

KUIDAS ÜRGSETEST KVANTVÕBELUSTEST SAID GALAKTIKAD

horisont

KVANTFÜÜSIKA
ERINUMBER
80 LK

6/2024 • DETSEMBER-JAANUAR • HIND 6.90

Kvant- mehaanika avab tee uuele tehnoloogiale

KVANTARVUTI
KOMPAB TAVAARVUTI
VÕIMETE PIIRI

KVANTSENSORID
NÄEVAD LÄBI SEINA



DACIA JOGGER



Kuni 7 istekohta
2,99 % Euriborist sõltumatu fikseeritud
liisinguintress kuni 5-ks aastaks
ECO-G versioonile kingituseks talverehvid*

*Pakkumine kestab, kuni kaup on jätkub.
Kütusekulu 4,7-7,8 l/100 km, CO₂ emissioon 105-135 g/km (WLTP). Dacia soovib  Castrol



dacia.abcmotors.ee

ABC MOTORS
PALDISKI MNT 105, TALLINN

PEREAUTO
PÄRLIMÕISA TEE 24, PÄRNU

**RAEL
AUTOKESKUS**
TALLINNA MNT 97, VIILANDI

TRADILO
TALLINNA MNT 73, HAAPSALU

WIRU AUTO
KREUTZWALDI 7, RAKVERE

SISUKORD

- 3** | Kvantfüüsikal põhinevad mudelid võivad aidata kliimateadlasi
- 4** | Menukas e-rehkendus tuleb ka järgmisel aastal
- 5** | Eestlased asuvad kaardistama Kuu lõunapoolust
- 6** | Kirjuta Vikipeediasse kvantfüüsikast ja aita artikleid keeletoimetada!
- 7** | Parimad teaduse populariseerijad tutvustavad geene, loovust ja päikeseenergeetikat
- 8** | KRISTJAN KANNIKE
Aastasada kvantmehaanilist maailmatunnetust
- 14** | HARDI VEERMÄE
Kuidas ürgsetest kvantvõbelustest galaktikad said
- 20** | GERT HÜTSI
Lainetav tumeaine
- 24** | 24 LAUR JÄRV
Kvantaegruum
- 28** | INTERVJU
Füüsikas on avastus alati ootamatu
- 34** | JOOSEP PATA
Kvantarvutus on uus osakestefüüsika tööriist
- 40** | LUCA MARZOLA
Kvantinformatsioon kiirendites: mis ja milleks?
- 42** | PEETER SAARI
Kvantmehaanika ja mittelineaarne optika
- 46** | TEET ÖRD
Ülijuhtivus, makroskoopiline kvantnähtus
- 52** | ÜLAR ALLAS
Rändlindude kompassi töö põhineb kvantmehaanikal
- 54** | RAIVO STERN
Kvantmagnetism avab tee uutele tehnoloogiatele
- 58** | PIRET KUUSK, VEIKO PALGE
Kvantmehaanika interpretatsioonid

- 62** | JOHANNES HEINSOO
Kvantarvutid kompavad tavaarvutite võimete piiri

- 68** | ANDI HEKTOR
Kuidas kvantsensorid aitavad läbi seinte näha

- 70** | EGON ASTRA, TOOMAS KÜBARESEPP, ANDREI POKATILOV, MATT RAMMO, MEELIS-MAIT SILDOJA
Üksikuid footoneid püüdes

- 72** | MARTIN VÄLLIK
Kvantmüstika

- 74** | KOSMOSEKROONIKA

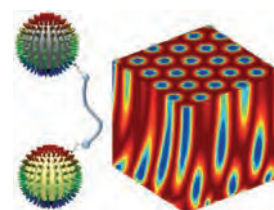
- 76** | JÕUPROOVID OLÜMPIAADIL
Noorfüüsikute olümpiaadirekted Indoneesiasse ja Gruusiasse

- 77** | RAAMAT
Helgoland. Kvantrevolutsiooni mõtestamine
Kuus kergemat lugemist

- 78** | ENIGMA
Hooletu pitsalõikaja

- 79** | RISTSÕNA

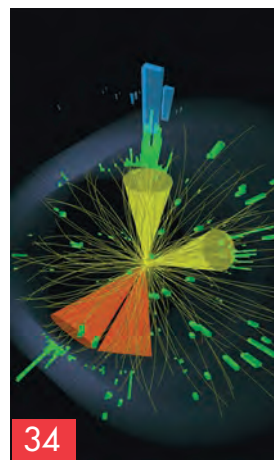
- 80** | MÄLUSÄRU
Auhinnaks raamat



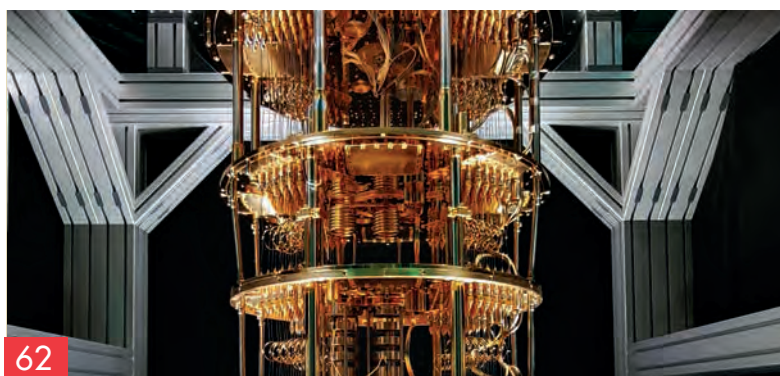
54



28



34



62



Terve maailm on kvantmehaaniline

2024. aastal tähistab nüüdisaegne kvantfüüsika 100. aastapäeva. Nimelt, 1924. aastal esitas Prantsuse füüsik Louis de Broglie mõtte, et kõik füüsikalised osakesed käituvad nagu lained, pannes sellega aluse füüsika uuele harule – kvantfüüsikale. Kuigi kvantfüüsika iseärasused ilmnevad eelkõige mikromaailmas, on see senini täpseim teooria, mis kirjeldab kõike meie ümber. Praeguseks on kvantmaailmaga seotud avastused tihedalt põimunud meie teadmistega materjalide ehitusest, keemiast ja bioloogias kuni astronoomiani. Need teadmised on aidanud luua nüüdseks meie igapäevaelu osaks saanud pooljuhttehnoloogiad ja lisanud hoogu uute seadmete väljatöötamisele.

Selle väarika tähtpäeva puhul otsustasime koostöös keemilise ja bioloogilise füüsika instituudi (KBFI) ning Tartu ülikooli teadlastega anda välja tavapärasest ajakirjanumbrist paksema ehk 80-leheküljelise kvantfüüsikale pühendatud erinumbri. Peale kvantfüüsika ajaloo ja laiema tähtsuse tutvustamise annab erinumber läbilõike olulisematest teemadest, millega teadlased sel alal praegu tegelevad nii Eestis kui ka mujal, olgu selleks kas või kosmiliste struktuuride kvantalgete ja -efektide, kvantarvutustehnoloogia, kvantinfo, kvantarvutite, autosekundiliste välgete, ülijuhtivuse või kvantmagnetite uurimine. Kõigest sellest kirjutavad lähemalt meie parimad asjatundjad. Samuti tutvustavad erinumbris kvantfüüsikal põhinevaid rakendusi Eesti tehnoloogiaettevõtted GScan ja Metrosert.

Esmapilgul tundub kvantfüüsika võrdlemisi elukauge valdkonnana ja teoreetikute pärusmaana. Ent erinumbriga püüame näidata, et koos uudsete ja põnevate tehnoloogiate arendamisega muutub see tegevusala aina elulisemaks. Tõsi, kvantnähtuste olemuse üksikasjad on keerulised, seepärast on selle valla eri tahkude populaarses vaimus tutvustamine proovikivi nii tänuväärne autoritele kui ka artiklite toimetajatele. Lugeja ei pea ennast sugugi halvasti tundma, kui adub, et mingid asjad käivad üle mõistuse, sest sama tõdemuseni on jõudnud isegi kvantmehaanika kõige paremad asjatundjad. Füüsik Peeter Saari, kes tutvustab oma artiklis kvantmehaanika ja mittelineaarse optika seoseid, tsiteerib seejuures tabavalt suurkujusid. Teoreetilise füüsika korüfee Richard Feynman on pillanud lause: „Ma arvan, et võin julgelt öelda, et keegi ei mõista kvantmehaanikat.“ Üks kvantmehaanika alusepanijaid Niels Bohr on omakorda maininud: „Kui kvantmehaanika teid segadusse ei aja, pole te sellest tegelikult aru saanud.“

Head lugemist ja ilusat peagi saabuvat pühadeaega! •

Ulvar Käärt
Ulvar Käärt, peatoimetaja



ERINUMBRI VÄLJAANDMIST ON TOETANUD
EESTI TEADUSAGENTUUR

ESIKAANEL: Kunstniku kujutus kvantpõimitusest. FOTO: VIDA PRESS / ALAMY

Ulvar Käärt, peatoimetaja
ulvar@horisont.ee

Piret Pappel, toimetaja
piret@horisont.ee

Monika Salo, keeleteoimetaja
monika.salo@loodusajakiri.ee

Kersti Tormis, kujundaja
kersti@horisont.ee

Mariliis Kesküla, turundusjuht
mariliis@loodusajakiri.ee

Riho Kinks, reklaam
riho.kinks@loodusajakiri.ee

Katre Palo, tegevjuht
loodusajakiri@loodusajakiri.ee

Tellimine: 617 7717,
www.tellimine.ee/loodusajakirjad

Ilmunud aastast 1967, 6 numbrit aastas
Toimetus: Rävala pst 10,
15042 Tallinn
tel 610 4105
e-post: horisont@horisont.ee
Vaata ka Horisondi sein Facebookis!

Väljaandja: MTÜ Loodusajakiri,
Rävala pst 10, 15042 Tallinn
e-post: loodusajakiri@loodusajakiri.ee

ISSN 2228-3471 (e-luger)
Autoriõigus: MTÜ Loodusajakiri,
2024
Trükkunud Printall AS



EESTI TEADUSTE AKADEEMIA



HARIDUS- JA
TEADUSMINISTEERIUM

Ajakiri ilmub
haridus- ja teadusministeeriumi
toetusel



Trükitööde
4041 0820



USA-s California osariigis asuva San Diego rannikul on veetase viimase poolsajandi jooksul tõusnud ligi 15 sentimeetrit. Musta tulevikustsenaariumi põhjal hakkavad suurenevad üleujutused mõjutama linna turismitööstust

Kvantfüüsikal põhinevad mudelid võivad aidata kliimateadlasi

Maailmamerel, mis võtab enda alla tervelt 70% Maa pinnast, on kliima kujunemises tähtis roll. Ookeane on võrreldud suure köögiga, kus meie ilmasupp valmis keedetakse. Kliimamudelid seevastu jäävad meredest kogutud andmetega tihti hätta. Selle vastu võiks saada, kui arvestada kvantfüüsika printsiipe.

Maailmameres talletub umbes 90% soojusest, mille kasvuhoonegaasid on lõksu püüdnud. Nii pidurdab see atmosfääri soojenemist. Alates 1960. aastatest on ookeanid soojenenud aina kiiremini. Üha kõrgema temperatuuriga merevesi mõjutab elustiku liigilist koosseisu ning sulatab liustikke ja jääd, tõstes nii maa-

ilmamere vee taset. Merevees salvestunud energiahulka peetakse mudelarvutuste põhjal tavaliselt väiksemaks kui tegelik kogus. Muutmaks mudeleid täpsemaks, soovib Austraalia Sydney tehnikaülikooli emeriitprofessor Geoff Smith vaadata kvantfüüsika poole.

Hiljuti ajakirjas Journal of Physics Communications ilmunud uuringus annab ta nõu kasutada nii-öelda kvantsoojusfüüsikalist paradigmat. Kui päikesekiirgus soojendab merevett, ei talletata energiat mitte ainult soojusena, vaid ka hübriidpaaridena, mis moodustuvad fotonite ja võnkuvate veemolekulide vahel.

Smithi sõnul on sellised paarid looduslik kvantinfo hoidmise vorm. Sellisel erilisel viisil on energiat talletatud kogu maailmameri eksistentsi jooksul ja see on aidanud ookeani soojustasakaalu hoida. Ent nüüd on soojenemine kiirenud, Maa atmosfäärist pärit lisasoojus suurendab nii tavalise soojusenergia kui ka hübriidpaaridena salvestunud energia hulka.

Smithi arvates tuleks sedalaadi energiat kliimamudelites arvesse võtta. •

PhysOrg

Menukas e-rehkendus tuleb ka järgmisel aastal

Eesti esimene e-rehkendus peeti võistlusena 2. oktoobril. Koolimatemaatika teemalised ülesanded on endiselt populaarsed, neid on lahendanud ligi 30 000 inimest.

Neli võitjat said auhinnad kätte 19. novembril tunnustusüritusel Tallinna tehnikaülikoolis. Parim gümnaasiumiõpilane Kaspar Palmsaar Pärnu Koidula gümnaasiumist saab tulla tehnikaülikooli õppima ilma sisseastumiseksamiteta ja valida endale meeldiva eriala. Parim põhikooliõpilane Konrad Matto Kärkla gümnaasiumist sai Tallinna tehnikaülikooli vilistlaskogult tunnustuseks iPadi.

Parima õpetaja auhinna pälvinud Piret Hordo saab osaleda tehnikaülikoolis vabalt valitud täienduskoolitusel ja parim tavaosaleja Riho Klement läbida ühe mikroraadiprogrammi.

E-rehkenduse eesmärk on propageerida matemaatikat kui eluks vajalikku vahendit. Võistlust korraldas Tallinna tehnikaülikool koos Eesti rahvusringhäälinguga. Küsimused olid koostanud matemaatikaõpetajad Hele Kiisel, Helen Kaasik ja Kristel Tamm. Ülesandeid



HENRI-KRISTIAN KIRSIP / TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

saab lahendada veebilehel <https://erehkendus.err.ee/> kuni tänavuse aasta lõpuni. Järgmine võistlus toimub 9. oktoobril 2025. •

Horisont / Tallinna tehnikaülikool

E-rehkenduse põhikooliastme võitja Konrad Matto (vasakul) Kärkla gümnaasiumist ja Tallinna tehnikaülikooli rektor Tiit Land



TÄNAPÄEV

Kõlvatu Tallinn

Koostanud Made Isak, Madli Vanamölder

Raamatust saab muuhulgas teada, mida tähendab hooramine, mis asutus oli Punane Klooster, mida tehti Mustas Kassis, mida pandi kirja hooranimekirjadesse, kuidas karistati „au kaotanud“ naist, mitu korda saadeti 1930. aastate kurikuulus pornopiltnik Ned de Baggo Tallinnast välja.

Liivimaa ajalugu

Christian Kelch

Kelchi suurteos koosneb kahest osast, mis käsitleb Eesti- ja Lätimaa minevikku kuni 1690. aastani. Kroonika teine köide käsitleb aastaid 1690–1707, see säilis pikki aastaid üksnes käsikirjana ning on tänaseni parim allikas suure näljahäda aastate ning Põhjasõja-aegsete sündmuste kohta. See on üks kõige olulisemaid kroonikatekste Eesti ajaloost.



Tänavusel ajakirja Eesti Loodus loodusfotovõistlusel pälvis Horisondi auhinna ANNE AASPÖLLU kosmilist vaatemängu pakkuv pilt „Värviplahvatus“. Aaspõllu on selle kevadise foto sünnilugu kirjeldanud niimoodi: „Päikese aktiivsus on praegu kõrge ja see 11. mai öö oli unustamatult võimsa virmalistemänguga.“ Eesti Looduse fotovõistlus on Eesti suurim pikaajaline loodusfotovõistlus, kuhu sel aastal saadeti ühtekokku 1250 pilti

Eestlased asuvad kaardistama Kuu lõunapoolust

Euroopa kosmoseagentuur on valinud Kuu uurimiseks välja seitse uut missiooni, millest üks kannab nime LUMI (*Lunar Mapper and Inspector*). Seda juhib Tartu ülikooli Tartu observatooriumi kosmose-tehnoloogia kaasprofessor Mihkel Pajusalu. Missiooni koordineerib Tšehhi ettevõtte TRL Space.

Lõppeesmärk on pildistada kolmest kaamerast koosneva süsteemi abil mitme aasta jooksul Kuu lõunapoolust ja koostada suure lahtusega kõrguskaart piirkonna kohta. Peamine uurimisaparatuur arendatakse välja ja ehitatakse valmis Eestis.

Kuu lõunapooluse sügavates kraatrites on väga külm ja seal leidub veest tekkinud jää. Seetõttu on pakutud idee luua piirkonda alaline baas astronautidele. Plaanimaks turvalisi maandumisi, on täpne kaart hädavajalik. Siiani pole inimese jalg veel Kuu lõunapoolusele astunud, kuid NASA loodab esimesed inimesed sinna lennutada mõne aasta jooksul. •

Horisont / Tartu observatoorium



Karmi kliimaga Kuu lõunapoolus pakub oma jäätunud vee poolest huvi kosmoseagentuuridele

GREGORY H. REVERA / NSAE COMP / WIKIPEDIA

Kirjuta Vikipeediasse kvantfüüsikast ja aita artikleid keeletoimetada!

Vikipeedia ootab kaastöid iga päev, kuid praegu on käimas mitu põnevat võistlust.

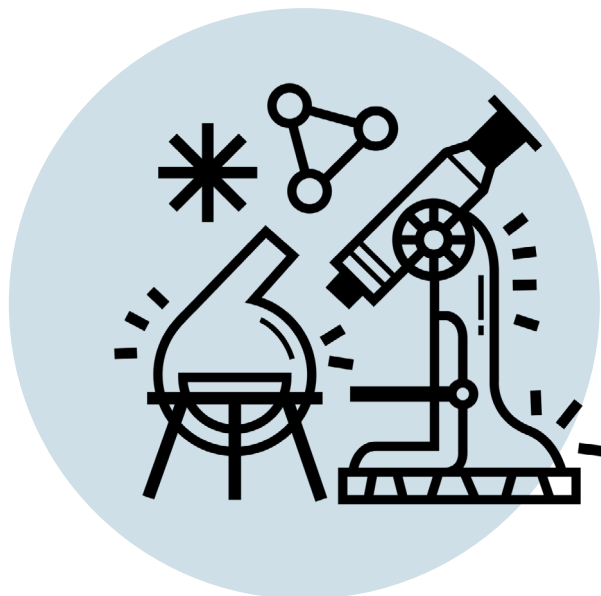
Kuni 15. detsembrini kestab novembris alanud artiklivõistlus „Teadus Vikipeediasse 2024“, mille eesmärk on populariseerida eestikeelset teadust ja edendada eesti teaduskeelt. Auhinnafond on 5000 eurot. Korraldajad on Eesti noorte teaduste akadeemia ja Wikimedia Eesti. Oodatakse teaduslikel uurimustel ja publikatsioonidel põhinevaid teemakohaseid ülevaateartikleid. Kas oled hiljuti mõne erialaaine raames või seminari, lõpu- või uurimistöö jaoks mingid teemad läbi töötanud? Pane need Vikipeediasse üles, nii saavad ka teised targemaks ja eesti teaduskeel rikkamaks.

Põhiauhinnafond on 4000 eurot, millest pool läheb sotsiaal- ja humanitaarteaduste valdkonna artiklitele ning teine pool loodus- ja täppisteaduste ning meditsiinivaldkonna artiklitele. Auhinnafondi aitab rahastada haridus- ja teadusministeerium.

AS Metrosert ja riigi infokommunikatsiooni sihtasutus (RIKS) kutsuvad üles kirjutama artikleid kvantfüüsika ja -tehnoloogia kohta. Metrosert koordineerib Eestis kvanttehnoloogiaga seotud tegevusi. Koos RIKSiga osaleb Metrosert Eesti esimeses kvantside projektis EstQCI (sellest saab lugeda siinsest numbrist lk 74–75).

Populariseerimaks kvanttehnoloogiaid, selle võimalusi ja kitsaskohti, antakse artiklikonkursil välja 1000 euro suurune eriauhind, millele saavad kandideerida kvantteemadel kirjutajad. Näiteks olid ajakirja toimetamise ja trükkimineku ajal

**MUUDAME
TEADUSE
NÄHTAVAMAKS!**

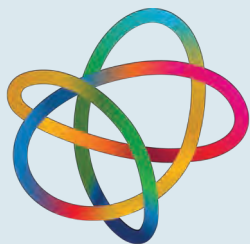


eestikeelsest Vikipeediast puudu artikkel kvantmetroloogia, kvantvõtme jaotuse, kvantoleku, kvantsimulatsiooni ja Belli seisundi kohta.

Artiklivõistlusega samal ajal käib ka teadusfoto pildikorje, mida korraldab Wikimedia Eesti. Pildikorje eesmärk on toetada teadusliku sisuga fotode jõudmist Vikipeediasse. Eesti teadusfoto võistlus peetakse jälle 2025. aasta novembris, aga teadusteemadel fotosid võib Vikipeedia pildipanka lisada kogu aeg. Samuti on teretulnud fotod, mis võib-olla ei pretendeeri kõrgetele kohtadele fotovõistlustel, kuid sobivad hästi vikiartiklite illustreerimiseks. Vikipeedia vajab ka selliseid pilte, sest tuhanded artiklid on veel ilma fotodeta.

Detsembrikuuga on alanud ka kuni emakeelepäevani kestvad Vikipeedia keeletoimetamistalgud. Selle auhinnafond on 2750 eurot. Talgute eesmärk on parandada Vikipeedia artiklite kvaliteeti ja väärtustada keeletoimetaja ametit, tõsta esile vabatahtlikke toimetajaid ning anda panus eesti keele arendamisse ja hoiusse. Talgud korraldavad Tartu ülikool, Eesti keeletoimetajate liit ja MTÜ Wikimedia Eesti. Seekordsed Vikipeedia keeletoimetustalgud on järjekorras juba kaheksandal. Varasematel talgutel on 117 osalist toimetanud kokku 3235 artiklit.

Horisont / Wikimedia Eesti



**INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology**

Head kvantfüüsika-aastat!

ÜRO on kuulutanud 2025. aasta rahvusvaheliseks kvantteaduse ja -tehnoloogia aastaks (*International Year of Quantum Science and Technology*). Saja aasta jooksul on kvantfüüsika tublisti mõjutanud kogu inimkonda, nii teadust, kultuuri kui ka seda, kuidas mõistame looduse ja universumi toimimist. Prognooside järgi saab kvanttehnoloogiast järgmine suur murrang inimkonna ajaloos.

Teemakohased materjalid ja üritused leiab kodulehelt

<https://quantum2025.org/en/>. Teadushuvilised on oodatud ka ise korraldama üritusi, mis on keskendunud kvantteadusele ja -tehnoloogiale.

Parimad teaduse populariseerijad tutvustavad geene, loovust ja päikeseenergeetikat



MAILI VAHENURM

Tänavused auhinnasaajad ühel pildil koos. Eesti teaduse populariseerimise auhinda on antud välja alates 2006. aastast. Auhinna või tunnustuse pälvinutel on õigus kasutada märki „Riiklikult tunnustatud teaduse populariseerija“

Eesti teadusagentuur andis 15. novembril peetud teaduskommunikatsiooni aasta-konverentsil kätte Eesti teaduse populariseerimise auhinnad kuues kategoorias.

Tiiu Silla elutööpreemia pikaajalise süstemaatilise teaduse ja tehnoloogia populariseerimise eest sai Tartu ülikooli molekulaar- ja rakubioloogia instituudi rakubioloogia professor Toivo Maimets. Professor Maimets on andnud hindamatu panuse, suurendamaks ühiskonna teaduspõhisust, et inimesed oleksid teadlikud ajakohasest meditsiinist ja biotehnoloogiast. Ta on pööranud tähelepanu ka eesti teaduskeele arendamisele.

Kategooria „Teaduse ja tehnoloogia populariseerimine audiovisuaalse ja elektroonilise meedia abil“ peapreemia pälvis Eesti geenivaramu teadusportaal „Minu Geenivaramu“. Selle kaudu saavad geenidoonorid tutvuda personaalsete teadusuuringute tulemustega, mis annavad teavet geneetiliste eelsoodumuste ja päritolu kohta. Projekti eestvedajad on Natalia Pervjakova, Kristjan Metsalu, Lili Milani ja Mait Metspalu.

Teise preemia pälvis eesti keele instituudi „Keelehääl“, kus osalevad keeleteadlased ja teiste valdkondade esindajad aitavad mõtestada keele(teaduse) tähtsust ühiskonnas ja näidata, milliseid

päriselulisi rakendusi võib keeleteadusel olla. Saatemeeskonda kuuluvad Sandra Saar, Kairi Janson ja Merily Remma.

Kategoorias „Teaduse ja tehnoloogia populariseerimine trükisõna abil“ sai peapreemia Jaan Aru populaarteaduslik raamat „Loovusest ja loogemistest“, mille eesmärk on ergutada inimesi mõtlema sellest, mis on loovus, miks meil seda vaja on ja kuidas seda toetada.

Teise preemia said kultuuriloolase ja folkloristi Marju Kõivupuu populaarteaduslikud publikatsioonid, mis on inspireerinud inimesi mõtlema looduskonnale ja kultuuripärandi koostoime üle.

Kategoorias „Tegevused / tegevuste sarjad teaduse ja tehnoloogia populariseerimisel“ sai peapreemia Tartu observatooriumi Barlova teadusõhtute sari, mis toob korra kuus kokku teadlased ja uudishimuliku publiku.

Teise preemia sai 7- kuni 18-aastastele noortele mõeldud energeetikalaager Enerhack, mida korraldavad Igor Krupinski ja Alesja Nehhožina.

Kategooria „Parim teaduse ja tehnoloogia populariseerija“ (teadlane, ajakirjanik, õpetaja jne) peapreemia sai ajakirjanik, meediateadlane ja noorte teadusajakirjanike õpetaja Marju Himma.

