Soojusõpetus. Aatom ja Universum. 2. tr; lk. 49–152.
- Tsokos, K.A. (2014). Physics for the IB Diploma. 6. tr. lk. 270–313.
- Векслер, В. (1973). С. И. Вавилов в ФИАНе. Успехи физических наук (edaspidi УФН) nr. 9, lk. 187–190; uuesti: Сергей Иванович Вавилов. Очерки и воспоминания. Moskva 1981, 2., täiend. tr., lk. 185–190.
- Современное состояние проблемы ускорения атомных частиц. УФН 1958, nr. 1, lk. 99–110.
- Гинзбург, В. О науке, о себе и о других. Moskva 2004, 3. täiend. tr., lk. 102–125.
- Джелепов, В. Выдающийся теоретик учитель экспериментаторов. Воспоминания о И. Я. Померанчуке. Moskva 1988, lk. 104–108.
- Гуревич, И. Зельдович, Я. Померанчук, И. Харитон, Ю. (1991). Использование ядерной энергии легких элементов. УФН, nr. 5, lk. 171–175.
- Коваленко, А. (2007). От синхрофазотрона к Нуклотрону. УФН, nr. 8, lk. 914–918.
- Ландау, Л.; Ахиезер, А. Лифшиц, Е. (2014). Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. 3. tr., lk. 10–46; 135–165.
- Никитин, В. (2007). Исследования на Синхрофазотроне. УФН, nr. 8, lk. 905–914.

- Окунь, Л. (1989). Понятие массы. (Масса, энергия, относительность). УФН, nr. 7, lk. 511-530.
- Панасюк, В. (1986). Синхротроны нового типа как специализированные генераторы синхротронного и рентгеновского излучений. УФН, nr.4, lk. 723-725.
- Панасюк, М. (2011). Становление и развитие космической физики в МГУ. Радиация в космосе: наследие С. Н. Вернова. УФН, nr.2, lk. 197-210.
- Сахаров, А. (1966). Взрывомагнитные генераторы. УФН, nr.4, lk. 725-734; uvesti: УФН 1991, nr. 1, lk. 51-60.
- Сахаров, А. Людаев, Р. Смирнов, Е. jt (1991). Магнитная кумуляция. УФН, nr. 1, lk. 47-51.
- Строжков, Ю. Базилевская, Г. (2011). С. Н. Вернов и исследования космических лучей в земной атмосфере. УФН, nr. 2, lk. 218-223.
- Яковлев, Д. Хенсель, П. Бейм, Г. Петик, К. (2013). Л. Д. Ландау и концепция нейтронных звезд. УФН, nr. 3, lk. 307-314.