Teise preemia sai teadlane, õppejõud

ja tehisarutõestaja Andres Karjus. Muu hulgas on Andres Karjus pidanud populaarteaduslikke loenguid õpilastele ning koolitanud õpetajaid tehisarutõestajatele sihipäraselt kasutama ja ka oma õpilasi juhendama.

Peale selle pälvis teise preemia ka päikeseenergiatehnoloogiate eestkõneleja Maarja Grossberg-Kuusk, kes on avaldanud populariseerivaid artikleid päikeseenergeetika kohta, andnud intervjuusid ja korraldanud koolitusi päikeseenergiatehnoloogiate teemal.

Kategooria „Parim uus algatus teaduse ja tehnoloogia populariseerimisel“ peapreemia sai koolinoortele mõeldud kosmosekonkurss „Eesti otsib Estronauti“, mille meeskonda kuulusid Karl-Kristjan Neufeld ja Rasmus Rohtla. Eesti suurim kosmosekonkurss aitas suurendada noorte huvi kosmoseteaduste vastu.

Tartu observatooriumi ja ESERO Eesti tunnustuse Linnutee Täht loodus- ja täppisteaduse edendamise eest pälvis Kuressaare kooli õppejuht Aire Siinvert, kes on aidanud tuua kosmoseteadust kätte Saaremaa lastele.

Eesti teadusajakirjanike seltsi teadusajakirjanduse sõbra auhinna Õkul sai folklorist ja akadeemik Mare Kõiva. •

Horisont / Eesti teadusagentuur

Aastasada kvantmehaanilist maailmatunnetust

KRISTJAN KANNIKE

Füüsika on küps teadus, kus pole enam suurt midagi teha, ütles noore saksa füüsiku Max Plancki juhendaja talle aastal 1878. Ometi oli Max Planck üks füüsikuist, kes pani aluse saja aasta tagusele kvantmehaanika revolutsioonile.

FOTOD: WIKIPEDIA



Planckile ei andnud rahu, miks kehad ei kiirga igal sagedusel ühepalju energiat. Klassikalise füüsika järgi ei peaks küdev kamin levitama mitte ainult õdusat soojust ja pehmet valgust, vaid ühtviisi heledalt kiirgama ohtlikke röntgeni- ja gammakiiri, rääkimata ultravioletist. Seletamaks, miks me end kamina ääres soojendades ära ei kiirita, pakkus Planck, et valguslaine energia ei saa olla suvaline, vaid peab olema täisarv väike-seid energiahulki ehk kvante. Hiljem osutus, et valguskvandid on täieõiguslikud osakesed, mida hakati kutsuma footoniteks. Kvantmehaanika loomise järel selgus, et sellistel osakestel nagu elektron on omakorda laineomadused.

Igapäevaelus me seda ei märka, sest kvantefektid on seotud Plancki konstandiga, mis on väga väike, umbes $10^{-34} \text{ J Hz}^{-1}$. (Näiteks valguskvandi suurus on Plancki konstandi h ja valguse võnkesageduse ν korrutis $h\nu$.) Me oleme aatomi mõõtmega võrreldes niivõrd suured, et isegi silmale vaevu nähtava tolmutüübeme lainepikkus on kübeme mõõtmega kõrvutades väga väike.

Pealegi on kvantolekud õrnad. Kuna soojus on aatomite ja molekulide liikumine, tõuklevad toatemperatuuril kehad aatomid ja molekulid pidevalt omavahel ja üksiku aatomi kvantolek muutub kogu aeg. Seetõttu jahutatakse näiteks kvantarvutite protsessorid maha absoluutse nulli lähedale ja üritatakse neid ümbritsevast keskkonnast võimalikult hästi isoleerida. Madalal temperatuuril näitab kvantmehaanika ennast ka aatomist palju suuremas mastaabis ja ainetel tekivad kummalised omadused. Absoluutse nulli lähedal kaob metalli elektritakistus täielikult – tekib ülijuhtivus. Samalaadne nähtus on ülivoolavus, kus vedelik kaotab viskoossuse ja voolab hõõrdumiseta.



Kvantmehaanika isad (kellaosuti liikumise suunas):
Erwin Schrödinger (1887–1961), Werner Heisenberg (1901–1976),
Max Born (1882–1970) ja Pascual Jordan (1902–1980).

Schrödingeri lainemehaanika ja Heisenbergi, Borni ja Jordani maatriksmehaanika osutusid peagi ühtse kvantmehaanika erilaadseteks matemaatilisteks kirjeldusteks. Kvantmehaanika esimene suursaavutus oli aatomite kiirgusspektritele selgituse andmine

Omapäi jäetud vedel heelium ei püsi pudeliski paigal, vaid ronib üle nõu serva ja voolab maha. Ülivedelikku segades tekivad selles keerised, mis ajaga ei kao. Muide, arvatakse, et neutrontähtede tuumad võivad olla ülivoolavas olekus ja seetõttu pöörelda tähe kestast sõltumatult.

Selgituseta spektrijooned

Kuid naaseme kvantmehaanika tekkeloo juurde. Peale kehade kiirguse oli teisi lahendamata küsimusi. Füüsikud ei osanud ära seletada aatomite spektrijoone. Suurlinnade iseloomulik öine vaatepilt on säravad neoontorudest silidid. Gaaslahendustoru kiirgab peamiselt ühte värvi valgust, mille lainepikkus on olnud toru täitvast gaasist. Eelmise sajandi alguseks olid hoolikad spektroskopistid ära mõõtnud paljude keemiliste elementide kiirgavate spektrijoonte sagedused. Ent ei osatud seletada ei nende joonte sagedusi ega seda, miks üldse aatomid kiirgavad valgust ainult kindlatel sagedustel. Klassikalise füüsika järgi peaks ümber aatomituuma tiirlev elektron kui kiirendusega liikuv osake laias spektrivahemikus pidevalt valgust kiirates energiat kaotama ja kiiresti aatomituumale kukkuma. Meie õnneks on aatomid tegelikult stabiilsed. Kuid isegi kõige lihtsama aatomi – vesiniku aatomi, kus tuuma ümber tiirleb üksainus elektron – spektrijoone ei osatud seletada.

Esimene pääsuke oli taanlase Niels Bohri 1913. a aatomimudel: sisuliselt ta ütles, et elektron lihtsalt ei saa tuumale langeda, vaid võib tiirelda ümber tuuma ainult kindlatel orbiitidel.

Lõpliku selgituse said aatomid alles 1925. aastal, kui saksa füüsikud Werner Heisenberg, Max Born ja Pascual Jordan löid maatriksmehaanika ja austria füüsik Erwin Schrödinger lainemehaanika. Varsti tehti kindlaks, et need kaks kvantmehaanika käsitusviisi on tegelikult samaväärsed.

Leiulained

Newtoni klassikalises mehaanikas teame korraga osakese – näiteks püssikuuli või elektroni – asukohta ja kiirust igal ajahetkel. Kiiruse muutumine – kiirendus – on määratud osakesele mõjuva jõuga. Püssikuulile mõjub gravitatsiooni jõud, elektronile elektriväli.

Kvantmehaanikas teame elektroni kohta vähem. Elektroni kirjeldab nn leiulaine, matemaatiline funktsioon, mille ruut annab elektroni antud asukohast leidmise tõenäosuse. See on kõik, mida kvantmehaanika võimaldab: me ei saa enne mõõtmist kindlalt öelda, kus elektron asub või kui kiiresti ta liigub. Mõõtmisel leiame elektroni juhuslikust asukohast, mille tõenäosus on määratud leiulainega. Matemaatilise kallakuga lugejale võib öelda, et kvantmehaanika on tavalise tõenäosusteooria üldistus, mis on matemaatiliselt kõige loomulikum. Muidugi peavad kehtima tavalised tõenäosuste omadused. Meie elektron on kusagil kindlasti olemas, nii et selle kogu ruumist leidmise tõenäosus on üks. Millegi tõenäosus peab olema positiivne ja leiulaine ruut kui tõenäosus seda rahuldab.

Erinevalt püssikuulist ei saa me korraga teada elektroni asukohta ja kiirust. Mida täpsemalt me elektroni asukohta ühel hetkel ära mõõdame, seda vähem teame tema kiiruse kohta. Kui jälle elektroni kiirus on täpselt määratud, võib elektroni leida igalt poolt. (Leidub teisi füüsikaliste suuruste paare, mida korraga täpselt määrata ei saa: näiteks pöörlemiskiirus ja pöörlemistelg.)

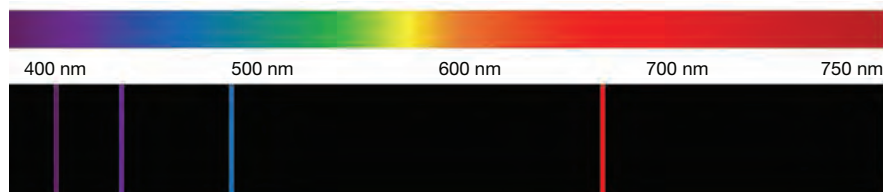
Sellised määramatuse seosed tulenevad aine laineomadustest. Neil on selge analoogia helilainetega: niisugune seos valitseb heli sageduse ja kestuse vahel. Kindla sagedusega ehk puhta tooni saamiseks peaks helilaine levima lõpmata aja. Lõpliku kestusega noodis on alati muid toone, kuna enne ja pärast noodi kõlamist helilainet ei ole – see tuleb teiste toonidega summutada. Nii on pikk noot tromboonil puhas heli, aga

Erinevalt püssikuulist ei saa me korraga teada elektroni asukohta ja kiirust. Mida täpsemalt me elektroni asukohta ühel hetkel ära mõõdame, seda vähem teame tema kiiruse kohta.

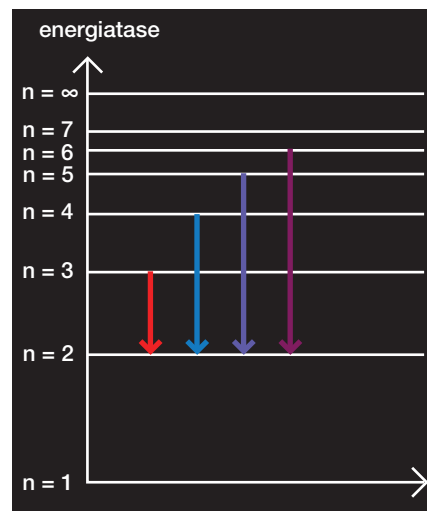
lühike tõrtsatus sisaldab kõikvõimalike kõrgustega helisid. Kvantmehaanikas on osakeste omadused kätkeatud leiulaines, mis käituvad samamoodi kui helilained.

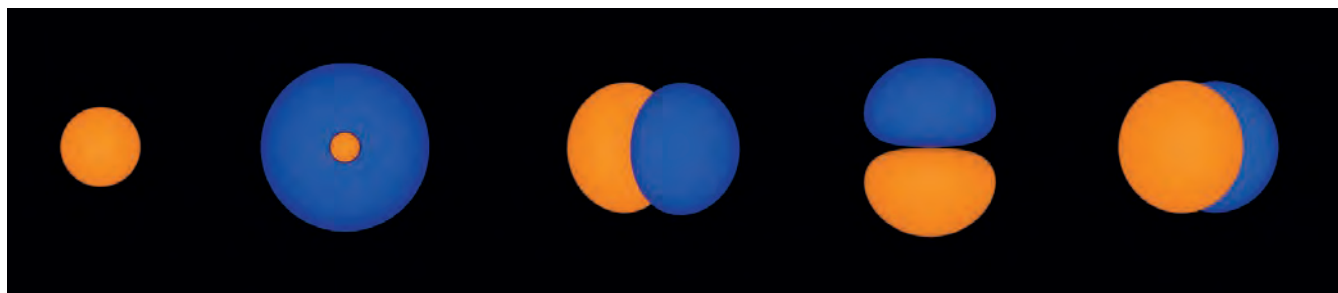
Laseme elektroni lahti kindlas kohas, teisisõnu surume tema leiulaine alguses kitsasse ruumi kokku. Kui elektron oleks klassikaline osake, jääks ta – kui talle jõudu ei mõjuks – paigale seisma. Kuid elektroni leiulaine hakkab aja möödudes laiali hajuma ja elektroni võib leida üha suuremast ruumipiirkonnast. Kui elektroni asukoht on täpselt määratud, ei ole üldse määratud elektroni kiirus, mis võib ulatuda nullist lõpmatuseni.

Kuidas siis toimib vesiniku aatom? Aatomis mõjub elektronile aatomituumale tõmbejõud. Kuid erinevalt klassikalise mehaanikast ei saa elektron tuumale langeda, kuna selle leiulainet ei anna kui tahes väiksesse ruumalasse kokku suruda. Seepärast käitub elektroni leiulaine aatomituumale ümbritseva seisulainena; elektron võib olla ainult kindla energiaga olekutes. Kõige madalama energiaga olekus võib elektroni kõige tõenäolisemalt leida tuuma ümbritsevast kerast. Järgmise energiaga ole-

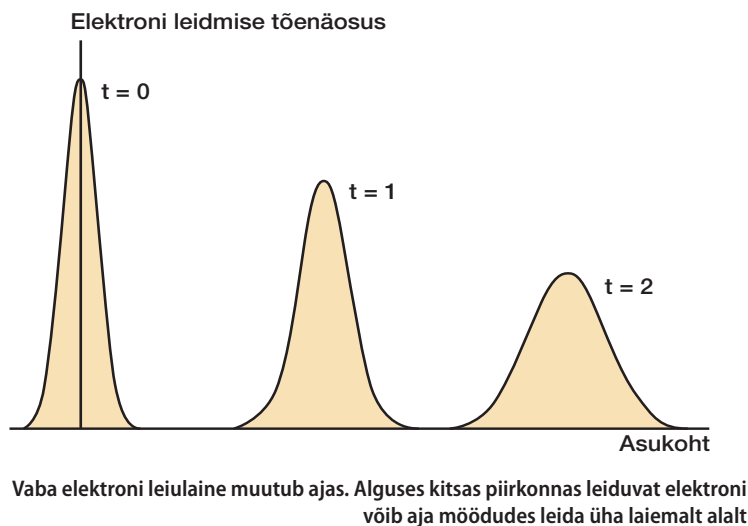


Vesiniku aatomi nähtavad spektrijooned tekivad elektroni minekul kõrgemalt energiatasemelt teisele tasemele





Vesiniku aatomi kõige madalama energiaga oleku (vasakul) ja ergastatud olekute leiulained. Kvantmehaanika tõttu ei lange elektron aatomituumale, vaid teda võib leida suuremalt ruumalalt tuuma ümbrusest



kus võib elektroni leida tuumast kaugemal ja hantlikujulisest ruumalast. Selliseid üha kõrgema energiaga olekuid on lõpmatu hulk. Elektron püsib kõrgema energiaga olekus ainult hetke: ta kiirgab footoni ja läheb üle mõnda madalama energiaga olekusse. Kuna kiiratava valgusosakese energia on määratud energiate vahega, kiirgabki vesinik valgust ainult kindlatel sagedustel. Nii tekib kitsaste spektrijoontega spekter. Matemaatiliselt kirjeldab leiulaine käitumist Schrödingeri võrrand.

Mõõtmismured

Mainisime, et elektroni asukoha saame kindlaks teha mõõtes. Mõõtmisel on kvantmehaanikas eriline roll. Kui muidu muutub leiulaine pidevalt, siis mõõtmine sunnib leiulaine järsku kindlasse

Kahel elektronil võib olla ühine leiulaine, nii et kui me mõõdame ühe elektroni omadusi, mõjutab see teist elektroni, mis võib asuda esimesest väga kaugel.

olekusse. Kuna kogu maailm on kvantmehaaniline, peaks mõõteaparaati ja tervet maailma samuti kirjeldama kvantolek, ent ühest kirjeldust selle kohta pole suudetud leida. Mõõtmine on nii otsekui tõrvatilk meepütis. Selle probleemi lahendamisel on tehtud edusamme, aga me ei ole seni lõpuni aru saanud, kuidas kvantmaailmast saab igapäevane klassikaline maailm.

Kvantmehaanikale vahest kõige olemuslikum nähtus on kvantpõimitus. Kaks (või rohkem) osakest võivad olla omavahel põimitud moel, mille abil ei saa küll edasi anda informatsiooni, kuid mis on tugevam kui klassikaline korrelatsioon. Nimelt ei ole leiulaine mitte tingimata ühe osakese omadus. Kahel elektronil võib olla ühine leiulaine, nii et kui me mõõdame ühe elektroni omadusi, mõjutab see teist elektroni, mis võib asuda esimesest väga kaugel.

Peale asukoha ja kiiruse on elektronil spinn, mis näitab, kas elektroni pöörlemistelg on mingi telje suhtes orienteeritud üles või alla. Elektroni spinn ei ole üldjuhul samuti määratud enne, kui seda mõõdame. On antud

ainult spinni „üles“ või „alla“ leidmise tõenäosus. Põimime omavahel kaks elektroni nii, et nende spinnide summa on null. Jätame ühe elektroni enda kätte ja viime teise maailma otsa. Kui elektronid on keskkonnast piisavalt hästi eraldatud – seda on lihtsam öelda kui teha! – jäävad nad omavahel põimituks. Kui mõõdame ära oma elektroni spinni ja see tuleb üles, teame kohe, et teine peab olema suunaga alla. Ja vastupidi.

„Tontlik kaugmõju“

Kas kõlab nagu info ülekandmine valguse kiirusest kiiremini? Ei, informatsiooni kahjuks nii üle kanda ei saa, kuna elektroni spinn tuleb mõõtmisel üles või alla juhuslikult. Kuid ometi on elektronid omavahel ühendatud kuidagi tugevamini, kui seda võimaldab klassikaline füüsika. Füüsikakorüfee Albert Einstein pidas seda ebaloomulikuks „tontlikuks kaugmõjaks“ (sks *spukhafte Fernwirkung*). Tema arvates ei saanud kvantmehaanika leiulaine seetõttu olla täielik looduse kirjeldus, vaid elektronid pidid lahku minnes n-ö kokku leppima, kumb neist pärast mõõtmist on „üles“ ja kumb „alla“. Ent ei Einstein ega Bohr tulnud selle peale, et tontlikku kaugmõju saab mõõta. Alles 1964. aastal esitas iiri füüsik John Bell nn Belli võrratused, mis on rikutud, kui Einsteini oletus ei kehti. Esimese tuntuima Belli võrratuse proovile paneva eksperimendi tegi 1982. aastal Alain Aspect (footonite, mitte elektronidega). Selgus, et Einsteini kardetud tontlik kaugmõju on tõepoolest olemas! Hilisemad katsed on tulemusi täpsustanud ja võimalikke lünki argumendis täitnud.

Me ei ole seni lõpuni aru saanud, kuidas kvantmaailmast saab igapäevane klassikaline maailm.

Kahepilukatse

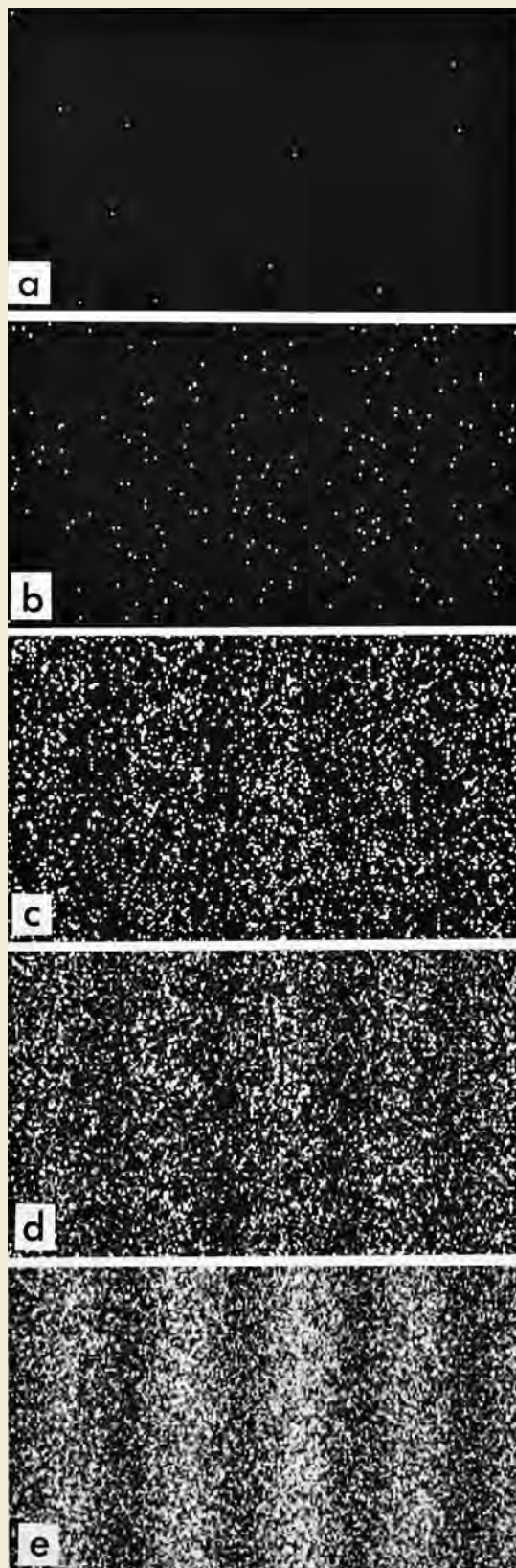
Laseme läbi seinas oleva kahe lähedastiku pilu osakesi või laineid ekraanile, mis paikneb seina taga. Klassikalise mehaanika järgi läheb osake läbi kas ühest või teisest pilust ning teisele poole seina tekib ekraanile kummagi pilu kujutis. Kui seina tabab laine, levivad pilusid läbinud lained nende ümber ringikujuliselt edasi. Seal, kus ekraanil kattuvad kaks laineharja või kaks lainepõhja, võimendavad need üksteist ja ekraanile tekib hele triip. Kui aga ühe laine hari kattub teise põhjaga, siis nad kustutavad teineteise ja ekraan jääb tumedaks. Niiviisi tekib iseloomulik triibuline interferentsipilt. Suunates piludele elektronide kiire, tekib üksikute elektronide kujutistest triibuline interferentsipilt. Iga üksiku elektroni leiulaine läheb läbi mõlemast pilust ja liitub iseendaga. Muide, kui üritaksime kindlaks teha, millisest pilust elektron läbi läheb, siis häiriksime elektroni kvantolekut, nii et tekiks samasugune kujutis nagu tavaliste osakeste korral.

Eksperimentaatoritel on kahepilukatse õnnestunud nii footonite ja elektronidega kui ka isegi päris suurte molekulidega: 2001. a 60 süsinikuaatomist koosneva jalgpallikujulise fullereenimolekuliga ja 2019. a koguni kuni 2000 aatomist koosnevate molekulidega. •

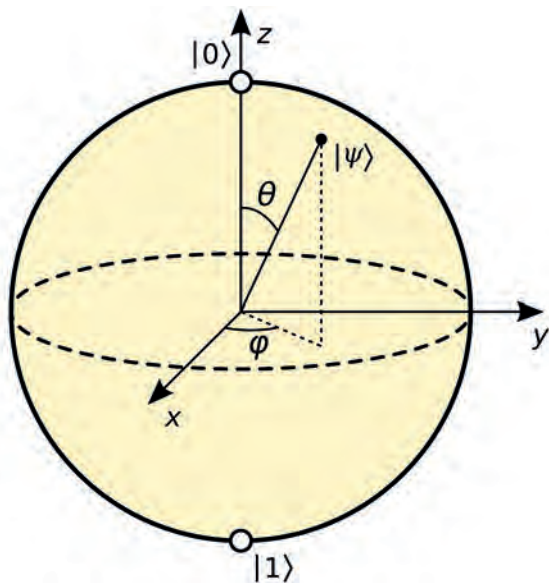
Pilusid läbivad osakesed tekitavad pilude kujutise

Pilusid läbivad lained tekitavad interferentsipildi

Pilusid läbivad kvantosakesed tekitavad teralise interferentsipildi



Elektronidega kahepilukatse interferentsipildi teke ajas

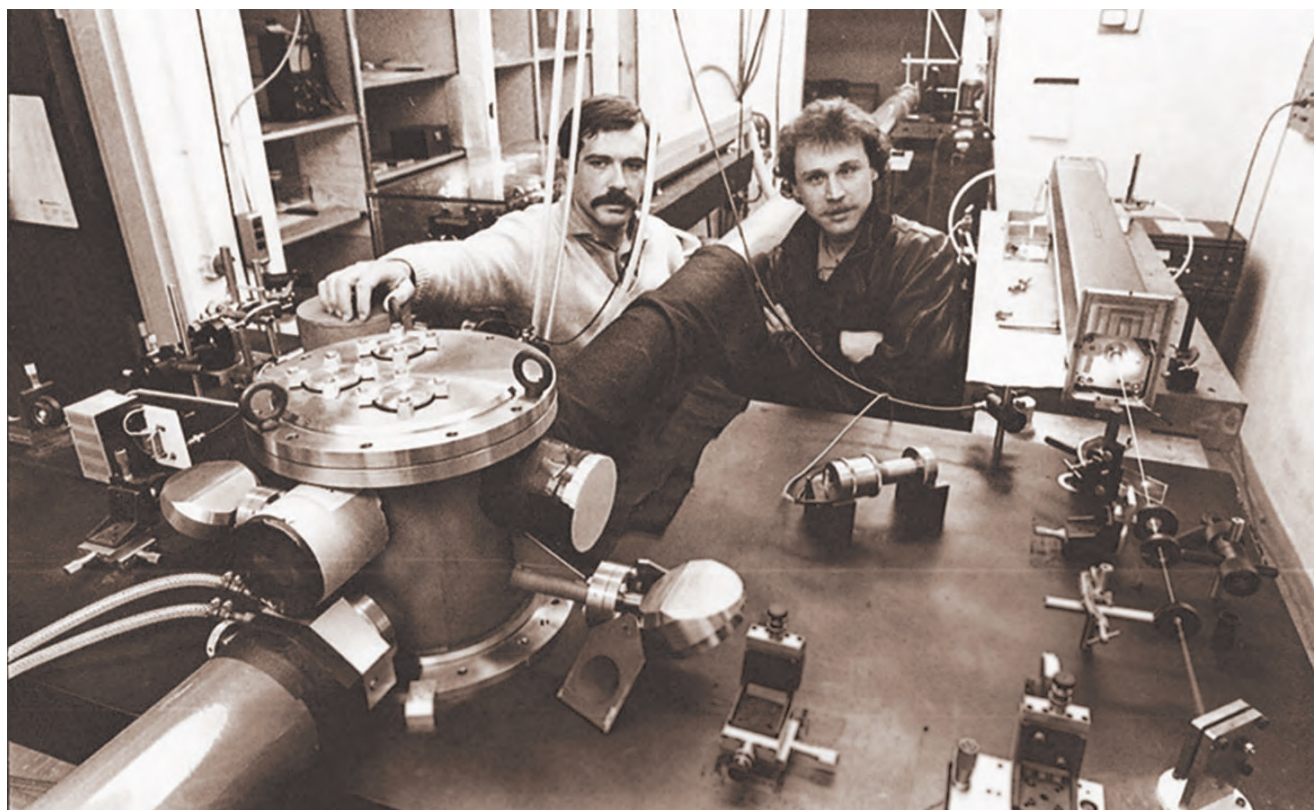


Blochi sfäär, mis kujutab elektroni spinni leiulainet ψ , mille orientatsioonis (nurkades ϕ ja θ) on rohkem informatsiooni, kuid leiulainega ψ määratud tõenäosuse põhjal saame mõõtmisel kätte ainult juhusliku „üles“ või „alla“

Meil on alust uskuda, et terve maailm on kvantmehaaniline.

Kvantarvuti edendab kvantmehaanilist uurimistööd

Kahte spinni olekut saab kvantarvutis kasutada kahendarvude 0 ja 1 tähistamiseks. Klassikaliselt on informatsiooniühik bitt, mille väärtus võib olla 0 või 1. Kvantmehaanilise kvantbitina kannab elektron rohkem informatsiooni, kuid mõõtmisel ei saa seda kätte, sest tulemus on leiuline ruudu põhjal juhuslikult kas „üles“ või „alla“. Ilmekalt saab elektroni spinni leiulainet kujutada nn Blochi sfääril, kus „üles“ ja „alla“ ehk 0 ja 1 on antud vertikaaltelje sihis. Päris kvantarvutil on vaja kümneid ja sadu töökindlaid kvantbitte.



Alain Aspect koos kolleegiga oma laboris

Tänu kvantarvutitele on uuesti hakatud hoogsalt uurima ka kvantmehaanika aluseid. Meil on alust uskuda, et terve maailm on kvantmehaaniline. LHC kiirendis saame mõõta osakeste omadusi ja kvantmehaanilist põimitust enneolematute energiatega korral ning kvantmehaanika kirjeldab toimuvat suurepäraselt. Ainult gravitatsiooni teooria ei ole siiani allunud teoreet-

tikute jõupingutustele muuta see kvantmehaaniliseks. Siiski on raske ette kujutada, et osa maailmast, nagu elektromagnetiline vastastikmõju, oleks kvantmehaaniline, teine osa, nagu gravitatsioon, aga klassikaline: nii saaks gravitatsiooni abil kindlaks teha elektroni „tegeliku“ asukoha, mida elektromagnetism ei luba. Kui rakendada kvantmehaanikat mustadele aukudele, jõua-

me Hawkingu kiirguseni ja musta augu infoparadoksini. Üha võimsamate kvantarvutite ehitamine pakub samuti uusi võimalusi katsetada kvantmehaanikaga.

•

Kristjan Kannike (1978) on keemilise ja bioloogilise füüsika instituudi vanemteadur, kelle teadustöö põhisuunad on osakestefüüsika, kosmoloogia ja varajase universumi füüsika.

Rotermanni soolaladu

Majatäis arhitektuuri!



Muuseumi suur saal

Rotermanni soolalao suur saal on armastatud kontserdipaik. Piduliku õhtusöögi saab sinna katta paarisajale külalisele.



Uuri ruumi keldrisaalis

Rotermanni soolalao võlvkelderi põnev kesk-kond igas eas uudishimulikele on eriline paik ka ürituste korraldamiseks.



Seminariruum

Püsinäituse ELAV RUUM naabriks on 60 istekohaga loegusaal-seminariruum ning 20-kohaline õppeklass. Väike tuur näituse-saalis sobib suurepäraselt koosoleku puhkepausiks!

Kuidas ürgsetest kvantvõbelustest galaktikad said

HARDI VEERMÄE

Muistsed loomismüüdid etendasid suurt osa maailma struktureerimisel ja mõtestamisel. Nende järgi algas maailm tihti millestki lihtsast. Skandinaavia kosmogoonias esindas ürgse müstilise tühjuse ideed Ginnungagap, Vana-Kreekas jumal Chaos (Kaos) ning kristlikus mütoloogias lõi jumal maa ja taeva eimillestki. Kuigi praegusaial ei kipu me moodsat maailmakorda enam tekkelugudega iseloomustama, aitab universumi esimeste hetkede tundmine fundamentaalsel tasemel aru saada sellest, miks on maailm meie ümber just niisugune, nagu me seda näeme.

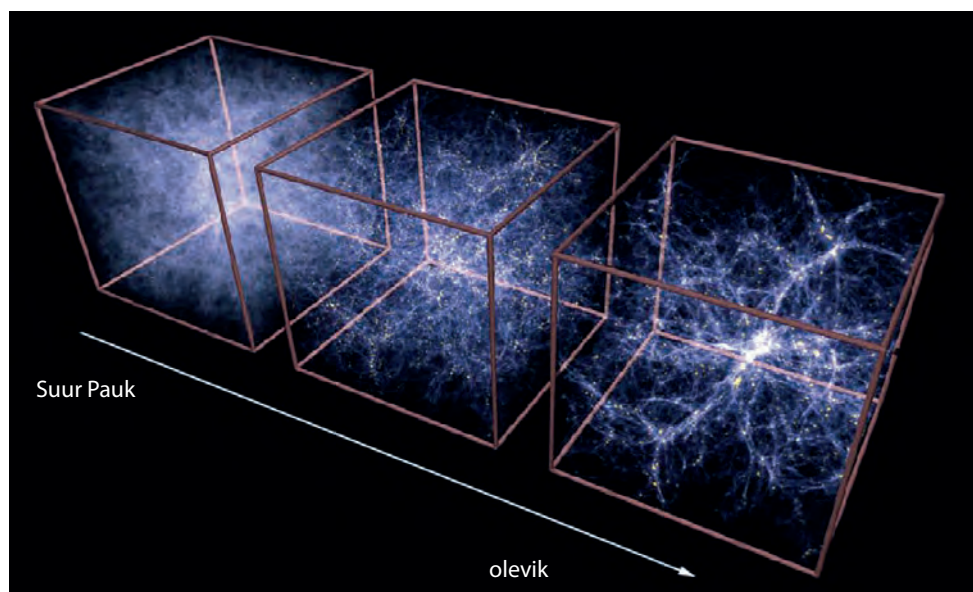
Varaseim ajajärk, mida tuntud füüsikaseadused kirjeldada lubavad, on kosmiline inflatsioon: ülikiire paisumise periood, kus said kokku kvantfüüsika ja gravitatsioon, mikro- ja megamaailm. Nagu mainitud müüdid oli universumi algolek väga lihtne. Kogu maailmaruum oli ühtlaselt täidetud ühe väljaga – inflatoniga –, mis inflatsiooni lõppedes lagunes elementaarosakesteks, millest koosneme ka meie ja kõik meid ümbritsev ning mille kvantvõnkumistest said alguse galaktikad, tähed ja planeedid. Kosmilise inflatsiooni teooria on praegu peamine hüpotees, mis selgitab aine jaotumist universumis tervikuna ja määrab Suure Pangu algtingimused. Samas, kuna seda ülivarajast perioodi siiani vahetult vaadelda ei suudeta, on selle kohta käiv eksperimentaalne tõestusmaterjal vaid kaudne. Tegu on üldise teoreetilise raamistikuga, mille detailide kirjeldamiseks on kirja pandud sadu kõrge energia füüsika mudeleid. Milline neist on teaduslik fiktsioon ja kas mõni neist kirjeldab reaalselt maailma, näitavad vaid tulevased vaatlused.

Kuidas näeb välja universum tervikuna?

Tuleb tõdeda, et elame väga erilises kohas. Mitte seetõttu, et Maa on senini

ainus kivimürakas, millel leidub meie teadaolevalt elu, vaid just seepärast, et siin üldse leidub midagi. Kui satuksime suvalisse kohta universumis, valitseks meie ümber peaaegu absoluutne vaakum, sest universumi ühes ruutmeetris leidub keskmiselt ainult viie vesinikaatomi jagu ainet. Seda on 26 suurusjärku ehk 10^{26} korda vähem kui Maa atmosfääris. Meie ümbruses on aine seega äärmiselt ebaühtlaselt jaotunud. Enamik nähtavast aineest on koondunud taevakehadesse, nagu tähed ja planeedid.

Need on kogunenud galaktikatesse ja viimased omakorda galaktikaparvedesse, mille suurus ulatub kümnetesse miljonitesse valgusaastatesse. Suuremates mastaapides paistab aine see-eest olevat jaotunud üllatavalt ühtlaselt. Astronoomiliste vaatluste järgi iseloomustab aine suuremastaabilist jaotust praegu kõikjal universumis nn kargstruktuur, kus aine on kogunenud filamentidega ühendatud sõlmedesse ehk galaktikate superparvedesse, mida ümbritsevad kosmilised tühimikud.



Superarvutitega simuleeritud universumi suuremastaabilise struktuuri areng. Kastid näitavad, kuidas kasvavad ühtlaselt jaotunud aineest filamentid ja galaktikate superparved. Tumedad piirkonnad nende vahel on kümnete kuni sadade miljonite valgusaastate suurusel kosmilised tühimikud.

JONIS KOHANDATUD ALLIKA CXC/MPE/V. SPRINGEL PÕHJAL

Kosmilise inflatsiooni teooria on praegu peamine hüpotees, mis selgitab aine jaotumist universumis tervikuna ja määrab Suure Pangu algtingimused.

Teadmine, kuidas mõnesaja tuhande aasta vanune universum välja nägi, lubab meil universumit imiteerida, sest see määrab ära algtingimused, mille evolutsiooni kosmoloogilistes mudelites saab superarvutite abil numbriliselt uurida. Võrreldes arvutusi vaatlustega, saame hinnata, millised kosmoloogilised mudelid meie universumit paremini kirjeldavad. Näiteks teame: selleks et reliktkiirguse väikestest ebataasusustest areneksid piisavalt kiiresti välja galaktikad, peab universum peale nähtava aine sisaldama sellest viis korda

rohkem tumeainet – senini tundmatu koostisega ainet, mis ise valgust ei neela ega kiirga ning mida seetõttu ei saa teleskoopide abil vahetult tuvastada.

See pole aga kogu aeg nii olnud. Astronoomilised vaatlused näitavad, et kauges minevikus pidi aine olema jaotunud väga ühetaoliselt. Praegused kosmilised struktuurid on tekkinud miljardite aastate jooksul, siis, kui piirkonnad, kus leidis veidi rohkem ainet, iseenda raskusjõu mõjul kokku kukkusid.

Kõige täpsemad andmed aine jaotuse kohta varajases universumis pärine-

vad Plancki kosmoseteleskoobi kosmilise mikrolaine-taustkiirguse ehk reliktkiirguse täppismõõtmistest. Ükskõik, mis suunas me ka ei vaataks, on reliktkiirguse temperatuur põhimõtteliselt sama. See kõigub kogu taevakaardi ulatuses keskel läbi ühe osa sajast tuhandest. Reliktkiirgus pärineb 13,8 miljardi aasta vanusest kuumast plasmast. Kuna plasma temperatuur on vahetult seotud selle tihedusega, siis teame, et ka tollane ainetihedus pidi kõikjal praktiliselt ühetaoline olema. Samas ei saanud see olla absoluutselt ühetaoline: kui poleks leidunud väikeseid ebataasusi, poleks tekkinud ei galaktikaid, tähti ega ka elu Maal.

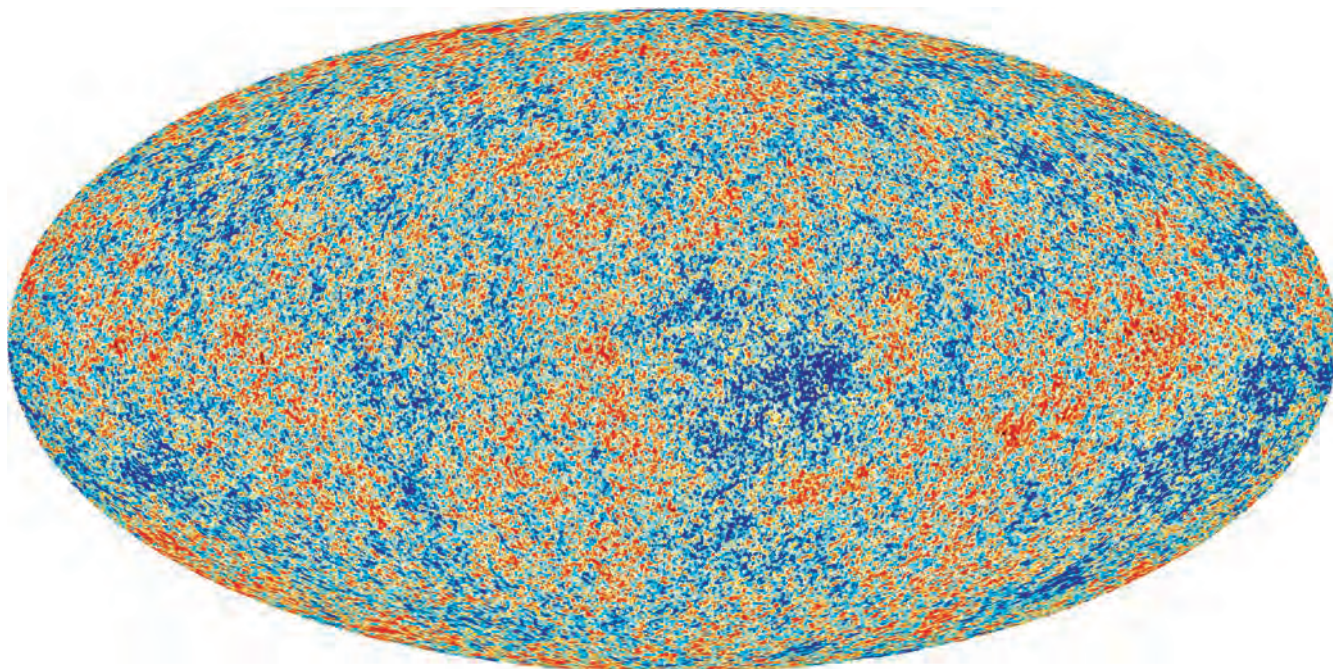
Suur Pauk, rekombinatsioon ja reliktkiirgus

Astronoomiliste vaatluste järgi ruum paisub. Seega pidi aine noores universumis olema palju kuumem ja tihedam. Suure Pauku teooria põhjal sai universum alguse ülitihedast ja üliluumast olekust, mis aja möödudes paisumise tõttu hõredamaks muutus. Reliktkiirgus pärineb 380 000 aasta vanusest universumist enne planeetide, tähtede ja galaktikate teket, kui kogu maailmaruumi täitis umbes 3000 kraadi Kelvini jahtunud aine. Enne reliktkiirguse tekkimist, kui temperatuur ületas 3000 kraadi, täitis maailmaruumi peamiselt ioniseeritud vesinikust ning vabadest elektronidest koosnev läbipaistmatu plasma. Kui selle temperatuur langes alla 3000 kraadi, ühinesid aatomituumad ja elektronid neutraalseteks aatomiteks. Selle rekombinatsiooni käigus muutus universum elektromagnetkiirgusele läbipaistvaks. Reliktkiirgus on toonase kuumast plasma soojuskiirgus, mis on meieni jõudmiseks läbinud kümneid miljardite valgusaastaid ja nüüdseks ruumi paisumise tõttu 2,7 kraadi Kelvini jahtunud. •

Arusaamatu ühetaolisus

Miks on reliktkiirgus just selline? Esi-
mene probleem tekib, kui proovida seletada äärmuslikku ühetaolisust. Vastassuundadest meieni jõudev reliktkiirgus pärineb piirkondadest, mis on teineteisest kümnete miljardite valgusaastate kaugusel. Kui need piirkonnad pole kunagi põhjuslikus kontaktis olnud, siis on keeruline seletada, kuidas neil saab olla sedavõrd sarnane temperatuur.

Seda küsimust nimetatakse horisondi probleemiks. Nimetus tuleb kosmoloogilisest horisondist, mõttelisest sfäärist, millest kaugemalt ei jõua meieni



EUROOPA KOSMOSEAGENTUUR, PLANCKI KOSMOSETELESKOOP

Ülesvõte 400 000 aasta vanusest universumist. Taevakaart on kokku pandud Plancki kosmoseteleskoobi andmete põhjal ja kujutab kosmilist mikrolainelist taustkiirgust. Punased ja sinised piirkonnad tähistavad temperatuuri ja seeläbi ka aine tiheduse kõikumisi. Sinistes piirkondades on tihedus keskmisest umbes saja tuhandiku võrra väiksem ja punastes sama palju suurem

ükski signaal. Nimelt, kuna informatsioon levib ülimalt valguse kiirusega ja kaugemal asuvad objektid eemalduvad meist universumi paisumise tõttu kiiremini, on nähtav osa universumist paratamatult lõpliku suurusega. Olenemata sellest, kas universum ise on lõplik või lõpmatu. Kosmoloogilisest horisondist väljaspool asuvad objektid pole meiega põhjuslikult seotud ega saa meid kuidagi mõjutada. Praegu asub kosmoloogiline horisont meist 46,9 miljardi valgusaasta kaugusel.

Kasutatakse ka olemuselt sarnast Hubble'i horisondi mõistet. Hubble'i horisont on mõtteline piir, millest kaugemal asuvad taevakehad eemalduvad meist ruumi paisumise tõttu valgusest kiiremini. See asub meist 14,4 miljardi valgusaasta kaugusel.

Suure Paugu teooria järgi oli meid nähtav universum minevikus kokku surutud tunduvalt väiksemasse ruumalasse. Kas pole mõeldav, et kõik praegu nähtavad piirkonnad puutusid kauges minevikus piisavalt lähedalt kokku, et nende temperatuur saaks ühtlustuda? Paraku ei ole see seletus korrektne, sest horisondi suurus muutub ajas. Mida kiirem on paisumine, seda väiksem on horisont. Kuna suurema energiatihedusega aine paisutab ruumi kiiremini, pidi horisont varases universumis olema väiksem. Praegu on ju maailmaruum keskeltläbi palju hõredamalt ainega täidetud kui noores universumis. Hullelgi veel, arvutused näitavad, et horisont kasvas kiiremini, kui ruum paisus. Teisisõnu, reliktkiirguse tekke eel sisaldas horisont tunduvalt väiksemat osa nähtavast universumist, mistõttu pidid teineteisest kaugel asuvad piirkonnad olema põhjuslikult nõrgemini seotud kui tänapäeval.

Kosmiline inflatsioon

Ruumi paisumine ei pruugi aga iga mateeria tüüpi hõrendada. Sellise omadusega on näiteks praegu maailmaruumi täitev tumeenergia, mille energiatihedus paistab olevat ajas konstantsena püsinud. Kuna nii nähtav kui ka tumeaine muutuvad aja jooksul hõredamaks, on tumeenergias viimaste miljardite aastate jooksul saanud universumi

Kuna suurema energiatihedusega aine paisutab ruumi kiiremini, pidi horisont varases universumis olema väiksem.

energiabilansi domineeriv komponent. Aja möödudes selle osakaal aina suureneb. Kui tumeenergia energiatihedus on ajas täiesti muutumatu, siis ei muutu tulevikus ka universumi paisumise kiirus.

Konstantse energiatihedusega mateeria tõttu paisub ruum eksponentsiaalselt kiiresti. Näiteks peaks tumeenergia ruumi iga 12 miljardi aasta tagant kaks korda suuremaks venitama. Kui ülivarajases universumis valitseb samalaadne, kuid kõvasti suurema energiatihedusega mateeria, tinginuks see ülikiire paisumise perioodi, mida nimetatakse kosmiliseks inflatsiooniks. Kõige ekstreemsemal juhul võis kosmilise inflatsiooni periood kesta 6×10^{-37} sekundit ehk kuuekümnepäevase triljondiku triljondiku triljondikust sekundist ja paisutada ruumi 10^{26} korda suuremaks. See tähendab, et inflatsioon venitas ühe nanomeetri kümne tuhande valgusaasta suuruseks. Kosmilise inflatsiooni lõppedes jätkus kiire, kuid aeglustuv paisumine. Järgneva 380 000 aasta jooksul ehk ajaks, kui tekkis reliktkiirgus, paisus ruum veel umbes sama palju kordi. Seeläbi võis kosmiline inflatsioon paisutada tollase 10^{-30} meetrise Hubble'i horisondi miljardite valgusaastate suurusks.

Kosmilise inflatsiooni teooria lahendab seeläbi horisondi probleemi ja selektab reliktkiirguse äärmuslikku ühetaolisust. Üksiti aitab kiire paisumine lahendada teisigi kosmoloogilise probleeme, nagu näiteks tasasuse ja magnetmonopolide probleemi. Üks veenvamaid argumente kosmilise inflatsiooni poolt on aga selle võime tekitada aine jaotuses imepisikesi ürgseid ebataasusi, mis kattuvad suurepäraselt reliktkiirguse väikeste temperatuurirütmidega. Nende tekkemehanismi mõistmiseks tuleb pöörduda kvantfüüsika poole.

Rahutud kvantväljad

Kosmilise inflatsiooni liikumapanevaks jõuks peetakse hüpoteetilist välja, mida nimetatakse inflatoniks. Inflatsiooni ajal püsib selle välja tugevus praktiliselt konstantsena. See tagab ühtlasi muutumatu energiatiheduse, mida on tarvis ruumi eksponentsiaalseks paisutamiseks. Mida inflaton endast täpsemalt kujutab, pole teada. Selle kirjeldamiseks leidub suur hulk kvantväljateoreetilisi mudeleid. Nende järgi on inflaton enamasti skalaarväli (sellel puudub spinn),

mis eksisteerib väga kõrgetel energiatel. Pole välistatud, et inflatonina ei võiks käituda ka osakestefüüsika standardmudelisse kuuluv ja 2012. aastal avastatud Higgsi väli. See on ka ainus senini teadaolev skalaarväli.

Kvantväljateooria on tänapäeva kõrge energia ja osakestefüüsika kontseptuaalne ja matemaatiline raamistik, mille abil on sõnastatud ka osakestefüüsika standardmudel. See on kvantmehaanika edasiarendus, mis võimaldab kirjeldada välju ja valguse kiirusele lähedastel kiirustel liikuvaid osakesi. Kvantväljateooria järgi vastab igale väljale üks osake: selle välja kvant. Kui 19. sajandil kirja pandud klassikalises (mitte kvant-) väljateoorias, nagu elektromagnetism, võis välja energia muutuda pidevalt, siis kvantväljateoorias muutub see diskreetsete ühikute ehk kvantide kaupa. Näiteks elektromagnetvälja osake on foton. Kuna elektromagnetväli on kvantiseeritud, on fotonid selle väikseimad jagamatud osad, mis võivad kanda nii energiat kui ka informatsiooni.

Teisest küljest lainetavad kvantväljad samuti nagu klassikalised väljadki ning kvantfüüsika reeglite kohaselt käituvad välja kvandid nii osakeste kui ka lainena. Isegi vaakum ehk välja madalaima võimaliku energiaga olek on kvantvälja teoorias tunduvalt keerukam kui klassikalises füüsikas. Kuigi vaakumolek ei sisalda ühtki osakest, pole see lihtsalt tühi ruum. Kvantmehaanika määramatuse printsiibi järgi ei ole osakese asukohta ega kiirust kunagi võimalik ühel ajal lõputu täpsusega määrata: osakesed kas liiguvad või on ruumis „laiali määritud“. Samamoodi pole kvantväljade väljatugevus täiesti üheselt määratud, vaid fluktrueerib.

Inflaton on kvantväli. Kui klassikaline füüsika lubab inflatonil kõikjal täpselt ühesugune olla, siis kvantfluktuatsioonide tõttu pole see võimalik. Inflatsiooni ajal tekitavad inflatoni kvanthäiritused mikroskoopilisi ebataasusi, mis on võrreldavad inflatsiooniaegse horisondi suurusega. Nagu enne nägime,

Kvantväljateooria järgi vastab igale väljale üks osake: selle välja kvant. Kvantfüüsika reeglite kohaselt käituvad välja kvandid nii osakeste kui ka lainena.

võivad sellised häiritused paisuda kogu nähtava universumi suuruseks. Mõned neist ongi jätnud oma jälje reliktkiirgusesse.

Kvantiseeritud gravitatsioon ja tensorhäiritused

Kui üks erand kõrvale jätta, on kogu maailm, selle osakesed ja vastastikmõjud fundamentaalsel tasemel kirjeldatud kvantväljateooriaga. See erand on gravitatsioon. Nimelt eeldab kvantväljateooria, et kvantväljad eksisteerivad kindla kujuga aegruumis, kuid gravitatsiooni kirjeldav üldrelatiivsusteooria on klassikaline teooria dünaamilisest ja kõverast aegruumist. Gravitatsioon on selle järgi aegruumi kõveruse ilming. Kvantgravitatsioon poleks seega pelgalt veel ühe vastastikmõju kvantteooria, vaid kirjeldaks kvantiseeritud aegruumi ennast. Kvantgravitatsioonist on praeguseks saanud teoreetilise füüsika püha graal. Hoolimata peaaegu sajandi-

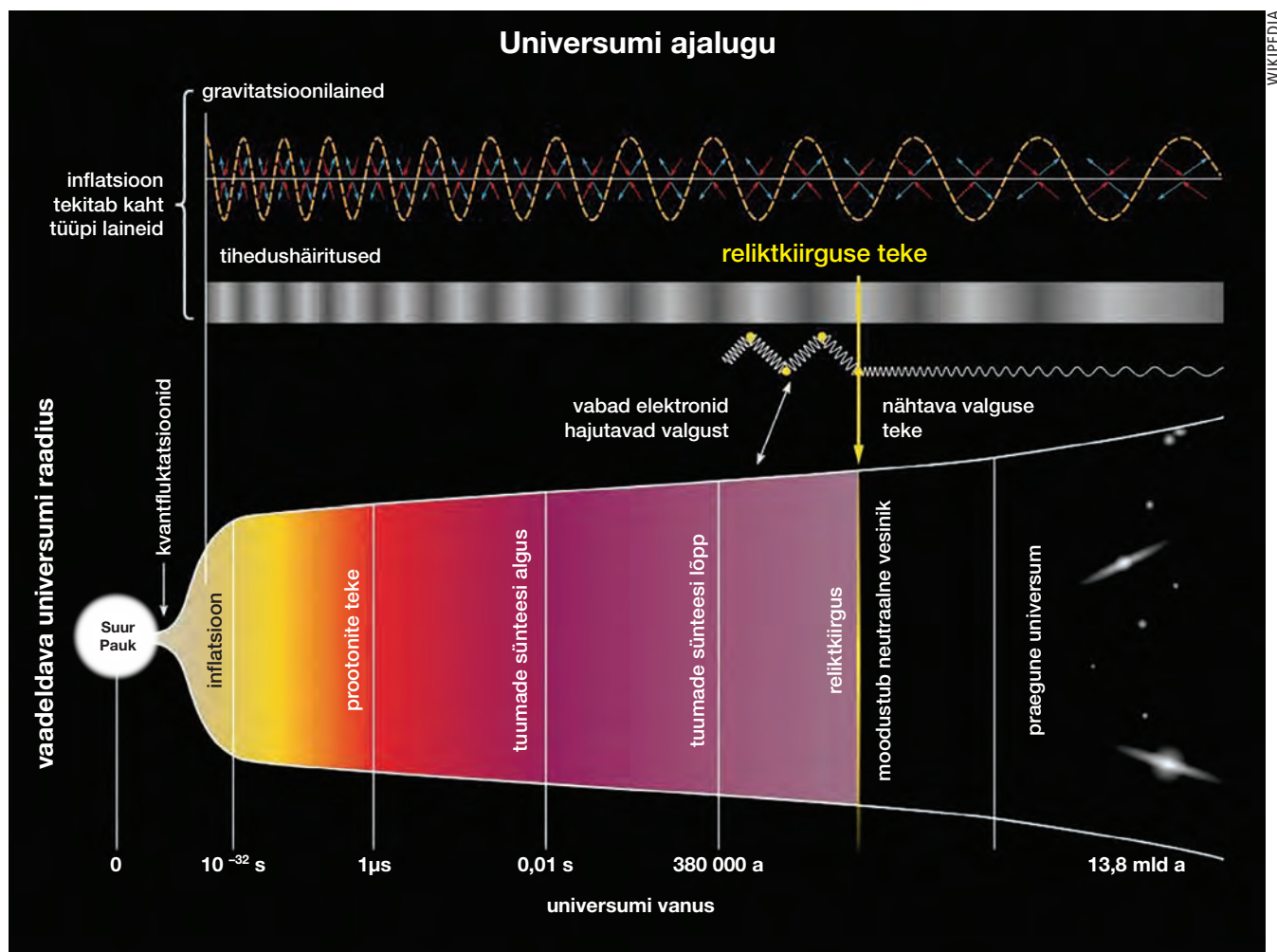
pikkusest ponnistusest pole siiani suudetud luua ühtki rahuldavat kvantgravitatsiooni teooriat.

Kuna klassikaline ja kvantmaailm omavahel hästi kokku ei sobitu ja kõik muud osakesed ja väljad on leidnud kvantkirjelduse, usutakse, et ka gravitatsioon on siiski kvantiseeritav. Enamgi veel. Kvantfüüsika määramatuse printsiibi järgi leidub minimaalne pikkus ja ajavahemik, millal kvanthäiritused muutuvad sedavõrd suureks, et võivad tekitada mikroskoopilisi musti auke. Neid skaalasid nimetatakse vastavalt Plancki pikkuseks (10^{-35} meetrit) ja Plancki ajaks (5×10^{-44} sekundit). Plancki skaalal ei saa gravitatsiooni ja kvantfüüsikat seega teineteisest lahutada.

Tänapäeval on Plancki skaala meie käeulatusest lootusetult kaugel. Saavutamaks selle uurimiseks vajalikku energiat, tuleks ehitada siiani maailma suurimast Šveitsi ja Prantsusmaa piiril asu- vast suurest hadronite põrgutist sada

Kuna klassikaline ja kvantmaailm omavahel hästi kokku ei sobitu ja kõik muud osakesed ja väljad on leidnud kvantkirjelduse, usutakse, et ka gravitatsioon on siiski kvantiseeritav.

triljonit korda võimsam kiirendi. Ainus kaudselt mõõdetav protsess, mis lähedaste energiateni küündida võiks, on kosmiline inflatsioon, mille kvantmüra on jäädvustatud reliktkiirguses. Nimelt ei pruugi kosmilise inflatsiooni kvantvõbelustesse panustada ainult inflaton, vaid ka gravitatsioon. Kuna inflatsiooni ajal oli Hubble'i horisont Plancki pikkusest vähemalt sada tuhat korda suurem, ei saanud tollased gravitatsiooni kvanthäiritused olla kuigi suured, aga võisid samas olla siiski piisavalt suured, et jätta jälj reliktkiirgusesse.



Oskame gravitatsiooni kvantühäirituste tugevust hinnata olukordades, kus gravitatsiooniväli on piisavalt nõrk. Sõna „häiritus“ viitabki just sellele, et tegemist on väikeste kõrvalekalletega üldisest ühtlasest foonist. Just häiritusteooria tõttu oskame inflatsiooniga seot osaliselt gravitatsioonivälja kvantiseerida ja kirjeldada selle mõju universumi arengule. Paraku on häiritusteoreetiline käsitlus piiratud ja seda ei saa rakendada näiteks mustadele aukudele.

Reliktkiirguse ebatasasused, mis on tingitud kvantgravitatsioonist, erinevad inflatoni tekitatust. Räägitakse vastavalt tensor- ja skalaarsetest häiritustest. Tensorhäiritused on olemuselt väga suure lainepikkusega gravitatsioonilained, skalaarhäiritused aga kõikumised aine tiheduses. Kuna esimesi pole siiani avastatud, seab see piiri Hubble'i horisondi suurusele inflatsiooni ajal: kui kosmilise inflatsiooni aegne Hubble'i horisont oleks väiksem kui 10^{-30} meet-

Tänapäeva fundamentaalfüüsika suur proovikivi on kosmilise inflatsiooni katseline kinnitamine või ümberlükkamine. See aitaks liikuda lähemale kvantgravitatsiooni teooria sõnastamisele ja kinnitaks kvantfüüsika vankumatut rolli kõigis mastaapides, mikroskoopiliste osakeste maailmast kuni universumi suuremastaabilise struktuurini.

rit, näeksime reliktkiirguses liiga tugevaid tensorhäiritusi.

Seega, kui avastatakse reliktkiirguse tensorhäiritused, astutakse suur samm nii kosmilise inflatsiooni kui ka gravitatsiooni kvantolemuse kinnitamise poole. Aina täpsemate mõõtevahendite,

näiteks Tšiili Atacama kõrbes asuvate Simonsi observatooriumi teleskoopide tõttu, võib säärane avastus olla võimalik juba lähitulevikus.

Võttes kokku: kosmilise inflatsiooni teooria järgi ei näe me reliktkiirguses ainult 380 000 aasta vanust universumit, vaid ka ülesvõtet ülinooore universumi mikroskoopilistest kvantühäiritustest. Tänapäeva fundamentaalfüüsika suur proovikivi on kosmilise inflatsiooni katseline kinnitamine või ümberlükkamine. See aitaks liikuda lähemale kvantgravitatsiooni teooria sõnastamisele ja kinnitaks kvantfüüsika vankumatut rolli kõigis mastaapides, mikroskoopiliste osakeste maailmast kuni universumi suuremastaabilise struktuurini.

Hardi Veermäe (1985) on füüsikateoreetik, keemilise ja bioloogilise füüsika instituudi kõrge energia ja arvutusfüüsika laboratooriumi vanemteadur.

www.kl24.ee
www.helmic.ee

Kokku üle 190 000 toote

KÄSITÖÖSÕBRA KAUBAMAJA 24 H SINU ARVUTIS

Otse maaletoojalt Karnaluks OÜ laos, Hermannini 1, C-trepikoda, Tallinn

PALUME LAUDA!



pikendatav laud
Pascal



pikendatav laud
Retro



laud Wilma
ja toolid Madara



virnastatav
tool Alma



vitriinkapp
Country



voodi
Gestia



kummut
Lauma



riidekapp
Niki

Meie pikaaegsete kogemustega müügikonsultandid aitavad leida lahenduse ka kõige keerukamatele eritöödele.

Tallinn
Järve keskuse 0.korrus
jarve@unolik.ee
5191 1255

Tartu
Jõe keskus
tartu@unolik.ee
5328 5747

unolik.ee



Lainetav tumeaine

GERT HÜTSI

Sada aastat tagasi kaitses Louis de Broglie (1892–1987) Sorbonne'i ülikoolis doktori-väitekirja. Selles murrangulises töös esitas de Broglie idee, et osakestel, näiteks elektronidel, võivad olla laineomadused. See ajendas materjalainete mõiste tekke.

Juba 1925. aastal pani Austria füüsik Erwin Schrödinger (1887–1961) kirja asjaomase lainevõrrandi – kvantmehaanika alusvõrrandi ehk Schrödingeri võrrandi.

Kvantmehaanika oli sündinud!

Siinse kirjutise eesmärk ei ole süüvida kvantmehaanika sisusse. Siin ei käsitleta küsimusi, nagu „Mis on materjalainete olemus?“, „Mis seal lainetab?“ või „Mil moel erineb kvantfüüsika klassikalisest füüsikast?“. Nendele vastamine eeldaks veidi mahukamat kirjatööd ja suuremal määral matemaatika kaasamist.



Hubble'i kosmoseteleskoobi pildid kuuest kokkupõrganud galaktiparvest.

Sinise värviga on pildidel näidatud tumeaine jaotus kokkupõrke järel.

Galaktikaparvede nimed vasakult paremale ja ülalt alla:

MACS J0416.1–2403, MACS J0152.5–2852, MACS J0717.5+3745, Abell 370, Abell 2744 ja ZwCl 1358+62

Aine kui laine

Järgneva arutelu keskmes on vaid üks suurus – de Broglie lainepikkus, λ_{dB} . See annab meile kriteeriumi tingimuste kohta, mille korral ilmnevad kõrvalekalded klassikalisest füüsikast ja tulevad esile kvant- ehk lainemehaanika efektid. De Broglie lainepikkuse saab esitada alljärgnevalt:

$$\lambda_{dB} \equiv \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Siin on p osakese impulss, m mass, v liikumiskiirus ja h Plancki konstant.

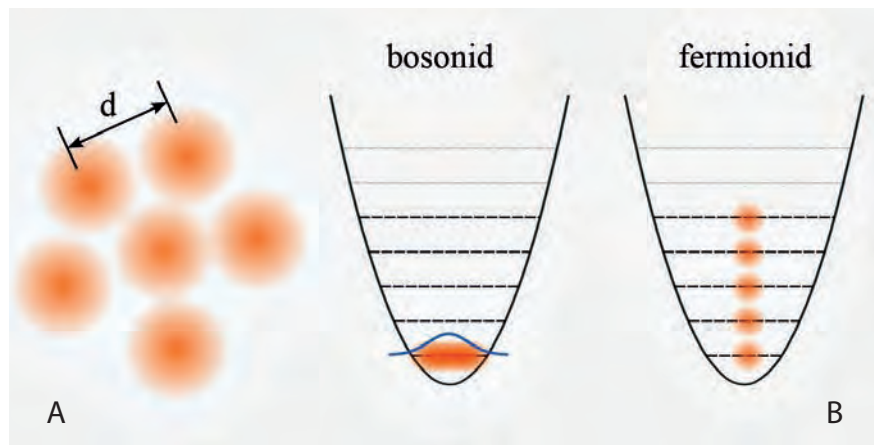
Osakeste laineomadused, näiteks interferents või difraktsioon, avalduvad ainult de Broglie lainepikkusega võrreldavatel ning sellest väiksematel skaaladel. Seejuures on Plancki konstandi väiksus peapõhjus, miks need mastaabid on niivõrd mikroskoopilised, tehes eksperimendi elluviimise väga keerukaks. Nii näiteks elektronide materilainete interferentsipildi saamiseks – 1927. aastal, mille järel, 1929. aastal, pärjati de Broglie Nobeli füüsikaauhinna – oli vaja atomaarse sammuga difraktsioonivõre (tsingi kristalli kujul) ning võrele suunatud elektrone tuli võimalikult palju aeglustada (eelpool esitatud võrrandi järgi on λ_{dB} pöördvõrdeline kiirusega).

Mida massiivsem on osake, seda väiksem on λ_{dB} ning seda raskem on materilaineid kindlaks teha. Tänapäeval on materilainete interferentsi mõõdetud ka elektronist märksa raskematel komposiitosakestel, näiteks kuuekümnest ja seitsmekümnest süsiniku-aatomist koosnevatel fullereenimolekulidel, C_{60} ja C_{70} . Nüüdseks on jõutud enam kui kahest tuhandest aatomist koosnevate molekulideni.

Igapäevaste masside korral on kvantmehaaniliste laineefektide ilmumine täielikult välistatud ning klassikaline mehaanika pakub hästi toimiva kirjelduse. Aga mis juhtub, kui vaatame massiskaala teist otsa: mis oleks, kui osakese mass oleks elektroni massist väga palju väiksem? Selline osake võiks tekitada makroskoopilisi, lausa kosmilises skaalas de Broglie laineid!

Täielikkuse huvides ei saa jätta mainimata, et makroskoopilisi materilaineid on võimalik saada ka teisel mee-

todil, mida nüüdiaegsetes füüsikalaborites rakendatakse rutiinselt: aine jahutamine (osakeste kiiruste vähendamine) ülimadalate temperatuurideni, kuni



Joonise A-osas on kujutatud, kuidas osakestest koosnev gaas jõuab nn kvantkõdunud seisundisse, kui naaberosakeste materilained hakkavad kattuma – see tähendab, et kui osakeste de Broglie lainepikkus, λ_{dB} , mis osakeste impulsi vähenedes (saavutatakse massi ja/või kiirust vähendades) suureneb, muutub ligikaudu sama pikaks kui osakevaheline keskmine kaugus, d . Sellises olekus hakkab gaas ilmutama kvantomadusi, nagu näiteks Bose'i-Einsteini kondensatsioon (bosonite korral) ning Fermi rõhk ja Pauli tõke (fermionide korral). Bosonid ja fermionid on vastavalt täis- ja poolaarvulise spinniga osakesed. Osakestefüüsika standardmudelil on näiteks kõik interaktsioone edastavad osakesed bosonid, ent aineosakesed on fermionid.

B-osas on näidatud, et täielikult kõdunud juhul asustavad bosonid madalaima energiaga olekut, moodustades Bose'i-Einsteini kondensaadi. Fermionid, vastupidi, täidavad kõik saadaolevad olekud, üks osake iga oleku kohta

nn Bose'i-Einsteini kondensaadi tekkeni. Siin jätkame aga esimese võimalusega, st väikese massi juhuga, käsitledes seda tumeaine kontekstis, kus otseste piirangute puudumisel saab massi suhteliselt vabalt valida.

Tumeaine

Vaatlustest on teada, et universumi aineist ligikaudu 85% hõlmab tumeaine, niisiis on tumeainet nähtavast aineist umbes viis korda enam. Tumeaine keskmine tihedus on ligikaudu üks gigaelektronvolt kuupmeetri kohta. Gigaelektronvolt (GeV) on osakestefüüsikas tüüpiline massiühik, mis vastab umbes ühe prootoni (või vesiniku-aatomi) massile. Elektroni mass on sellest umbes 2000 korda väiksem, umbes 500 kiloelektronvolti (keV). Tumeaine tihedus Linnutees meie Päikesesüsteemi asukohas on umbes 0,3 GeV/cm³ ehk ligikaudu 10⁵ keskmist tumeaine tihedust.

Ühtlasi on teada, et tumeaine peab olema külm või külmast mitte palju erinev, st tumeosakeste liikumise kiirused peavad olema piisavalt väikesed, nii et kosmilist ruumistruktuuri ülemäära laiali ei määrita ja et väikseimate galaktikate teke oleks veel võimalik.

Et tumeaine oleks piisavalt 'tume', peavad interaktsioonid nähtava sektoriga olema tuvastamatult nõrgad. Ehkki tumeaine eneseinteraktsioonid ei ole vaatlustest tugevalt piiratud, käsitletakse

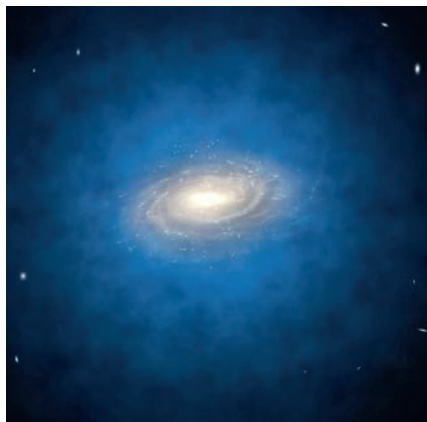
On teada, et tumeaine peab olema külm või külmast mitte palju erinev, st tumeosakeste liikumise kiirused peavad olema piisavalt väikesed, nii et kosmilist ruumistruktuuri ülemäära laiali ei määrita ja et väikseimate galaktikate teke oleks veel võimalik.

Kui algul käsitleti aine laineefekte mikroskoopilistes mastaapides, siis nüüd pakuvad need kosmilistel skaaladel värsket vaatenurka tumeaine mõistmiseks ja võimalikke lahendusi külma tumeaine probleemidele.

standardset külma tumeainet enamasti siiski pörkevabana. Populaarseima tumeainekandidaadi WIMP-i (*Weakly Interacting Massive Particle*, nõrgalt interakteeruv massiivne osake) korral jäävad osakeste massid vahemikku $1\text{--}10^5$ GeV. Selliste masside korral jäävad osakeste de Broglie lainepikkused väga palju suurusjärke osakeste keskmisest vahekaugusest väiksemaks. Sel juhul ei pea laineefekte arvestama ning tumeaine käitub kui külm ja graviteeriv, ent pörkevaba klassikaline gaas.

Klassikaline külm tumeaine, mis enamasti on tuntud tähekombinatsioonina CDM (*Cold Dark Matter*), on juba aastakümneid olnud kosmoloogilise maailmapildi oluline osa, ilma milleta oleks universumi ruumistruktuuri teket väga raske seletada. Hoolimata selle edust on viimasel ajal hakanud siiski ilmnenema võimalikke probleeme. Kui suurtel kosmilistel skaaladel on külm tumeaine vaatlustega ideaalses kooskõlas, siis subgalaktilistel mastaapidel võib täheldada mõningaid kõrvalekaldeid. Näiteks ennustab CDM suurel hulgal väikeseid tumeaineklompe, ent vaatlusandmete analüüs ei näi seda kinnitavat. Probleeme valmistavad ka galaktikaid ümbritsevate tumeainehalode liiga järsud tihedusprofiilid halode keskosas, eriti väikeste galaktikate korral.

On täiesti võimalik, et need probleemid tulenevad pelgalt nähtava sektori ebatäpsest käsitlest, kuna astrofüüsikalisi protsesse, nagu täheteket ja supernoovaplahvatusi, on keerukas modelleerida. Samas on täiesti realistlik ka võimalus, et CDM-paradigmat tuleb veidi kohendada. Seetõttu on hakatud



Pildil on sinise halona kujutatud tumeaine arvatavat jaotust ümber meie kodugalaktika Linnutee

uurima mudeleid, kus külm tumeaine asendatakse sooja tumeainega (st lubatakse CDM-ist veidi suuremaid osakeste kiirusi) või loobutakse täielikult pörkevabast tumeainest, võimaldades sellel teatud eneseinteraktsiooni.

Viimasel ajal on suurt populaarsust kogunud mudel, mille eeldatav tumeaine osakeste mass on väga väike, rõhudes taotluslikult osakeste laineomadustele ja loobudes seeläbi tumeaine käsitlemisest klassikalise gaasina. Selline tumeaine on tuntud kui FDM (*Fuzzy Dark Matter*, hägune tumeaine).

Tumeaine kui laine

Enne FDM-ga jätkamist on siiski asjakohane mainida, et eksisteerib teisigi kergeid tumeainekandidaate. Enim põhjendatud ja seetõttu ka enim tähelepanu pälvinud on neist aksion. See on osake, mis on sisse toodud, lahendamaks kvantkromodünaamika (QCD) nn CP-probleemi: ehkki QCD sisaldab CP-sümmeetriat rikkuvaid liikmeid, näib QCD vaatlustes siiski CP-sümmeetriline. Tüüpiline QCD-aksioni mass jääb vahemikku 10^{-6} kuni 10^{-3} eV.

Kas QCD-aksionist võiks piisata, et otsida lahendust eespool mainitud CDM-i probleemidele? Et sellele vastata, ei ole pääsu mõnest lihtsast kvantitatiivsest hinnangust, mistõttu esitame artikli alguses toodud võrrandi sellisel kujul, nagu on näha siin allpool:

Siit on näha, et kui võtta osakeste kiiruseks tüüpiline kiirus Päikesesüsteemi asukohas Linnuteel, 200 km/s , ning QCD-aksioni massiks 10^{-6} eV, siis on de Broglie lainepikkus λ_{dB} ligikaudu 2 km . Kuigi see on igapäevases mõttes makroskoopiline suurus, jääb sellest CDM-i probleemide lahendamiseks kaugelt liiga väheks: kosmoloogilises plaanis käitub sellise massiga aksion täpselt nagu CDM.

CDM-i probleemide lahendamiseks peaks de Broglie lainepikkus ulatuma umbes $0,1$ kiloparsekini (kpc; 1 kpc on $3261,6$ valgusaastat) ehk umbes 300 valgusaastani. Selleks et saada mastaapidest parem ettekujutus, olgu öeldud, et Päikesesüsteemi kaugus Linnutee keskmeest on ligikaudu 8 kpc .

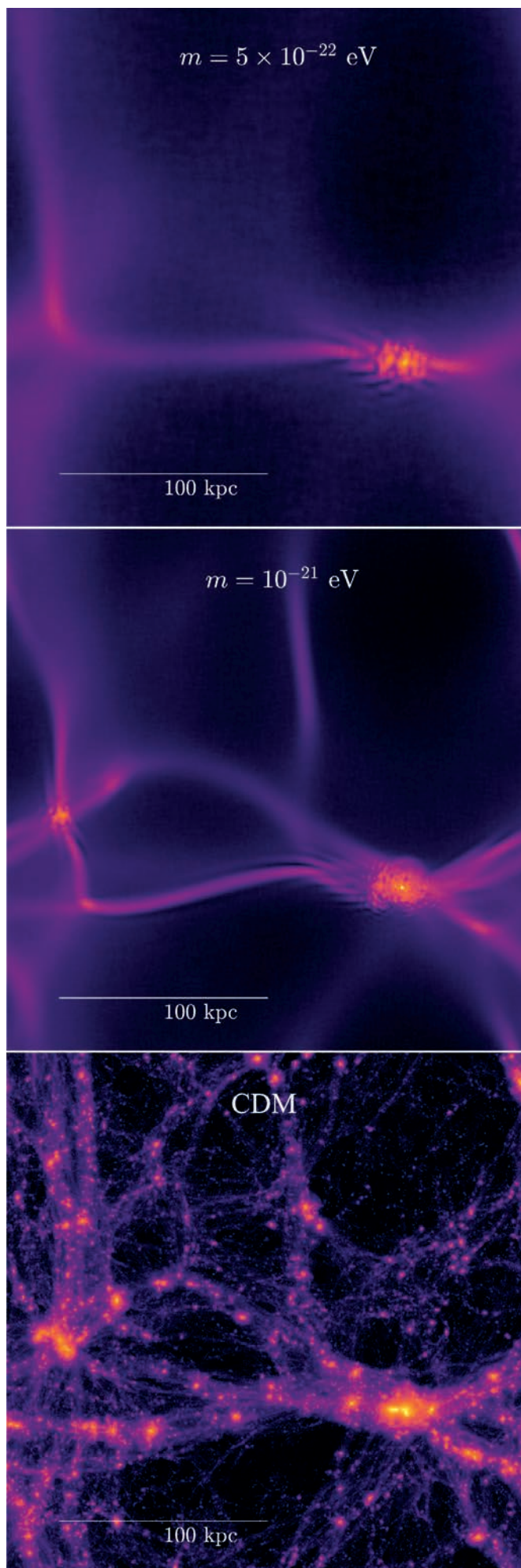
Nagu viimatisest seosest ilmneb, peab sellise de Broglie lainepikkuse saavutamiseks olema osakeste mass umbes 10^{-22} kuni 10^{-21} eV. Ehkki nii väikesed massid võivad esmapilgul tunduda eba-realistlikud, pakub näiteks stringiteooria arvukalt selliseid kergeid osakesi.

Artikli juures olev illustratsioon tumeaine tihedusväljadest näitab, kuidas seesuguse massiga FDM-i loodud kosmiline ruumstruktuur erineb standardsest CDM-i juhust. FDM-i korral on filamentides, halodes ja nende vahe- tus ümbruses selgelt näha laineinterferentsist tulenevad tihedusmodulatsioonid. Samuti on näha, et FDM-i korral on struktuur tunduvalt enam laiali määratud ning väikesed halod puuduvad täielikult. Jooniselt selgub ka see, et moodustunud tumeainehalode tihedusprofiilid pole tsentrites nii järsud kui CDM-i korral: halode keskosas on hägune tumeaine täielikus kondensaadi- olekus, moodustades nn solitontuuma.

Kui arvutada sellise massiga FDM-osakeste arv de Broglie lainepikkusele vastavas ruumalas Päikesesüsteemi asukohas, saame tõeliselt hiiglasliku tulemuse: ligikaudu $10^{90}\text{--}10^{94}$. Niivõrd tihe asustus saab olla võimalik ainult siis, kui FDM-osake on täisarvulise spinniga ehk boson (vt infokasti).

Sellise massi korral oleks üsna utoopiline detekteerida üksikut FDM-osakest. Kuna asustustihedus on niivõrd

$$\lambda_{dB} \simeq 2\text{ km} \left(\frac{10^{-6}\text{ eV}}{m} \right) \left(\frac{200\text{ km/s}}{v} \right) \simeq 0,6\text{ kpc} \left(\frac{10^{-22}\text{ eV}}{m} \right) \left(\frac{200\text{ km/s}}{v} \right)$$



Hägune tumeaine (FDM) *versus* külm tumeaine (CDM). Kolmel pildil on näidatud tumeaine tihedusväljad punanihkel $z = 3$, st hetkel, kui universumi mastaabid olid praegusest $z + 1 = 4$ korda väiksemad. Selleks et saada paremini aru piltidel kujutatud universumi struktuuri ulatusest, on igal pildil toodud sajale (paisumisega kaasa liikuva) kiloparsekile vastav skaala. Kahel ülemisel pildil kujutatud FDM-il on osakese massid vastavalt $5 \times 10^{-22} \text{ eV}$ ja 10^{-21} eV . Alumisel pildil on kujutatud CDM-i tihedusvälja (PILTIDE ALLIKAS: ARXIV:1801.03507)

suur, käitub hägune tumeaine praktiliselt kui pidev, erilisele lainevõrrandile alluv klassikaline väli. Hea võrdlusena võib tuua raadiolained, mis enamasti koosnevad väga suurest hulgast raadiofotonitest. Lainet detekteeritakse kui koherentset tervikut, kuid palju keerukam on määrata kindlaks üksikuid foononeid. Teise analoogina võib esitada gravitatsioonilained, mis käituvad samuti kui puhtklassikalised lained. Siiski on hiljuti pakutud mitu julget, esmapilgul hullumeelsena näivat ideed, kuidas võiks põhimõtteliselt tuvastada ka üksikuid gravitone – gravitatsioonilaine koostisosi.

Kokkuvõttes võib öelda, et de Broglie lainehüpotees, mis sillutas teed kvantmehaanikale, on nüüdseks arenenud uueks uurimisviisiks ka tumeaine korral. Kui algul käsitleti aine laineefekte mikroskoopilistes mastaapides, siis nüüd pakuvad need kosmilistel skaaladel värsket vaatenurka tumeaine mõistmiseks ja võimalikke lahendusi külma tumeaine probleemidele. Kui edukaks see osutub, näitab ainult aeg. •

Gert Hütsi (1975) on astrofüüsik. Doktoritöö kaitsnud Müncheni Ludwig Maximiliani ülikoolis, järel doktorandina täiendanud end Londoni ülikooli kolledžis. Ülikooli lõpetamise järel töötanud Tartu observatooriumi teaduri ja vanemteadurina. 2016. aastal asus tööle keemilise ja bioloogilise füüsika instituuti, kus on praegu vanemteadur.

Kvantaegruum

LAUR JÄRV

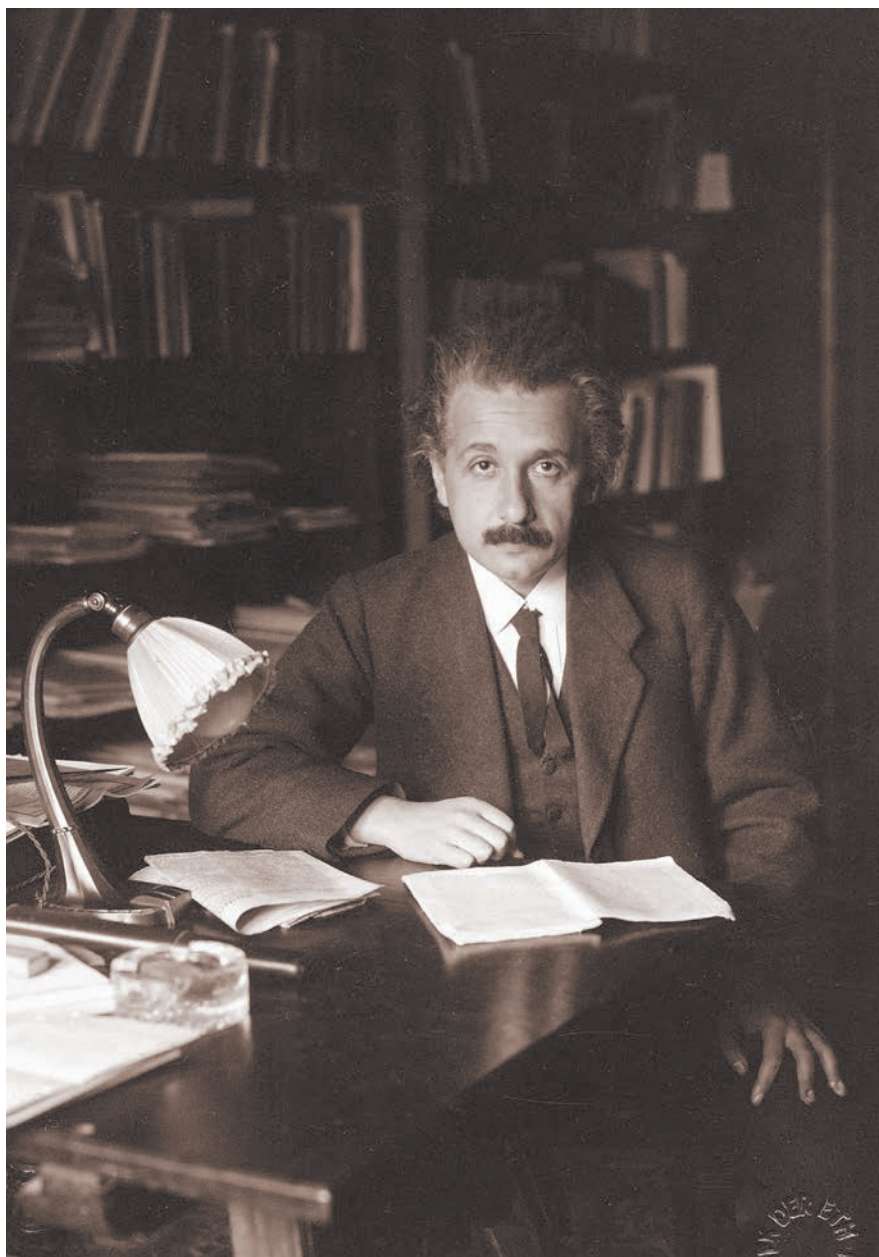
Albert Einstein esitas gravitatsiooni kirjeldava üldrelatiivsusteooria 1915. aasta novembris. Järgmisel suvel, esimeses artiklis gravitatsioonilainete kohta, on ta muu hulgas lausunud: „Paistab, et kvantteooria ei peaks muutma mitte ainult Maxwelli elektrodünaamikat, vaid ka uut gravitatsiooniteooriat.“

Tol ajal polnud tõsist kvantteooriat tegelikult veel olemas, oli pakutud vaid mõni omavahel nõrgalt seotud hüpotees mõningate katsete seletamiseks, sealhulgas Einsteini 1905. aasta selgitus fotoelektrilise efekti kohta. Selle järgi saab ainele langeva valguslaine mõju kirjeldada laine sageduse poolt määratud energia tompudena, mitte pideva energiavoona. Just seda 1905. aasta seletust, mitte üldrelatiivsusteooria loomist, tõstis Nobeli komitee esile, kui 1921. a Einsteinile auhinna andis.

Nüüdseks on nii kvantteooria kui ka üldrelatiivsusteooria matemaatiliselt sügavuti välja arendatud, paljude katsete ja vaatlustega kontrollitud. Need kaks teooriat on 20. sajandi füüsika alussambad. Samas nende kahe ühendamise, kvantgravitatsioon, on endiselt jäänud lahendamatuks probleemiks. Õigupoolest pole meil gravitatsiooni kvantolemuse kohta ühegi füüsikalise eksperimendi andmeid ning parim, millest saame lähtuda, on mõtteeksperimentid olukordade kohta, kus gravitatsioon ja kvantmaailm peavad omavahel kokku puutuma.

Geometriseerimine vs kvantiseerimine

Newtoni käsitluses liiguvad kõik kehad, millele jõude ei mõju, ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Einstein oma geniaalsuses mõtestas selle lihtsa printsiibi ümber: üldrelatiivsusteooria järgi liiguvad ka gravitatsiooni mõju all olevad kehad sirgjooneliselt, aga teevad seda kõveras aegruumis. Aja ja ruumi kokkupanek aegruumiks teeb kirjelduse muidugi keerulisemaks, aga piltlikult võib kujutada, kuidas joonlauaga paberile tõmmatud kriips muutub kõveraks, kui paber tuutuks keerata. Ühesõnaga Ein-



WIKIPEDIA

Albert Einsteini üldrelatiivsusteooria järgi liiguvad gravitatsiooni mõju all olevad kehad sirgjooneliselt, kuid teevad seda kõveras aegruumis

Einsteini järgi pole gravitatsioon ruumis leviv jõud, vaid hoopis aegruumi kõver geomeetria; aegruum ja gravitatsioon on lahutamatud.

steini järgi pole gravitatsioon enam ruumis leviv jõud, vaid hoopis aegruumi kõver geomeetria; aegruum ja gravitatsioon on lahutamatud.

Möödunud sajandi keskpaigaks polnud päris selge, kas alusfüüsika põhiprintsibiina peaks lähtuma kvantteooriast või geomeetriast. Ajapikku õnnestus matemaatikutel panna gravitatsiooni kõrval ka teised jõud geomeetria keelde, st esitada need kõverusena abstraktses nn kihtruumis, mida võime ette kujutada kihtidena aegruumi peal. Samas gravitatsiooni surumine kvantteooria formalismi raamidesse komistas põhimõteteliste probleemidele.

Üldrelatiivsusteoorias on aeg ja ruum ühe tervikliku nähtuse aspektid, mis võivad teineteiseks üle minna. Näiteks musta augu horisondil vahetavad aeg ja ruumiline radiaalsuund oma rollid, musta auku sisenedes liigutakse radiaalselt ainult edasi keskme poole, nagu ajas ei saa pöörata tagasi. Kuid kvantteooria käsitleb aega ruumist erinevalt. Kvantmehaanikas saame küsida, milline on osakese asukoht, energia või impulss mingil ajahetkel, aga ei saa küsida, milline on tema ajahetk.

Gravitatsiooni kvantiseerimise vajaduse üle vaidlesid toonased teoreetilise füüsika suurkujud tuliselt 1957. aasta Chapel Hilli konverentsil. Lõpuks jäi veenvamalt kõlama Richard Feynmani argument: kui gravitatsioon poleks kvantiseeritav, siis rikuks see osakeselaine duaalsuse ja kaksikpilu katse tõlgenduse. Kvantmehaanika ütleb, et osake, näiteks elektron, liugleb korraga läbi kahe paralleelse pilu, tekitades nende taha interferentsipildi, justkui oleks tegu lainega. Kui aga saaksime täpsete gravitatsiooniliste mõõtmistega kindlaks teha, läbi kumma pilu osake läks, siis interferentsipilt ei tekiks. Kvantmehaanika osakesed alluvad

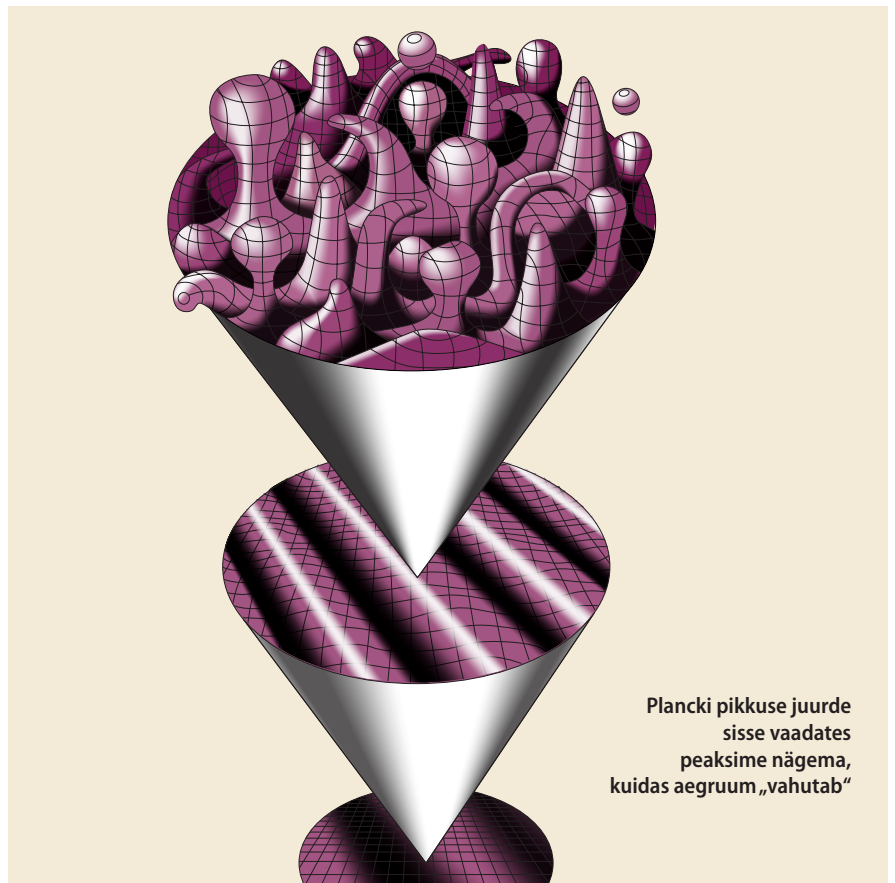
määramatuse printsiibile, mille kohaselt ei ole osakese asukoht ja impulss korraga täpselt määratud. Üldrelatiivsusteoorias on aga osakesel kindel asukoht ja impulss ning need panevad aegruumi kõveruse üheselt paika. Seega, kui kõverus oleks ülitäpselt teada, siis oleks võimalik tuletada osakese kindel asukoht ja impulss, mis on vastuolus kvantmehaanika määramatuse ja superpositsiooni printsiibiga.

Katsed kvantiseerida aegruumi

Võib püüda käsitleda üldrelatiivsusteooriat tavalise väljateooriana, nimetada aegruumi põhikarakteristik meetriline tensor gravitoni väljaks ning püüda rajada kvantteooria, järgides samasuguseid meetodeid, mis on edukalt toimunud teiste väljade puhul. Kahjuks jookseb see standardprotseduur ummikusse. 1974. aastal tõestasid Gerardus 't Hooft ja Martinus Veltman, et üldrelatiivsusteooria kvantversioon jääb paratamatult sisaldama lõpmatusi, mida ei õnnestu kavalate ümberdefineerimistega (renormeerimisega) ära peita. Konks tundub olevat selles, et gravitatsioon on lahutamatu aegruumist, mida kvantiseerimine vajab taustana. Seepärast läk-

sid hilisemad käsitletused teist teed pidi. Silmus-kvantgravitatsioon üritab aegruumi kirjeldada silmuste võrgustikuna, kus klassikaline taust pole ette antud, vaid peaks ilmuma dünaamiliselt. Stringiteooria vaatleb fikseeritud aegruumi taustal võnkuvaid ühemõõtmelisi objekte – stringe – ja märkab, et nende eri võnkeolekud vastavad eri osakestele, millest üks on graviton.

Kvantväljateooria ennustab ja kinnitab katsetega, et vaakum pole mikrotasandil lihtsalt tühi ruum, vaid selles tekivad spontaanselt ja kaovad kiirelt ka osakeste-antiosakeste paarid. Mida väiksemaid aja ja ruumi vahemaid vaadata, seda tihedamalt niisuguseid virtuaalseid osakesi leidub. Kui eeldame, et kvantgravitatsioon käitub samamoodi, siis peaksid aegruumis mikrotasandil ilmneva märkimisväärsed kõveruse fluktuatsioonid, mida John Archibald Wheeler hakkas nimetama „vahuks“ (1955). Kui õnnestuks piisavalt lähedalt uurida, siis näeksime tillukeste mustade aukude, pisiuniversumite ja muude ruumimulkude mulinat, mis suuremates mastaapides vastastikku taanduvad, jättes keskmisena klassikalise aegruumi.



Plancki pikkuse juurde sisse vaadates peaksime nägema, kuidas aegruum „vahutab“

Üldrelatiivsusteoorias on aeg ja ruum ühe tervikliku nähtuse aspektid, mis võivad teineteiseks üle minna.

Paraku võiks aegruumi kvantiseloom ilmuda alles Plancki pikkuse korral (10^{-35} m), mis on kaugel väljastpool praegust eksperimentaalset suutlikkust (10^{-19} m). Kui anname osakesele nii suure energia, et tema kvantolemu- sele vastav lainepikkus ligineb Plancki pikkusele, siis peab osake kollapseeruma mustaks auguks. Rohkem energiat või massi väikse ruumala sisse toppida ei tohi, sekkuma peavad mingid uued füüsikaseadused ehk kvantgravitatsioon.

Teisalt mõtiskles Wheeler, et kui kvantteooria on üldkehtiv, siis peaksime saama seda rakendada ka universumile kui tervikule. Kvantmehaanika tavaline lainefunktsioon kirjeldab süsteemi arengut ajas, aga Universumi lainefunktsioon Wheeleri-DeWitti võrrandis (1967) hõlmab kõiki võimalikke geometrilisi seisundeid üle kogu aja. Ehkki James Hartle ja Stephen Hawking leidsid võrrandile Suurt Pauku kirjeldava lahendi (1983), on see taas nii abstraktsel tasemel, et katselise kontrolli võimalus tundub kaheldav.

Mustad augud ja kvantinfo

Ruumi süvastruktuuri ja universumi kui tervikuga võrreldes tunduvad mustad augud üsna käegakatsutavad objektid. Matemaatiliselt on nende kirjeldus üldrelatiivsusteoorias väga lihtne, sest neid iseloomustab ainult mass, pöördimpulss ja summaarne laeng. Auku moodustanud osakeste komplekt võib olla väga erinev, aga väljastpoolt vaadates loevad vaid need kolm suurust. Kvantmehaanika teoreemid ei luba osakeste detailisel infol kaduma minna, see jääb lihtsalt musta augu sisse. Ent piltlikult näikse kvantmehaanika sellega isendale auku kaevavat.

Jacob Bekenstein märkas (1972), et mustade aukude dünaamikat kirjeldavad võrrandid võib esitada termodynaamika seadustega analoogilisel kujul, kui musta augu temperatuur lugeda pöördvõrdeliseks tema massiga ja entroopia võrdeliseks horisondi pindalaga. Seda kontrollides tõestas Stephen Hawking (1974), et mustad augud kiirgavad oma temperatuurile vastavat soojuskiirgust. Astrofüüsikaliste mustade aukude korral on Hawkingi ennustatud kiirgus nii nõrk, et seda pole mingit lootust musta auku langeva aine kiirgussähvatuste kõrval märgata. Siiski, kui oodata triljoneid-multitriljoneid aastaid, kuni tähed on ammu kus-



ALAMY / VIDA PRESS

Stephen Hawking, kelle uurimused mustade aukude olemuse, relatiivsusteooria, gravitatsiooni ja kosmoloogia vallas on märkimisväärsed ja mõjutanud paljusid teadlasi

Stephen Hawking tõestas, et mustad augud kiirgavad oma temperatuurile vastavat soojuskiirgust. Astrofüüsikaliste mustade aukude korral on Hawkingi ennustatud kiirgus nii nõrk, et seda pole mingit lootust musta auku langeva aine kiirgussähvatuste kõrval märgata.

tunud ja kosmos muutunud tühjaks ja kõledaks, muutub mustade aukude kiirgus põhiliseks protsessiks.

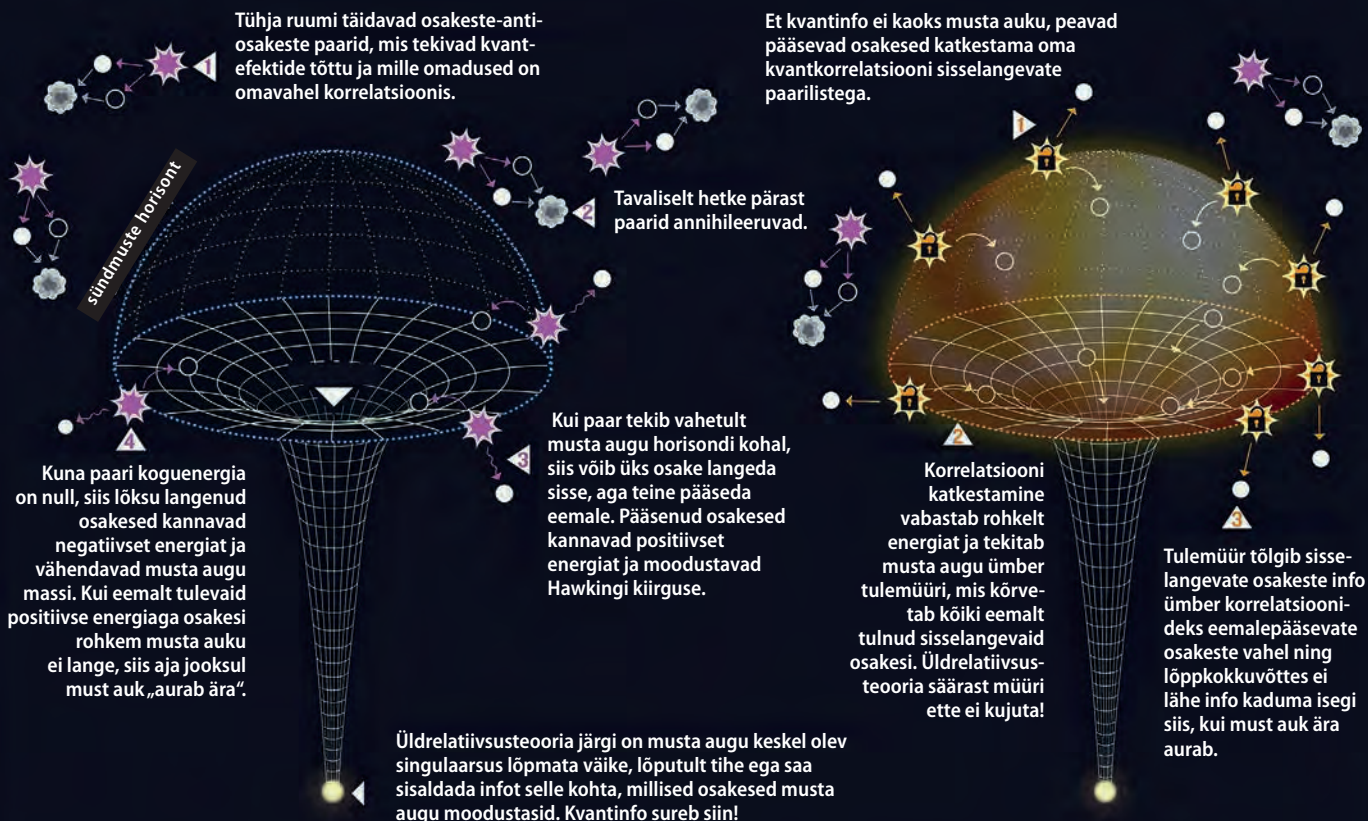
Hawking kasutas oma arvutuseks kvantväljateooriat musta augu aegruumis. Musta augu kiirgus lähtub horisondi lähedalt väljastpoolt, ta kannab mustast august energiat ära ning musta augu mass tasapisi väheneb kuni nullini ja must auk haihtub. Kiirguse spekter oleneb vaid musta augu massist ega tohiks sisaldada detailset infot sinna

KAOTSIMINEK

Kui must auk ära aurab, siis kaob sisselangenud osakeste info koos sellega. Üldrelatiivsusteooria trumpab kvantteooria üle.

TULEMÜÜR

Sisselangenud osakeste info kodeeritakse korrelatsioonidesse augu äärelt kiirguvate osakeste vahel. Kvantteooria mängib üldrelatiivsusteooria üle.



langenud osakeste kohta. Nii tekib paradoks, et koos musta augu kadumise kaob ka seda moodustanud osakeste info, mis on vastuolus kvantmehaanika teoreemidega. Püüdes tabata, kas peamine on relatiivsusteooria ja kvantinfo tõesti kaob, või on määrav kvantteooria ja info siiski pääseb, pakuvad üksteisega väitlevad teoreetikud eri stsenaariume: kvantinfo pääseb kuidagi põimituse tõttu; info kiiratakse välja enne musta auku langemist; mustast august jääb alles infot talletav jäänuk; mustal augul on varjatult rohkem eri seisundeid, kui nende kolme suurusega määratud ja info on kaudselt olemas ka august väljaspool.

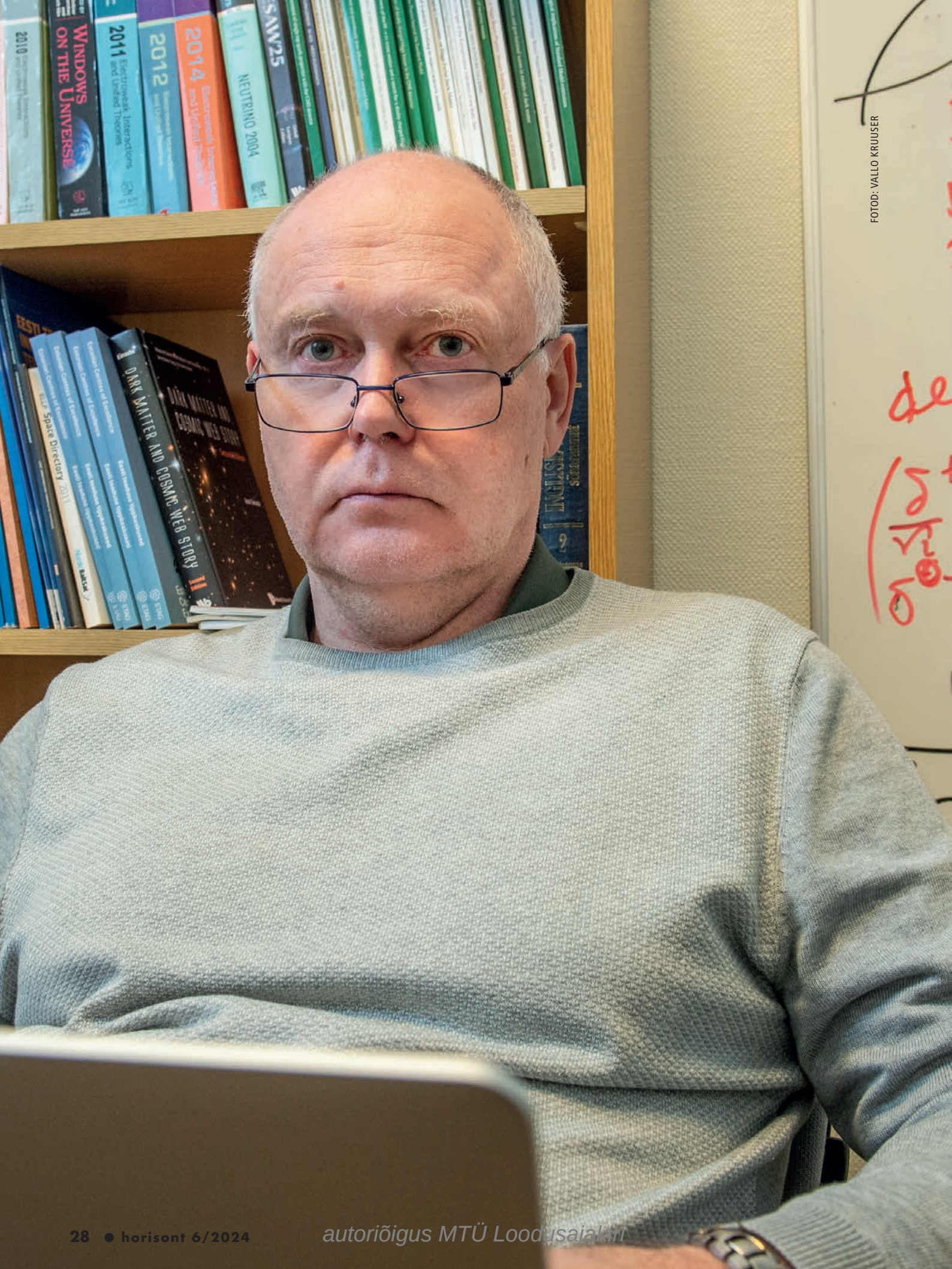
Praegu kohtab füüsikute seas haruharva neid, kes kahtlevad gravitatsiooni kvantiseerimise vajaduses.

Veel pentsikum on aga musta augu entroopia sõltuvus pindalast. Statistilise füüsika kohaselt on entroopia seotud mikroolekute arvuga, st mida suurem entroopia, seda enam on võimalik süsteemis teha mikrotasandil ümberpaigutusi, ilma et makroskoopilised omadused muutuksid. See viib mõttele, et kui fotoelektrilises efektis sagedusega seotud energiatombud andsid aimu valguse kvantstruktuurist, siis ruumi kvantstruktuuri tompute arv ei ole seotud mitte ruumalaga, vaid ruumi ümbritseva pinna pindalaga. Gerardus 't Hooft (1993) ja Leonard Susskind (1995) laiendasid selle omaduse holograafilise hüpoteesini, mis peaks kehtima kvantgravitatsiooni kohta üldiselt. Raske öelda, kas see tõesti tähendab, et meie ettekujutus kolmemõõtmelisest ruumist on petlik projektsioon ning tegelik füüsika toimub mingil kahemõõtmelisel pinnal. Igatahes huvitav, et nii stringiteooria kui ka silmusgravitatsioon

pakuvad näiteid, kus musta augu kvantolekute koguarv on tõesti vastavuses pindalaga.

Praegu kohtab füüsikute seas haruharva neid, kes kahtlevad gravitatsiooni kvantiseerimise vajaduses. 2022. aasta novembris sõlmisid kvantinformatiiooni ekspert Jonathan Oppenheim ja üks silmus-kvantgravitatsiooni teooria rajaja Carlo Rovelli ning noor stringiteoreetik Geoff Penington kihlveo, kus panused olid vahekorras 1 : 5000. Oppenheimeri meelest oli väike šanss, et klassikalist gravitatsiooni ja aegruumi on võimalik muude kvantnähtustega kooskõlla viia (tal on selle kohta oma hübriditeooria), kuid Rovelli ja Penington olid ülikindlad vastupidises. Sellegipoolest jäävad teoreetikud omavahel vaidlema, kas tee kvantgravitatsioonini viib läbi silmuste või stringide. •

Laur Järv (1974) on füüsik, Tartu ülikooli teoreetilise füüsika labori juhataja.



FOTOD: VALLO KRUUSER

Füüsikas on avastus alati ootamatu

Kuidas sünnivad loodusteaduste vallas uued ideed ja teadmised? Milliseid võimalusi avab Eestile liikmestaatus Euroopa tuumauuringute organisatsioonis (CERN) ja mida see hiiglaslik teaduskeskus saab meilt vastu? Kas teadlastel õnnestub peagi universumi salapärase tumeaine olemus lahti muukida? Miks ei taha meie noored enam füüsikat õppida ja sel alal töötada? Keemilise ja bioloogilise füüsika instituudi kõrge energia ja arvutusfüüsika laboratooriumi juhi Martti Raidaliga on vestelnud Horisondi peatoimetaja Ulvar Käärt.

Käisid äsja Euroopa tuumauuringute keskuses CERN-is. Mida sa seal tegid?

Sel reisil osalesin CERN-i ühe põhieksperimenti CMS-iga (*Compact Muon Solenoid* ehk kompaktne müüonisolenoid, s.o suure hadronite põrguti üldotstarbeline osakestetektor, et määrata kindlaks prootonite põrgetel tekkivaid seni tundmatuid osakesi jms – U. K.) seotud koosolekul. Meie teadlased võtavad sellest eksperimentist osa.

CERN tähistas hiljuti 70. aastapäeva. Eesti on selle organisatsiooni värske täisliige. Mida CERN saab meilt ja meie omakorda CERN-ilt?

Esimese koostöölepingu sõlmis Eesti CERN-iga aastal 1996 ning sellest alates on saanud meie teadlased selle töös osaleda. Oleme panustanud selle tegemistesse juba peaaegu 30 aastat. Kõik CERN-i eksperimentid on suured rahvusvahelised ettevõtmised. See pole sedalaadi üritus, et käime ja ostame seal oma uuringute jaoks osakeste kiirendi kasutamise aega. Piltlikult öeldes on see võrreldav supiköögi, kus liikmesriigid üheskoos süüa valmistavad. Lepitakse kokku, et näiteks mina toon kartulid, sina porgandid ja sakslased kui kõige rikkamad toova liha, ning siis hakatakse suppi keetma. Meie oleme panustanud oma teadmisi ja energiat ning aidanud oma liikmemaksuga seda supikööki ülal hoida. See supiköök on tegutsenud niivõrd edukalt, et selle tööd on tunnustanud Nobeli preemiaga.

Mida me vastu saame? Niisuguse koostöö eest saame uusi teadmisi. Koostööd tuleb ju teha endast targemate, mitte rumalamatega. Sel moel osaleme kogu maailma mõistes tipptasemel teadustöös. Lisaks peab Eesti riik seaduse järgi hoolitsema CERN-i täisliikmena selle eest, et antud teadusvaldkond oleks meil jätkuvalt.

Mil moel peaks jätkusuutlikkust tagama?

See tähendab kõike. Esmalt peab ülikoolides olema vastav õpe, et meil oleks selles vallas inimesi. Eesti kontekstis, kus teaduse rahastus on täielikult projektipõhine, peaks haridus- ja teadusministeerium vähemalt CERN-i tegevustega seotud valdkonna rahastamispoliitika üle vaatama. Samal moel pole enam võimalik jätkata, sest projektipõhise rahastamisega ei saa me panustada uute teadusaparatuuride ehitusse ja ülalpidamisse ega suuda maksta ka CERN-i liikmemaksu.

Liikmemaks aitab ülal hoida ja ehitada kiirendeid. Selle eest saame saata CERN-i enda üliõpilasi, meie inimesed saavad kandideerida ka CERN-i töökohtadele. Näiteks praegu on CERN-is kaks Eesti tehnikaüliõpilast ja sealses IT-osakonnaski on tööl meie inimesi. Samamoodi avab liikmemaks meie ettevõtetele ligipääsu kõikvõimalikele CERN-i hangetele, millega ostetakse näiteks teadusaparatuuride või kasvõi uut mööblit. CERN on ju oma 7000–8000 inimesega nagu terve linn või suur tehas, kus on kogu aeg midagi vaja. Niisuguste hangete kaudu tuleb sinna panustatud raha meile tagasi.

Aga uusi teadmisi, mida meie teadlased CERN-ist koju toovad, ei saa rahas mõõta.

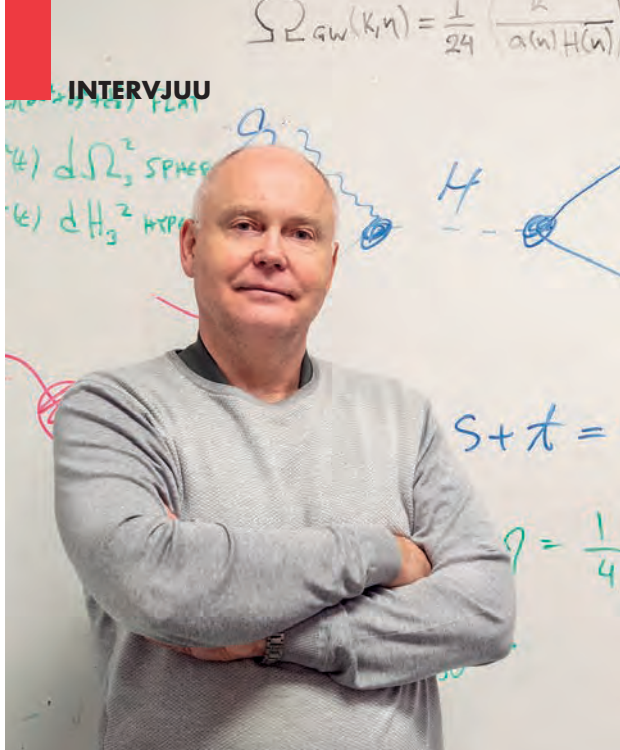
CERN-ist on näiteks alguse saanud üleilmne veeb WWW. Kujutad sa ette, mis oleks siis, kui selle lahendusega oleks välja tulnud Google ning kui palju tuleks meil praegu iga guugeldamise eest sellele firmale maksta? Seepärast ütlengi, et teadmised on hindamatud.

Millega täpsemalt keemilise ja bioloogilise instituudi (KBFI) inimesed CERN-is tegelevad?

Nagu ikka on meie tegevused seotud nii teoreetilise teadustöö kui ka katsetega. Teeme koostööd CERN-i teooriaosakonnaga. Samuti osaleme rahvusvahelises teadusarvutuse koostööprojekti GRID, mis on lahutamatu osa CMS-eksperimentist. Katsel pole ju mõtet, kui sellest ei saa andmeid. Andmeid tekib tohutult koguses ning nende hoidmiseks ja analüüsimiseks ongi loodud omaette organisatsioon. Selle tööga on seotud KBFI Mustamäel asuv teadusarvutuskuskeskus.

Peale suure hardonite põrgutiga seotud suurte eksperimentide tehakse CERN-is ka väiksemaid katseid. Ühe väiksema ettevõtmisena kavandatakse seal gravitatsioonilainete eksperimenti. Niisuguseks katseks on vaja sügavat ja vertikaalset maa-alust tunnelit. Katseseadmetena on vaja ka kaht omavahel sünkroniseeritud aatomikella. Nende abil ongi võimalik tuvastada tunnelisse jõudnud gravitatsioonilaineid. Meie oleme ühinenud seda eksperimenti ette valmistava koostööprojektiga.

Koostööd tuleb ju teha endast targemate, mitte rumalamatega. Sel moel osaleme kogu maailma mõistes tipptasemel teadustöös.



MARTTI RAIDAL

- Sündinud 26. veebruaril 1968. aastal Paides.
- Kooliteed alustas 1975. aastal Türi keskkoolis, aastail 1983–1986 Nõo keskkooli (praegune Nõo reaalgümnaasium) õpilane.
- 1986–1992 füüsikaõpingud Tartu ülikoolis.
- 1995. aastal kaitses Helsingi ülikoolis doktoritöö teoreetilise füüsika kohta.
- 1996–1997 järel doktor Valencia ülikoolis, 1998–1999 Humboldti stipendiaat Hamburgis Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY-s, 2000–2001 järel doktor California ülikoolis ja 2001–2003 Marie Curie stipendiaat Genfis CERN-i.
- 2009–2012 Eesti teaduste akadeemia uurija-professor.
- 2010. aastal külalisprofessor Helsingi ülikoolis.
- 2011. aastal teadur CERN-i teooriaosakonnas.
- 2012–2017 Tartu ülikooli kõrge energia füüsika professor. 2012. aastast peale keemilise ja bioloogilise füüsika instituudis (KBFI), praegu juhtivateadur, juhiv kõrge energia ja arvutusfüüsika laboratooriumi.
- Juhendanud 23 järel doktoritööd.
- Tema osalusel on valminud 1200 teaduspublikatsiooni, millest 1043 on kõrgeima taseme ehk 1.1-klassi artiklid.
- 2011. aastal valitud täppisteaduste alal Eesti teaduste akadeemia akadeemikuks.
- Osaleb Euroopa kosmoseagentuuri LISA-programmi teaduskoostöös; Eesti CERN-i nõukogu, Eesti kosmoseaduste komitee ja CERN-i suure hadronite põrguti eksperimendi CMS teadusnõukogu liige ning KBFI teadusnõukogu esimees.
- Pälvinud 2005. ja 2021. aastal riigi teaduspreemia, 2013. aastal Tartu ülikooli aumärgi ja 2022. aastal Valgetähe III klassi teenetemärgi.

Mitte küll KBFI osalusel, aga samamoodi tehakse CERN-is ka materjaliteadust, arendatakse uusi kiirenditehnoloogiaid ja muud, seega, teadmiste mõttes on see organisatsioon nagu küllusesarv.

Kuidas sina CERN-i radadele sattusid?

See juhtus juba kunagise Nõukogude Liidu päevil 1990. aastal, kui Tartus Tähe tänaval asuva füüsikahoone seinale ilmus paber, mis kutsus huvilisi CERN-i. Selle teate taga olid soomlased, kes võtsidki siit kaasa kaks eestlast, seahulgas minu. Olin siis CERN-is suveüliõpilane, kui toimus augustiputš. Läksin ära ühest riigist, ja tagasi tulin hoopis teise riiki.

Ja seitsaadi ongi sinu ja Eesti koostöö CERN-iga aja jooksul üha tihedamaks muutunud?

Just, nii see on.

KBFI-s juhivad sa üht Eesti teaduse tippuurimiskeskust – fundamentaalse universumi tippkeskust. Mis tööd seal tehakse?

Sellesse tippkeskusesse on koondatud kogu Eesti fundamentaalteaduste kompetents. Lisaks CERN-iga seotud osakestefüüsikale hõlmab see kosmoloogiat, astronoomiat, gravitatsiooniuuringuid ning selleks vajalikku infotehnoloogiat.

Tippkeskuses on peale KBFI koos Tartu ülikooli füüsika instituut ja Tartu observatoorium ning Tallinna tehnikaülikool – nii teoreetikud kui ka insenerid. Näiteks tehnikaülikooli insenerid ehitavad CMS-i jaoks elektroonikat. Tippkeskuse formaat annab koostöö tegemiseks lisafinantseeringu.

Füüsika on loodusteadus ja loodusteadus põhineb eksperimendil. Nii mõnigi kipub arvama, et loodusteadustes sünnivad uued teadmised nõnda, et kuskil istub mõni geenius ja mõtleb midagi välja. Tegelikult ei ole see loodusteadustes mitte kunagi niimoodi käinud. Isegi Einstein ei mõelnud oma teooriaid lihtsalt omast peast välja, vaid tal olid ees teatud eksperimentide tulemused, mida ta üritas seletada. Füüsikud peavad seletama loodust. Füüsikas on seadused kirja pandud matemaatika keeles ja need kehtivad alati. Kui keegi teeb eksperimendi ja leiab, et mõni seadus ei kehti, siis on meil vaja selle eksperimendi seletamiseks leida uus loodusseadus. Just niimoodi sünnivadki loodusteadustes uued teadmised. Selles mõttes on füüsika lihtne: vaja on teha vaatlusi ja eksperimente ning kui käes on tulemused, siis kogu maailm liigub sinna suunda. Näiteks tänu gravitatsioonilainete avastamisele tekkis universumi uurimiseks juurde terve uus vaateväli ja see on praegu maailma suurim ja kõige kiiremini arenev uurimisala.

Nii mõnigi kipub arvama, et loodusteadustes sünnivad uued teadmised nõnda, et kuskil istub mõni geenius ja mõtleb midagi välja. Tegelikult ei ole see loodusteadustes mitte kunagi niimoodi käinud. Isegi Einstein ei mõelnud oma teooriaid lihtsalt omast peast välja, vaid tal olid ees teatud eksperimentide tulemused, mida ta üritas seletada.



Arutelu on viljaka teadustöö tähtsamaid osi. Vasakul istub KBFI kõrge energia ja arvutusfüüsika labori vanemteadur Gert Hütsi, paremal sama labori vanemteadur Luca Marzola

**Kas osatakse juba aimata, milliseid avastusi võivad gravitatsiooni-
lained aidata meil teha peale selle, et saame aegruumivõngete
abil uurida mustade aukude, neutrontähtede või valgete kää-
buste kaksiksüsteemide ühinemist?**

Peab olema realist. Suure tõenäosusega saab gravitatsioonilainete abil vaadelda varajast universumit. See ei tähenda mitte ainult astronoomilisi objekte, vaid ka varajase universumi füüsikalisi protsesse, mille käigus miski, mis oli massitu, sai massi. Kõik need protsessid tekitavad laineid. Nende uurimiseks on vaja suuri, tervet universumit vaatlevaid tundlikke eksperimente. Seejures on vaja ka väiksemaid ülitundlikke eksperimente. Just selles suunas üritatakse nüüd minna.

Häda on selles, et gravitatsioon on kõige nõrgem interaktsioon ehk vastastikmõju. Seepärast on gravitatsiooni väga raske uurida. Footonite abil näed sa praegu siin seda lauda (*koputab sõrmenukiga vastu töölauda – U. K.*), aga gravitatsiooni kui kõige nõrgemat mõju ei saa nii naljalt näha. Gravitatsiooni puhul suudetakse praegu näha vaid kollektiivseid efekte. Footonite puhul võime näha ka ühte footonit. Aga see, kas kunagi saab näha ka ühte gravitoni ehk gravitatsiooni vahendavat osakest, on veel lahendamata probleem.

**Varases universumis toimunu huvitab meid vist seepärast, et
sedakaudu saame paremini tundma õppida ka universumi prae-
gust olemust?**

Täpselt niimoodi ongi. Selleks et uurida universumit või selle sees kehtivaid seadusi, tuleb kasutada kõiki võimalikke viise.

**Siin jõuame jälle universumi tumedama poole ehk senini sala-
pärase olemusega tumeaine või tumeenergia juurde.**

Tõsi, me ei näe universumi tumedat sektorit, aga me teame, et see interakteerub gravitatsiooniliselt. Kui vaata-
me galaktikat, siis see ju interakteerub gravitatsioonili-
selt. Kui vaatame nüüd varajasse universumisse ja näeme,
et seal toimus näiteks faasisiire, siis seeläbi saame tundma
õppida ka sellega kaasnenud teatud omadusi. Sellise
näide võib olla Higgsi boson. See osake on tuvastatud
suures hadronite põrgutis, aga äkki nüüd avastame selle
ka kosmosest.

Teine näide on tumeaine. Me üritame tumeaine
osakesi leida kiirendis ja hästi tundlikes eksperimentides,
aga samas võiks neid leida ka faasisiiretes või mustade
aukude ümbruses jne.

Näiteks faasisiirdeid uurivad meie instituudis Krist-
jan Kannike ja Ville Vaskonen. Hardi Veermäe uurib
omakorda mustade aukude ühinemisi.

**Kevadel, kui käisin siin laboris selle erinumbri võimalikke artikli-
teemasid arutamas, lasi Hardi oma tööarvutist heliks muundatud
mustade aukude ühinemise tantsu. See kõlas nagu kiire lupsumine:
lups-lups-lups!**

Minu vastaskabinetis töötab kreeklane Alex Karam. Ta
kirjutas mustade aukude tekitatud helidest muusika loo-
miseks kultuuriministeeriumile rahataotluse. Raha tal
siiski sealt saada ei õnnestunud, sest projekti hindajad
leidsid, et meeskonnas puudus professionaalne muusik.
Kujuta ette: dirigentide ja muusikute asemel tuleb hoopis
füüsik muusika loomiseks raha küsima! Nüüd on muusika-
akadeemiast kampa otsitud üks muusik ja uus rahataot-
lus läks hoopis Euroopa teadusnõukogule. See ei ole
üldse naljategu, vaid niisuguse muusika loomisel on tea-
duslik tagamaa. Kõik taandub ju mustade aukude pöörle-
misele, mis muutub helikeeles kuuldavaks.

Mida pead Eesti teaduse üheks peamiseks murekohaks?

Erinevalt Eestist on mujal maailmas teadlastel püsivad töökohad. Eestis teadlastel püsivaid töökohti pole ja kõik võistlevad kogu aeg kõigiga, sest teadlaste palgaraha tuleb projektipõhisest rahastamisest. Mujal maailmas tuleb teadlaste palgaraha mujalt ning projektirahad on mõeldud uute tegevuste elluviimiseks ja ka näiteks tudengitele tasu maksmiseks.

Miks meil need asjad siis on nõnda? Kas oleme liiga väikesed ja vaesed?

Jah, meie riik on väike ja seetõttu ka väga haavatav. Aga sellest hoolimata on meil praegu teaduses täiesti äärmuslik süsteem. Igal pool mujal, olgu see USA, Jaapan, Poola või Soome, on teadlastel ülikoolides karjäärimudel ja püsiva rahastusega töökohad. Kui teised saavad oma asju nii korraldada, siis miks meie ei saa? Ma ei mõista seda. *(Laiutab pead vangutades käsi – U. K.).*

Siin tuleb muudatusteks teha põhimõttelisi poliitilisi otsuseid.

Jah, nii see on.

Kui võrdleme ennast teiste riikidega, siis kuivõrd elujõuline ja tugev on Eesti fundamentaalteaduste valdkond?

Kõikidest murekohtadest hoolimata on meil praegu fundamentaalteaduste vallas koos väga tugev seltskond. Kui on olemas tugev teoreetikute koolkond, siis on selle peale võimalik ehitada ka kõike muud.

Siinkohal on hea võrrelda meid lõunanaabritega.

Footonite puhul võime näha ka ühte footonit. Aga see, kas kunagi saab näha ka ühte gravitoni ehk gravitatsiooni vahendavat osakest, on veel lahendamata probleem.

Kui meie alustasime koostööd CERN-iga, siis kõigepealt ehtasime endal üles füüsikavaldkonna. Ent lätlased ja leedukad teevad vastupidi: nemad tahavad kõigepealt suure innuga CERN-i minna, unustades ära, et tegelikult on neil selleks vaja esmalt arendada füüsikavaldkonda.

Niisugust asjade käiku vaadates võib öelda, et oleme nagu Helsingi ja Stockholm, mitte nagu Riia või Vilnius. See lihtsalt ei käi nii, et kui kellelegi tundub CERN laheda kohana, siis ta hakkab kohe liikmeks. Siin peab teadus ka taga olema.

KBFI-s käies hakkab alati silma mõni välismaalane. Kui rahvusvaheline seltskond siin töötab?

Meil on tõesti alati töötanud rahvusvaheline seltskond. Kõige enam on siin olnud itaallasi ja soomlasi. Siit on läbi käinud ka oma ala maailma tippteadlased. Kui saad siia tööle näiteks CERN-i kõige tuntuma mehe John Ellise või Itaalia Frascati laboratooriumi endise teadusdirektori Enrico Nardi, siis see näitab meie teadustöö tippaset. Frascati on nagu Itaalia CERN, kus on väikesed osakeste-kiirendid ja uuritakse hadronifüüsikat.



Lauajalgball on KBFI kõrge energia ja arvutusfüüsika labori igapäevaelus väga tähtsal kohal. Selle mängulaua juures saavad töötajad alatasa kokku ja vabas vaimus mõtteid vahetada. Pildil proovib Martti Raidal mängus jõudu kolleeg Luca Marzolaga

Mil moel sünnivad siin majas uued ideed ja teadmised? Kas see eeldab mahukaid arvutustööd, pikka ja pingsat mõttetööd või ühi-seid arutelusid?

Seda kõike on vaja. Tööpäev algab sellega, et avad arvuti ja tutvud arhiivikeskkonnas oma ala kõikide teadlaste värskemate teadusartiklitega. Enne kui artiklid avaldatakse mõnes väljaandes, saab kogu maailm neid siit arhiivist lugeda. (*Näitab arvutiekraanil uute artiklite pealkirjade pikka rida – U. K.*) Igal hommikul on eri valdkondades ees ootamas kümneid ja isegi sadu artikleid. Kui artiklid loetud, siis seejärel saab meil näiteks kohvimasina juures, lauajalgballi mängides või seminarides teatud tööde üle arutleda. Uued teadmised sünnivad kollektiivse töö tulemusel, mitte nõnda, et keegi istub arvuti taga ja ootab, kuni tekib välatus: heureka!

Nagu juba ütlesin, isegi Einsteinil polnud niisugust välgatushetke. Ta sõitis palju aastaid ühest ülikoolist teise ja otsis võimalusi, kuidas oma ideed matemaatiliselt kirja panna.

Kuidas meil füüsika vallas järelkasvuga lood on?

Üldine suundumus on selline, et üha enam noori tahab õppida humanitaariat ja sotsiaalteadusi, aga füüsika-tudengeid on väga vähe. Kui vaatame, kuidas meie üli-koolid arenevad, siis humanitaar- ja sotsiaalteaduste suu-nitlusega Tallinna ülikool juba on Eesti suurim ülikool või siis peagi saab selleks. Kunagi alustas ta pedagoogilise instituudina, kus oli tuhatkond üliõpilast. Kasvu taga on asjaolu, et Tallinn on Eesti suurim tömbekeskus, kus elab kõige rohkem inimesi. See on puhas turuloogika: kui pakkuda turule seda, mille järele on nõudlus, siis maailm liigubki sinna suunda. Tallinna ülikool on ehe näide selle kohta, kuhu meie kõrgharidusturg liigub.

Ent riik peaks näiteks rahaliselt toetama seda, et noored tuleksid ja õpiksid ka raskemaid erialasid ehk inseneeriat, füüsikat ja arstiteadust. Me ei saa ju teha nii, et ülikoolides on tuhandeid sotsiaalalade tudengeid ja nende kõrval vaid kümmekond füüsikut. Kogu meid ümbritsev tehnoloogia – autode, patareide, arvutite oma jne – on ju seotud füüsikaga. Niiviisi pole võimalik läbi ajada, et ostame endale kõik vajaliku Hiinast või mujalt sisse. Teatud asjadega peame ikka ise hakkama saama. Aga praegu on asjad täiesti paigast ära.

Omaette küsimus on see, et füüsikavallas meil Ees-tis peaaegu pole naisi. Kas sa oskad mulle näiteks mõnda nimetada?

Esimesena meenub Piret Kuusk, kelle kirjutis ilmub selles eri-numbriski, ja siitsamast KBFI-st Els Heinsalu.

Nemad ongi ühed vähestest. Eestis, aga ka Soomes, Root-sis ja Norras, meie erilalal füüsikas naisi praktiliselt pole. Miks naised ei tule füüsikasse? Põhjus on selles, et vabas ühiskonnas, kus inimesed saavad oma elulisi valikuid vabalt teha, naised lihtsalt ei taha füüsika alal kõrghari-

Üldine suundumus on selline, et üha enam noori tahab õppida humanitaariat ja sotsiaalteadusi, aga füüsikatudengeid on väga vähe.

dust omandada, sest see on raske valdkond. Samas pole selles vallas töötamisel ka nii-öelda pikka perspektiivi, sest töökohad teaduses olenevad projektipõhisest rahas-tusest. Miks peaks keegi tahtma tulla niisugusele tööle, kus terve ülejäänud elu peab jooksuma grantide järele? Niipea, kui sellest aru saadakse, siis lahkutakse. See on süsteemne probleem, mille lahendamiseks on vaja linge-tada poliitilisi otsuseid.

Näiteks Tartu ülikoolis enam bakalaureuseõppes ainult füüsikat õppida ei saa. Tudengeid võetakse vastu füüsika, keemia ja materjaliteaduse erialale, aga füüsikale saab keskenduda alles magistrantuuris. Kui sellele ühend-erialale tuleb alguses 30 tudengit, siis iga valdkonna peale jääb keskmiselt 10 õpilast. Pärast esimest kursust linge-vad neist omakorda pooled kohe välja.

Ainukene koht, kus Eestis saab juba bakalaureuse-õppes tehnilist füüsikat tudeerida, on Tallinna tehnika-ülikool.

Kas võiks siia füüsikat õppima meelitada huvilisi teistest riikidest?

Minu meelest on see Eesti kontekstis vale tee. Miks peaks võtma Eesti maksumaksja raha eest doktorantuuri mõne kolmanda riigi huvilisi? Tegelikult peaksime Eesti maksumaksja raha eest koolitama meie enda inimesi. Muljalt tulnutest õpivad vaid vähesed eesti keele selgeks. Kui vaatame teaduslikku järelkasvu ja tahame, et kohvi-masina ääres räägitaks juttu eesti keeles ja meil oleks ka eestikeelne teaduslik sõnavara, siis me ei saa teha nii, nagu tehakse seda Londonis, Oxfordis või Cambridge'is. Kuidas säilib eestikeelne õpe? Eestikeelne õpe säilib siis, kui kohvimasina juures räägitakse eesti keeles. Nii lihtne see ongi.

Ei taha seda jutuaajamist väga tumedas toonis lõpetada. Ütle, mis hoiab sinu silmi siin säramas?

Ikka see, et saan teha seda, mis mulle väga meeldib. Tea-dus on nagu tippспорт. Sa võistled iga päev kogu maa-ilмага. Kui suudad selles võistluses hakkama saada, siis on väga hea.

Nii mõnedki astrofüüsikud on seda meelt, et meil juba jutuks olnud universumi tumedama poole mõistatused suudetakse peagi lahti muukida. Kas sa oled sama optimistlik?

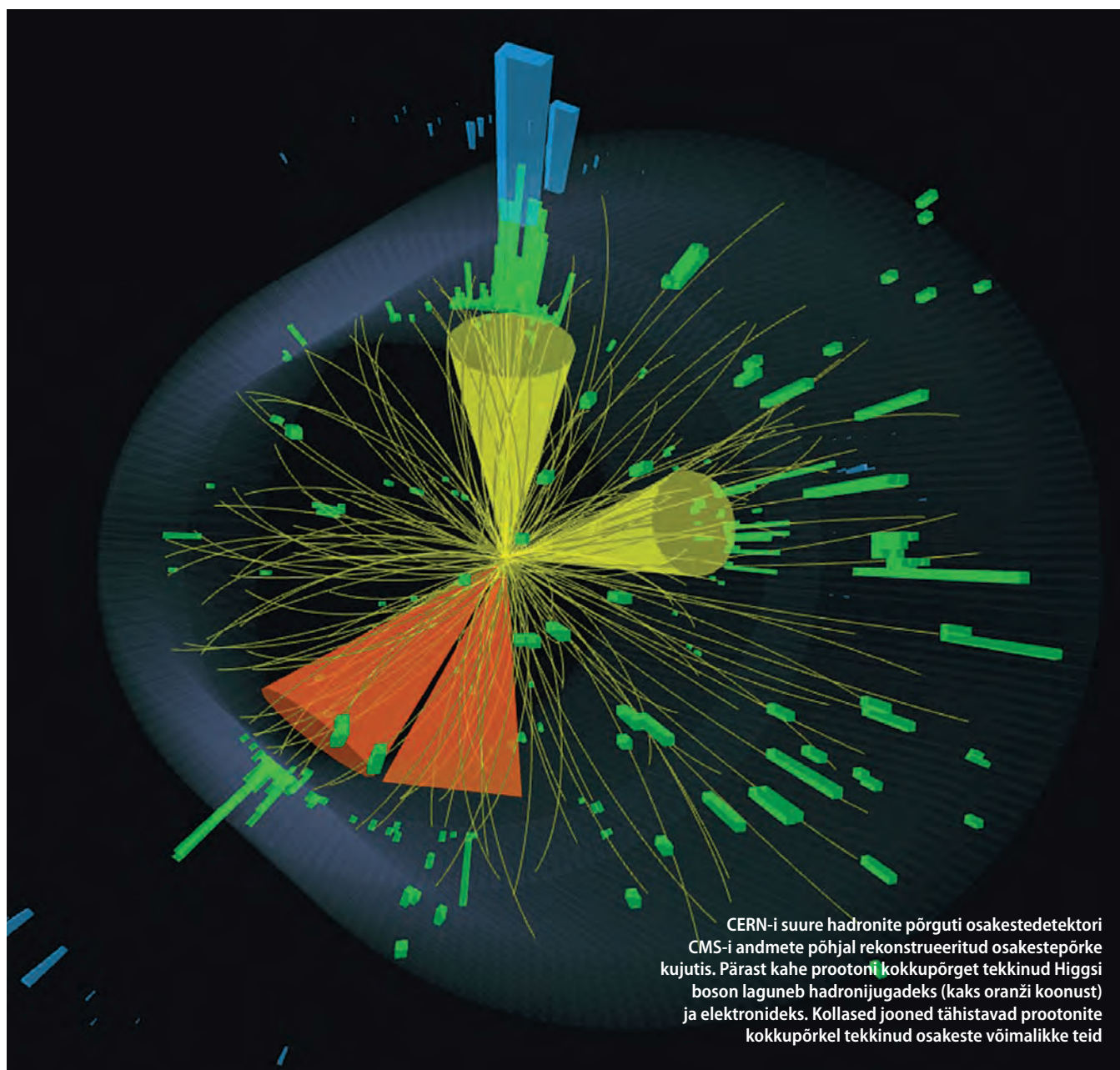
Füüsikas ei juhtu sellist asja, et avastusi saab kuidagi pla-neerida. Avastus on alati ootamatu. Tõsi, näiteks James Webbi kosmoseteleskoobi vaatlustulemustest on selgu-nud, et universumi struktuuri kujunemine algas seni-arvatust oluliselt varem ehk umbes siis, kui universum oli pool miljardit aastat vana. See tähendab, et ka tumeaine klombid tekkisid varem, kui seni arvatud. See annab meile väärtuslikku informatsiooni, aga teadustöö on ju nagu maja ehitamine, kus tuleb muudkui uusi teadmisi nagu kive üksteise peale laduda. Keegi ei tea, kui kaua me veel mõistatame, mis on tumeaine või tumeenergia.

Võimalik, et tume sektor on puhtalt gravitatsiooni-line. Nagu juba enne ütlesin, on gravitatsioon kõige nõr-gem interaktsioon. Kui see on gravitatsiooniosake, siis seda näha on peaaegu võimatu. •

Kvantarvutus on uus osakestefüüsika tööriist

JOOSEP PATA

Suur hadronite põrguti (*Large Hadron Collider, LHC*), maailma suurim ja võimsaim osakestekiirendi, asub CERN-is, Šveitsi ja Prantsuse piiri peal. Kuna alates tänavusest aastast on Eesti CERN-i täisliige, on meie võimalused arendada teadust, tehnoloogiat ja ettevõtlust avardunud. CERN on osakestefüüsika uurimise tippkeskus. See on üks väheseid uuenduskeskusi ja -suundi, kus Euroopa on maailmas konkurentsivõimeline.



CERN / CMS COLLABORATION

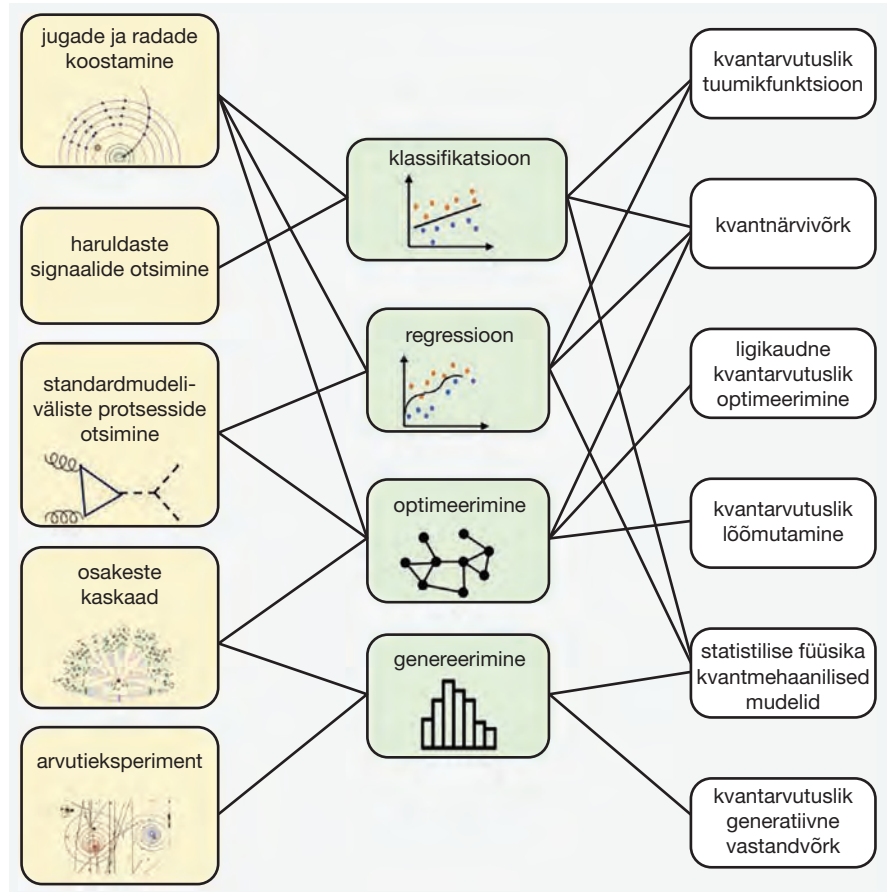
LHC kiirendis põrgatatakse prootoneid miljoneid kordi sekundis. Igast põrkest tekib sadu tuhandeid osakesi, mis kannavad informatsiooni looduseaduste kohta väga kõrgetel energiatel või väga varajastel universumi arenguetaapidel. Aastal 2012 avastati CERN-is täiesti uut tüüpi osake – ilma spinnita Higgsi boson, mis annab teistele osakestele massi. Need avastused ei sünni iseenesest: iga läbimurre nõuab tohtu hulga andmete töötlemist. LHC detektorid registreerivad sekundis miljoneid põrkeid, seega tekib iga päev petabaitide viisi andmeid, mida tuleb põhjalikult analüüsida. Selline andmeanalüüs muutub aina keerukamaks kahel põhjusel. Esmalt suurendab LHC järkjärguline täiustamine pidevalt andmevoogusid. Lisaks nõuab uute osakeste ja nähtuste otsimine üha täpsemat analüüsi, et eristada haruldasi sündmusi tavapärastest. Praegused arvutussüsteemid jõuavad selle ülesande keerukuse kasvades oma võimete piirile.

Siin võib tulevikus appi tulla kvantarvuti, mis suudab teatud ülesandeid lahendada tavalisest arvutist eksponentsiaalselt paremini ja kiiremini. Osakestefüüsika andmeid analüüsides on näiteks keeruline rekonstrueerida osakesi, eraldada nõrku signaale taustast ning teha praeguste looduseaduste põhjal andmepõhiseid ennustusi ehk simuleerida tehisandmeid.

Praegu kasutatavaid klassikalisi algoritme, mis põhinevad kombinatoorikal, optimeerimisel või masinõppel, saab kvantarvutil tihti lahendada kiiremini. Sisuliselt rakendatakse teistes valdkondades arendatud kvantarvutuse algoritme uudisel viisil, et täita osakestefüüsikaga seotud ülesandeid.

Nüüdsed kvantarvutid on võrreldes ülikiirelt arenenud klassikaliste arvutitega küllaltki väikesed: suurimates on mõnikümmeend kvantbitti, mõni tuhat kvantmehaanilist loogikaväravat ja arvuti töötab vigadeta kuni millisekundid. Võrdluseks: tavalises sülearvutis on kõik need näitajad peaaegu miljard korda suuremad. Sellegipoolest on mõistlik juba praegu mõelda tuleviku peale, kuna kvantarvutite kiire arengu

LHC detektorid registreerivad sekundis miljoneid põrkeid, seega tekib iga päev petabaitide viisi andmeid, mida tuleb põhjalikult analüüsida.



Joonisel on esitatud osakestefüüsika ülesannete, arvutusmetoodikate ja kvantalgoritmi vaheline jaotus. Vasakus veerus on toodud osakestefüüsika ülesanded, sh jugade ja radade rekonstrueerimine, haruldaste signaalide otsimine ja looduseaduste alusel tehisandmete genereerimine. Keskmeses veerus on võimalikud arvutusviisid, näiteks klassifitseerimine, lähendamine ja optimeerimine. Parempoolses veerus on võimalikud kvantarvutusmeetodid, mille põhjal neid ülesandeid lahendatakse.

ALLIKAS: ALBERTO DI MEGLIO ET AL, PRX QUANTUM 5: 037001; 2024

tõttu on mõningatele ülesannetele juba praegu võimalik leida lahendus tunduvalt kiiremini kui tavaarvutiga. Kvant-arvuti ei peagi kõigi nende näitajate poolest tavaarvutit ületama: tema eelis ilmneb teatud tüüpi ülesannete korral, kus ta suudab vastuse leida efektiivsemal viisil. Järgnevalt vaatlemegi, kuidas universumi väikseimate ehituskivide ehk algosakeste uurimine tõukab arendama uusi arvutusmeetodeid. Lähemalt uurime kahte osakestefüüsika ülesannet, mille korral võib tulevikus kvantarvutitest kasu olla.

Põrkes tekkinud osakeste rekonstrueerimine

Üks keerukamaid ülesandeid osakestefüüsika andmeanalüüsis on rekonstrueerida laetud osakeste trajektore ehk radasid. Kui kõrge energiaga prootonid CERN-i kiirendis kokku põrkavad,

tekib sadu tuhandeid uusi osakesi, mis lendavad läbi detektori ja jätavad sinna elektrilisi signaale ehk kolmemõõtmeliste pikslitega sarnanevaid detektoritabamusi. Rekonstrueerimisel tuleb need tabamused ühendada radadeks, mis näitavad, millised tabamused kuuluvad samale osakesele. See on raske kombinatoorne ülesanne, kuna ühes põrkes on sadu tuhandeid tabamusi, nendevahelisi võimalikke trajektore aga eksponentsiaalselt palju.

Klassikaliselt leitakse radu meetodil, mis koosneb mitmest etapist. Kõigepealt leitakse radade algmed, s.o kolmeli tabamust, mis võiksid kuuluda ühest osakesest lähtunud rajale. Seejärel lisatakse rajale kihi kihi haaval sobivaid tabamusi ja luuakse nende põhjal pike-mad rajavariandid. Kolmandas etapis eemaldatakse rajad, millel on liiga palju ühiseid tabamusi, kuna need kirjelda-

vad tõenäoliselt sama osakest. Lõpuks valitakse välja parima kvaliteediga rajad.

Kvantarvutid võivad siin pakkuda suurt eelist, kuna nad suudavad korraga uurida paljusid tabamuste kombinatsioone. Hiljutiste teadustööde põhjal suudab kvantarvuti teatud radade rekonstrueerimise etappe teha teoks parema skaleeruvusega kui tavaarvuti. Tavalise otsialgoritmiiga on kahest tabamusest koosnevate rajaalgmete konstrueerimiseks N tabamuse korral kuluv aeg proportsionaalne tabamuste ruuduga N^2 . Kui kasutada Groveri indeksotsingu kvantalgoritmi, mis võimendab kvantmehaaniliselt sobivate paaride tõenäosust, siis on selle ülesande täitmiseks kuluv aeg kõigest $\sqrt{N^2}$ ehk proportsionaalne tabamuste arvuga. Kolmikute leidmisel on need ajad proportsionaalselt N^3 klassikalise algoritmi jaoks ja $\sqrt{N^3}$ kvantalgoritmi jaoks. Siit tuleneb väga märkimisväärne kiiruse vahe, kui tabamuste arv N on suur.

Näiteks kui ühes pörkes on tabamusi 100 000 ja ühe klassikalise võrdluse tarbeks kulub üks nanosekund ja kvantoperatsiooni jaoks üks mikrosekund, siis klassikalise algoritmi korral oleks vaja vastavalt ligikaudu 280 tundi, aga

kvantalgoritmil ainult mõnikümmend sekundit. Praktikas saab klassikalise arvutuse muuta kavalate võtete abil efektiivsemaks. Samas on kvantarvuti operatsioonid tavaarvutite omadest üldjuhul aeglasemad. Samuti on vaja kvantarvuti puhul arvestada ajaga, mis kulub kvantolekute ettevalmistamiseks ja väljalugemiseks. Siiski võib väga suurte kombinatoorste ülesannete lahendamine käia tavaarvutile üle jõu, ent kvantarvuti saaks sellega hakkama märksa kergemalt. Tuleb märkida, et praegused kvantarvutid on veel liiga väikesed ja ebatäpsed, et neid CERN-i andmete analüüsimiseks kasutada. Näiteks on vaja kvantalgoritme kohendada, et nad suudaksid töötada ka mürarohke andmestikuga, kus kõiki tabamusi ei pruugi detektoris näha.

Pikemas plaanis võivad kvantarvutid tuua läbimurde osakeste trajektoorie rekonstrueerimisel. Kui õnnestub ehitada piisavalt võimsad kvantarvutid, saaks radasid leida palju kiiremini kui

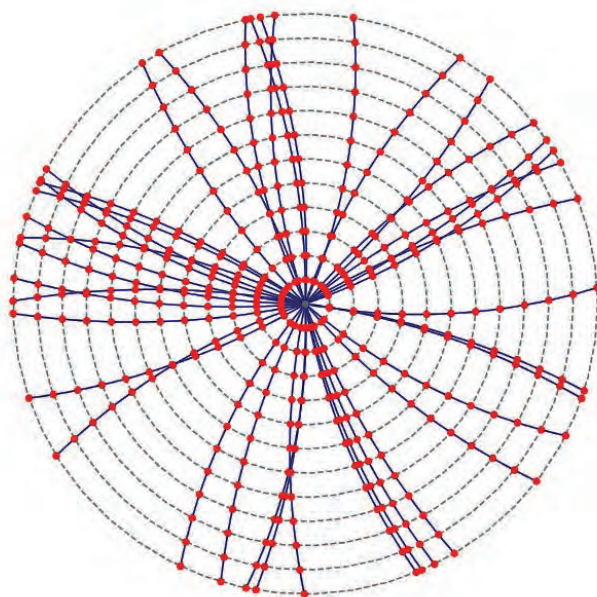
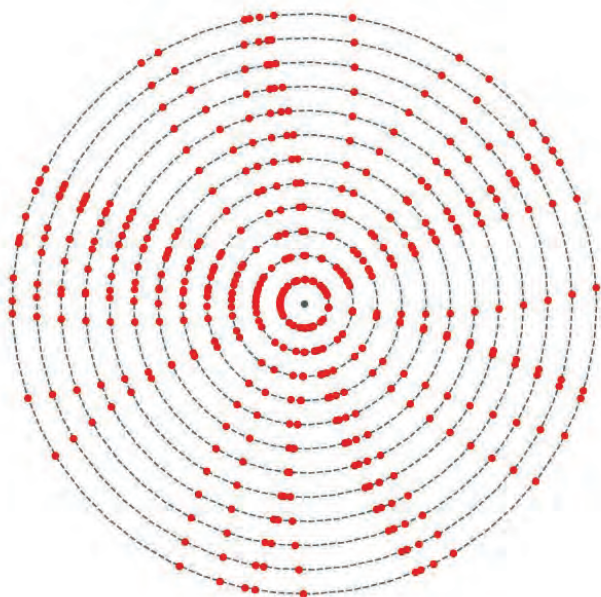
Praegused kvantarvutid on veel liiga väikesed ja ebatäpsed, et neid CERN-i andmete analüüsimiseks kasutada.

tavaarvutitega. See on eriti oluline tuleviku kiirendite jaoks, kus andmete maht ja keerukus suureneb veelgi. Näiteks LHC järgmise edasiarenduse korral kasvab osakeste arv sündmuse kohta praegusega võrreldes kuni viis korda ning radu on veelgi raskem rekonstrueerida. Seega on tähtis juba praegu uurida ja arendada lahendusi, mis suudaksid tuleviku andmehulkadega tõhusalt toime tulla.

Loodusseaduste kontroll tehisanndmetega

Kuna kiirendis tekkinud osakesi kirjeldab kvantmehaanika, võib kvantarvutil olla eelis tavaarvuti ees, sest erinevalt tavaarvutist saab osakesi esitada kvantarvuti jaoks loomulikul kujul, s.o põimitud lainefunktsioonidena. Kiirendiandmete mõtestamiseks kasutatakse tehisanndmeid, mille abil kontrollitakse, kas katsed vastavad loodusseadustele, ja mõõdetakse osakeste omadusi, nagu mass, spinn jne.

Praegu luuakse tehisanndmeid klassikaliste arvutisimulatsioonidega, mis lähendavad kvantprotsesse (osakeste teket, detektoriga vastastikmõju ja lagunemist) klassikalise tõenäosuse alusel. Ent sedalaadi arvutus on väga mahukas



Kui kõrge energiaga prootonid CERN-i kiirendis kokku pörkavad, tekib sadu tuhandeid uusi osakesi, mis lendavad läbi detektori ja jätavad sinna elektrilisi signaale ehk kolmemõõtmeliste pikslitega sarnanevaid detektoritabamusi. Sellel joonisel on näha, kuidas andmeanalüüsiga ühendatakse need tabamused radadeks. Vasakpoolsel pildil on punaste täppidena kujutatud osakeste jäetud radade tabamused detektori kihtides, mis on esitatud hallide ringidena. Parempoolsel pildil on rajad, mis ühendavad tabamusi neid tekitanud osakeste trajektoorie järgi.

Nii moodi radu rekonstrueerides tuleb vasaku pildi põhjal luua paremal kujutatud tulemus. See pilt on lihtsustatud, sest tegelikkuses tekib kiirendikatsetes sadu tuhandeid tabamusi, mis asuvad kolmemõõtmelises ruumis.

ALLIKAS: DUARTE MAGANO ET AL., PHYS. REV. D 105; 076012; 2022

Kiirendiandmete mõtestamiseks kasutatakse tehisandmeid, mille abil kontrollitakse, kas katsed vastavad looduseadustele, ja mõõdetakse osakeste omadusi, nagu mass, spinn jne.

ega saa põhimõtteliselt olla kunagi piisavalt täpne, sest klassikaliselt ei saa kvantprotsesse kunagi kujutada piisava täpsusega. Samas võib kvantarvuti matkida keerulisi protsesse tunduvalt täpsemalt. Ehk sõnastades ümber füüsik Richard Feynmani öeldu: „Pagan võtaks, loodus ei ole klassikaline – kui tahad loodust kirjeldada, siis peab see kirjeldus olema kvantmehaaniline“.

Haruldaste pörgete otsimine

ja klassifitseerimine kvantmasinõppega

Kuidas saavad neutriinod massi? Mis on tumeaine ja tumeenergia? Pärast

Higgsi bosoni avastamist on LHC põhi-eesmärk vastata füüsika veel lahendamata küsimustele. Selleks tuleb pörkest rekonstrueeritud osakeste jaotuste ja mustrite põhjal otsustada, kas pörkes tekkis ka teadaoleva osakestefüüsika ehk nn standardmudeli väliseid osakesi. Tavaliselt käib vastav analüüs nii, et võetakse kogu teadaolev osakestefüüsika ja tekitatakse sellest tohtus koguses tehisandmeid, mida nimetatakse taustaks. Sama tehakse uue füüsika mudelitega ja tekitatakse tehisandmeid, mida nimetatakse signaali kandidaatideks. Tehisandmetes eristatakse signaalikandidaate taustast juhitud masinõppe klassifikatsioonialgoritmide abil. Kui mudel tehisandmetes toimib, siis kasutatakse seda katseandmetes, et näha, kas need uue füüsika mudelid võiksid päriselt kehtida. Niisuguse juhitud masinõppe viisi saab otsida ainult selliseid uue füüsika nähtusi, millel on mingi teoreetiline alus: me teame, mida me otsime, kuigi me pole seda veel leidnud. Näiteks otsi-

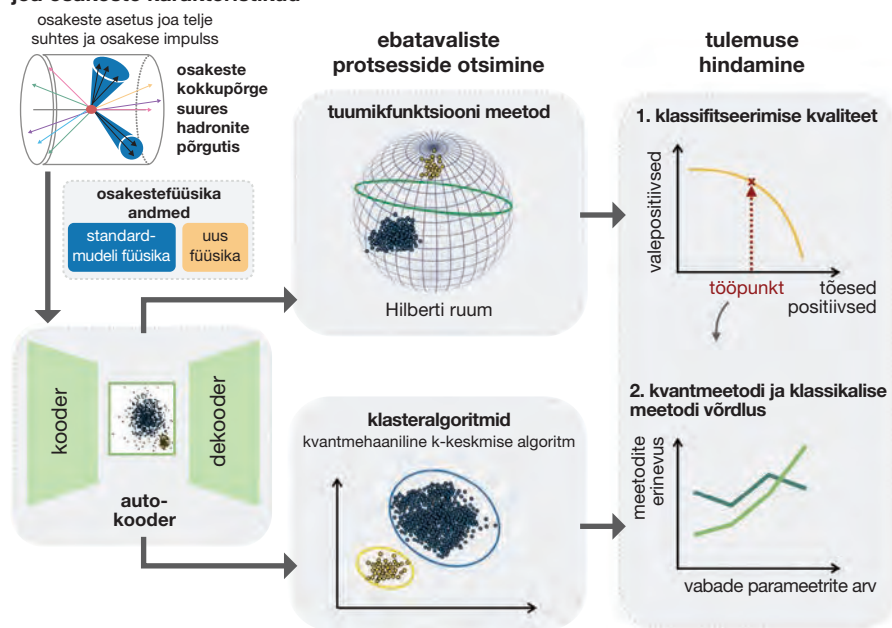
me tumeaine osakesi, sest nende olemasolu on kaudselt tõestatud, ehkki me pole neid kunagi näinud. Aga mismoodi leida täiesti ootamatuid nähtusi, mille võimalikkust pole osatud ette näha? Need võivad olla füüsika seisukohalt palju põnevamad avastused, sest nad viitavad täiesti uutele looduseadustele.

Anomaaliade otsimise algoritmi põhimõte on, et ei valita välja konkreetseid uue füüsika mudeleid. Selle asemel üritatakse leida iga üles võetud pörke jaoks tõenäosus, kuivõrd see pörkesündmus kattub teadaoleva füüsikaga ehk osakestefüüsika standardmudeliga. Füüsikaprotsessides tekivad raskete osakeste lagunemisel osakeste kimbud ehk joad. Jugades olevate osakeste muster kannab informatsiooni selle kohta, millised osakesed tekkisid. Potentsiaalset uue füüsika osakesed võivad jätta sellise mustriga jugasid, mida me ei oska tehisandmetes kirjeldada. Küll aga oskame tehisandmete abil hästi kirjeldada teadaolevat füüsikat ja võime kasutada masinõpet, et ära õppida juba teadaolevatest protsessidest tekkinud jugade mustrid.

Selleks kasutatakse nn autokooderi (ingl *autoencoder*) algoritmi, mis üritab tehisnärvivõrgupõhise kooderiga jugades olevate osakeste sisendandmeid kokku pakkida, ja siis dekooder-närvivõrguga neid uuesti lahti pakkida. Kui sellist närvivõrkude komplekti treenida teadaolevate protsessidega ehk standardmudeli tehisandmestikul, siis on võimalik teadaolevate protsesside struktuur efektiivselt ära õppida ja suur hulk muutujaid väiksemaks kokku pakkida.

Kooder-närvivõrgu väljund kannab nüüd endas sama informatsiooni nagu algne andmestik, kuid kokkupakitud ja efektiivsemal kujul. Nüüd tulevad appi kvantarvutusel põhinevad masinõppealgoritmid, mis suudavad väheste näidete ja kokkupakitud andmete põhjal hästi eristada teadaolevaid protsesse uutest protsessidest. Kõigepealt on vaja kooder-närvivõrgu väljundid esitada kvantbittide jada ehk kvantregistri ku-

joa osakeste karakteristikud



Haruldaste protsesside otsimine klassikalise masinõppe ja kvantmasinõppe hübriidil põhineva lahendusega. Pörkesündmused koosnevad jugadest ehk osakeste kimpudest. Osakeste ja jugade omavahelises mustris on kodeeritud informatsioon füüsikaprotsesside kohta. Autokoodril põhinev klassikalise masinõppe algoritm õpib ära teadaoleva füüsika põhjal tekitatud tehisandmestiku struktuuri ja pakib seeläbi mõõteandmed kokku tihkeks esituseks. Need esitused saab kvantbittide kujul kvantarvutile sõtta. Seejärel kasutatakse kvantarvutusel põhinevaid masinõppealgoritme, et eristada võimalikke uue füüsika protsesse teadaolevatest protsessidest. Ilmneb, et kvantarvutusel rajanevad meetodid annavad palju täpsema tulemuse, kui andmestikud on väikesed.

ALLIKAS: VASILIS BELIS ET AL., COMMUNICATIONS PHYSICS 7, ARTIKKEL NR 334; 2024

Kvantarvutusel põhinevad masinõppealgoritmid suudavad väheste näidete ja kokkupakitud andmete põhjal hästi eristada teadaolevaid protsesse uutest protsessidest.



CERN / MARINA CAVAZZA

Mullu novembris CERN-is toimunud kvanttehnoloogia tulevikuvõimalusi käsitletud foorumil „Sparks!“ esitasid audiovisuaalse tantsuetendusega oma tõlgenduse ka koreograaf Li I-Fang (vasakul) ja kunstnik Su Wenchi (paremal). Tulevikus võivad kvantarvutid tuua läbimurde kiirendites osakeste pörkejärgsete trajektoorie rekonstrueerimisel. Piisavalt võimsa kvantarvutiga saaks neid radasid leida palju kiiremini kui tavaarvutiga. See on eriti oluline uute kiirendite jaoks, kus kogutavate andmete maht ja keerukus suureneb veelgi

jul. Igat registri kvantbitti pööratakse Blochi sfääril (Blochi sfääriga on võimalik geomeetriliselt kujutada ühe kvantbitti võimalikke seisundeid) kooder-närvivõrgu muutujate paaride alusel ja kvantbitid seatakse omavahel põimitud olekusse. Niimoodi saab väga väikesesse kvantregistrisse, näiteks kuni neli kvantbitti, pakkida väga tõhusalt kokku suure hulga informatsiooni.

Seejärel saab kasutada klassikaliste andmeanalüüsi algoritmide kvantarvutuslikke edasiarendusi, näiteks klasteranalüüsi või toevektormasinaid, et eristada võimalikke uue füüsika protsesse tavafüüsika omadest. Niisuguste algoritmide eelis on ennekõike parem eristamise efektiivsus väga väikeste andmetike või väga kompaktsede sisendmuutujate korral. Kvantarvutus või-

mendab siin algoritmide efektiivsust väheste andmetega režiimis, kuna kasutab ära sisendmuutujate vahelisi põimitusi. Nõnda saab edukalt kasutada klassikalist masinõpet, et tekitada sisukad algolekud praegustele kvantarvutitele, ja seeläbi parandada haruldaste protsesside otsimisviiside tundlikkust.

Tulevikuväljavaated

Praegu käib vilgas töö, proovides prototüübifaasis kvantarvutitega lahendada osakestefüüsika keerulisi arvutusprobleeme. Üldpõhimõtte järgi tuleb osakestefüüsika protsessid, näiteks laetud osakeste rekonstrueerimine detektoritabamustest, laadida kvantarvutisse ja sõnastada ülesanne nõnda, et kvantarvuti saaks selle efektiivselt lahendada. Tavaliselt tuleb selleks koostada kombinatoorsed või otsinguülesanded, millele võib klassikalisel arvutil kuluda ülemäära palju aega. Selliste ülesannete jaoks on võimalik kasutada juba välja töötatud kvantalgoritme, näiteks kvantarvutusel põhinevat Groveri otsimisalgoritmi, mis lahendavad keerukaid kombinatoorseid ülesandeid tõhusamalt.

Lähituleviku kvantarvutid on tõenäoliselt liiga väikesed ja liiga suurte vigadega, et neist võiks osakestefüüsika andmetöötlustes praktilist kasu olla. Küll aga on võimalik selleks juba praegu välja töötada uudseid võtteid ja oskusteavet. Kui kvantarvutid jõuavad laialdaselt kasutusele, siis on võimalik praeguste arenduste põhjal loodud rakendustega kiiresti edasi liikuda. Kuna masinõpet kasutatakse nii osakestefüüsikas kui ka ühiskonnas üldiselt väga palju, on kvantarvutusel põhinev masinõpe eriti paljulubav arengusuund. Sisuliselt on võimalik luua hübriidmeetodeid, millega saab klassikalisi masinõppet põhinevaid algoritme kasutada kvantarvuti abil kiiremini ja efektiivsemalt. Haruldaste osakestefüüsika protsesside otsimise kõrval saab niisuguseid algoritme rakendada ka mujal, kus on vaja otsida suurtest andmetikest nõrka signaali. •

Joosep Pata (1990) on füüsik, keemilise ja bioloogilise füüsika instituudi vanemteadur. Uurib masinõppe ja kõrgjõudlusarvutuse meetodite rakendamist osakestefüüsikas.

Kuna masinõpet kasutatakse nii osakestefüüsikas kui ka ühiskonnas üldiselt väga palju, on kvantarvutusel põhinev masinõpe eriti paljulubav arengusuund.



Teleskoobid.ee



Mine loodusesse!



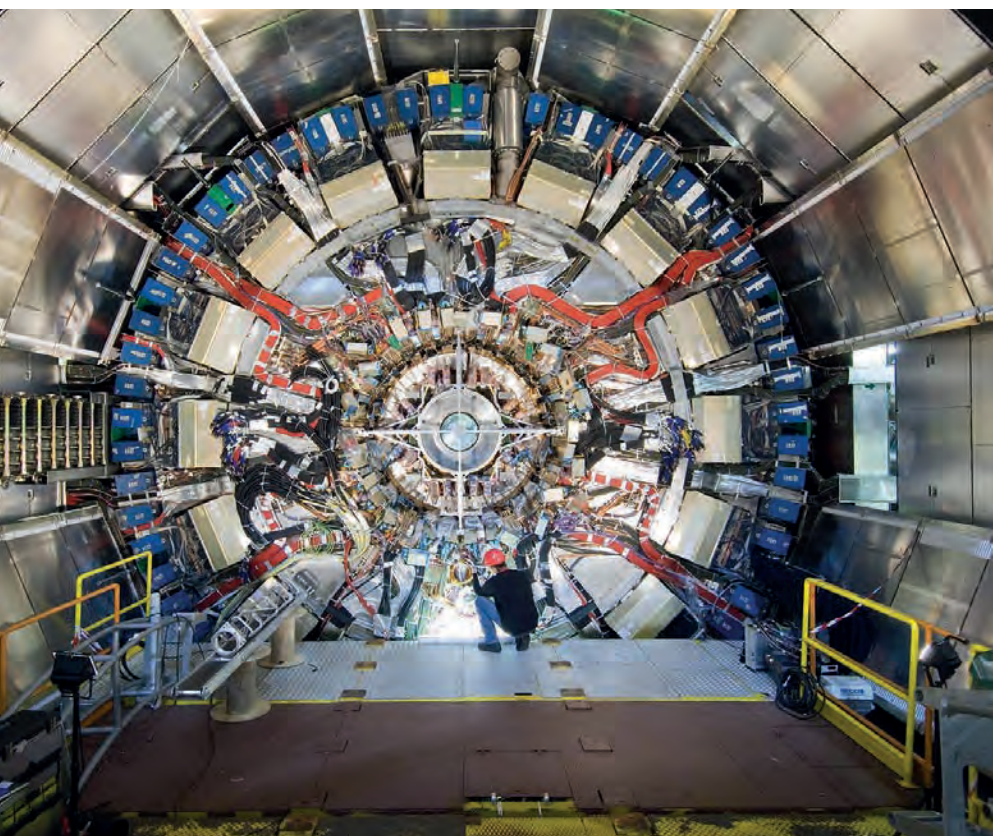
autoriõigus MTÜ Loodusajakiri

www.teleskoobid.ee

Kvantinformatsioon kiirendites: mis ja milleks?

LUCA MARZOLA

Kvantinformatsiooniteooria (KIT) kirjeldab, kuidas mõjutada, üle kanda ja dekodeerida kvantsüsteemi kodeeritud informatsiooni. Kõige tavalisem on olukord, kus Alice ja Bob vahetavad kvantbittidesse kodeeritud informatsiooni, kuna pealtkuulaja Eve üritab sõnumi sisu teada saada. Kvantbitid on süsteemid, mis Schrödingeri kassina elavad kahe baasoleku – „surnud“ ja „elus“ või 0 ja 1, kui soovite – superpositsioonis. See tähendab, et erinevalt tavalistest bittidest ei ole kvantbitt ei 1 ega 0, kuni me selle väärtust pole mõõtnud. Alles siis on see 1 või 0 (selle leiulaine kollabeerub) vastava tõenäosusega, mida ennustab kvantmehaanika.



Sissevaade CERN-i suure hadronite põrguti osakestedetektorisse ATLAS

CERN-i kiirendiekspperimentides ei ole aga ei Alice'i, Bobi ega Eve'i. Ainult peaaegu valguse kiiruseni kiirendatud osakeste kiired, mis põrkavad üksteisega kokku sellistes detektorites nagu ATLAS või CMS. Detektorid sisuliselt pildistavad põrkes tekkinud segadikku ja füüsikud kasutavad neid pilte oma teooriate kehtivuse kontrolliks.

Te küsite, kuidas panna kokku KIT ja kiirendid. Nipp ei ole mitte Alice'i või Bobi panekus detektorisse. Vaatame näiteks t- ehk tipukvarki, mis tekkis kiirte kokkupõrkes. Kvarkidel on omandus nimetusega spinn, mis on kindla suuna suhtes kas „üles“ või „alla“, olenev sellest, mis suuna me valime. Siin on „üles“ ja „alla“ ainult sildid, mida me

kasutame, kirjeldamaks kvarki kvantolekut pärast selle spinni mõõtmist. Mis silti me kasutame, ei ole õigupoolest tähtis: ainuke oluline asi on, et iga t-kvark käitub spinni mõttes nagu kahe olekuga süsteem: kui oleme spinni ära mõõtnud, on see „üles“ või „alla“, 1 või 0. Kuna osakesed on oma loomult kvantobjektid, võimaldab spinn meil osakestest mõelda kui kvantinformatsiooniteooria kvantinfo kandjatest. „Lollus!“ ütlete teie? Kuulake mind ära.

Juba sel tasemel lubab osakeste tõlgendamine kvantinfo kandjana meil kasutada KIT-i meetodeid kiirendiekspperimentides füüsika uurimiseks. Üks tähtsamaid näiteid on kvanttomograafia: KIT-i tehnika, kus hulk mõõtmisi lubab meil rekonstrueerida süsteemi kvantoleku. Kiirendites on võimalik enam-vähem otse mõõta terve hulga osakeste spinni, nende seas on t-kvargid ja tau-leptonid, mis mõlemad käituvad kvantbittidena, ning W- ja Z-bosonid, mis käituvad kvanttrittidena (kolme olekuga süsteemina). Ekspriimentatorid saavad mõõdetud spinne kvanttomograafia abil kombineerida, näiteks prootonite kokkupõrkes tekkinud kvarki-antikvarki paari spinne, et nii hästi kui võimalik kirjeldada tege-

Kuna osakesed on oma loomult kvantobjektid, võimaldab spinn meil osakestest mõelda kui kvantinformatsiooniteooria kvantinfo kandjatest.

Kvantmehaanikat saab kõrgetel energiatel proovile panna.

Keegi ei uskunud õieti, et teooria sel režiimil ei toimiks, kuid on siiski märkimisväärt, et suudame oma teadmiste nii olulist alustala kontrollida.

likku kvantolekut. Teoreetikud omakorda saavad kvanttomograafia tulemusi iseseisvalt ennustada, lähtudes antud osakestefüüsika mudeli vastastikmõjust ja olemasolevatest osakestest. Seega saab neid mõõtmisi kasutada, et selgitada välja, milline mudel tegelikult toimib, ja kuna võrdluse all on uuritava süsteemi kvantolek, sobib see meetod selleks eriti hästi.

KIT-i ja osakestefüüsika kumuleeritud kooselul on teine külg, mis on juba kutsuda „KIT-i kõrge energia füüsika“ või „menoloogiks“. Vaatamata sellele, et kokkupõrkes tekkinud osakeste kiirgus kvargi paari. Nende osakeste saame teada, analüüsides nende liikumisel tekkinud osakeste jälgi. Nii suunda: nendeks on näiteks kvarkid ja W-boson. Lagunevate osakeste toimib seega samasuguse spinnimomendimisena, mida Alice ja Bob teevad neile kättesaadavate kvantbittidega. Et teha kiirendites KIT-i, võime Alice'i ja Bobi mängutoomise asemel lihtsalt vaadata, kuidas kokkupõrkes tekkinud osakesed lagunevad. Tehniliselt on iga osakeste-paar kaheosaline süsteem: süsteem (paar), mille moodustavad kaks alam-süsteemi (antud juhul kaks osakest, kvantbitti). See on miinimum, mida meil on vaja, uurimaks KIT-i tuumaks olevaid arusaamu, nagu kvantpõimitus või Belli võrrandite rikkumine.

Kvantpõimitus on kvantmehaanika tunnusmärk, mida Einstein ei suutnud lõpuni seedida. Ta kutsus seda „tontlikeks kaugmõjuks“ ajal, kui halloween polnud veel üldse moes! „Kaugmõju“ all mõtles ta seda, et kvantpõimituse korral on kvantsüsteemi alamsüsteemid omavahel korreleeritud, olenemata sellest, kui kaugel nad üksteisest on. Teiste sõnadega võib öelda, et põimitud süsteem on enam kui selle osad, alamsüsteemid! See ehmatas Einsteini niivõrd, et tema arvates ei võinud kvantmehaanika olla looduse täielik kirjeldus. Koos kolleegidega pani ta ette alternatiivi, kus kvantmehaanika veidrused seletati

ära varjatud muutujate abil: need oleksid uuritavate süsteemide omadused, mis ei ole vaatlejale tingimata kättesaadavad. Tema arvates oleks kvantbitt näiteks alati olnud 0 või 1 nagu tavaline bitt; me ainult ei teaks selle väärtust enne mõõtmist. Kvantmehaanika järgi ei ole kvantbitt ei 0 ega 1 enne, kui oleme seda mõõtnud, mispuhul leiuline kollabeerub ja 0 või 1 realiseerub.

Teaduslik debatt kvantmehaanika ja varjatud muutujatega teooriate vahel käis 30 aastat, kuni füüsik John Stewart Bell mõtles välja katse, mis suudab nende vahel vahet teha. Võti on teatud võrratus, mida varjatud muutujatega teooriates arvatud korrelatsioonid peavad rahuldama, kuid mida kvantmehaanika peab põimituse tõttu rikkuma. Mõnda aega hiljem tegid Alain Aspect, John Clauser ja Anton Zeilinger kindlaks, et nn Belli võrratuse rikkumine footonitega tehtud katsetes on tõesti esineb ja said selle eest 2022. aastal Nobeli füüsikaauhinna. Einsteini arvamus ehk „harmimiks kvantmehaanika kehtib ainult looduses“ on täielikult väär.

Enamapärast saame teha järgmise katse, mis suudab kontrollida Belli võrratuse rikkumist ja katsetada seda teooriat uuel viisil, mida pakuvad kiirendikatsed, kus on kättesaadav energiahahemik (enam veel, vastastikmõjud), mida ei ole tavalistes KIT-i eksperimentides võimalik saavutada. Nii ATLAS kui ka CMS kollaboratsioonid on uurinud põimituse olemasolu LHC-s tekkinud t-kvargi ja antikvargi paaride spinnolekus, ning nii põimitus kui ka Belli võrratuse rikkumine on leitud mitmesugustes B-mesoni ja tšarmooniumi laguproduktides. Kvantmehaanikat saab kõrgetel energiatel proovile panna. Keegi ei uskunud õieti, et teooria sel režiimil ei toimiks, kuid on siiski märkimisväärt, et suudame oma teadmiste nii olulist alustala kontrollida.

Nüüdseks olen teid loodetavasti veennud, et osakestefüüsika ja KIT-i pentsiku piiriala uurimine võib kasu tuua. Teil võib olla veel üks väga tähtis küsimus: kui osake on infokandja, siis mille kohta see informatsioon käib?

Informatsioon võib osutada ühiskeeleks, mis võimaldab välja selgitada, kuidas saavutada kaua otsitud kõigi looduse alusjõudude ühinemine.



Ameerika teadlane John Archibald Wheeler leidis, et kogu füüsika on oma olemuselt informatsiooniteoreetiline: *it from bit* (kõik bitist)

Teisisõnu: mis on sõnum? Praegu me seda ei tea. Oleme KIT-i käsitusviisi ja meetoditega alles hakanud kiirendites uuritava kõrge energia piiri uurima. Huvitaval kombel üritavad gravitatsiooni uurijad praegu sama asja ja püüavad õhinaga gravitatsiooni mõista informatsiooni vaatenurgast.

On veel liiga vara öelda, kas nüüdse osakestefüüsika paradigma, standardmudeli jaoks saab anda informatsiooni-teoreetilist kirjeldust, mis aitaks looduse fundamentaalseid protsesse mõista sügavamalt kui praegune sümmeetriatel ja sümmeetriarikkumisel põhinev käsitus. Kui see on nii, siis võib informatsioon osutada ühiskeeleks, mis võimaldab välja selgitada, kuidas saavutada kaua otsitud kõigi looduse alusjõudude ühinemine, ja sellega näidata, et John Archibald Wheeleril oli õigus, kui ta leidis, et kogu füüsika on oma olemuselt informatsiooniteoreetiline: *it from bit* (kõik bitist). •

Luca Marzola (1983) on keemilise ja bioloogilise füüsika instituudi vanemteadur, kelle kesksed valdkonnad on elementaarosakeste füüsika ja kvantväljade teooria.

AIP EMILIO SERGE VISUAL ARCHIVES, WHEELER COLLECTION

Kvantmehaanika ja mittelineaarne optika

PEETER SAARI

Võib väita, et mittelineaarne optika on kvantmehaanika juubeli tähistamisel mõneti kontvõõras. Kvantmehaanika põhivõrrandid on lineaarsed. Pealegi, erinevalt näiteks kvantoptikast, mis sündis koos kvantmehaanikaga, võinuks mittelineaarne optika kui teadusala teoreetiliselt tekkida juba 19. sajandil klassikalise füüsikalise optika raames. Kuivõrd on selles ketserlikus väites tõtt, selgub kirjutisest.



FEDERICOVIS / WIKIPEDIA

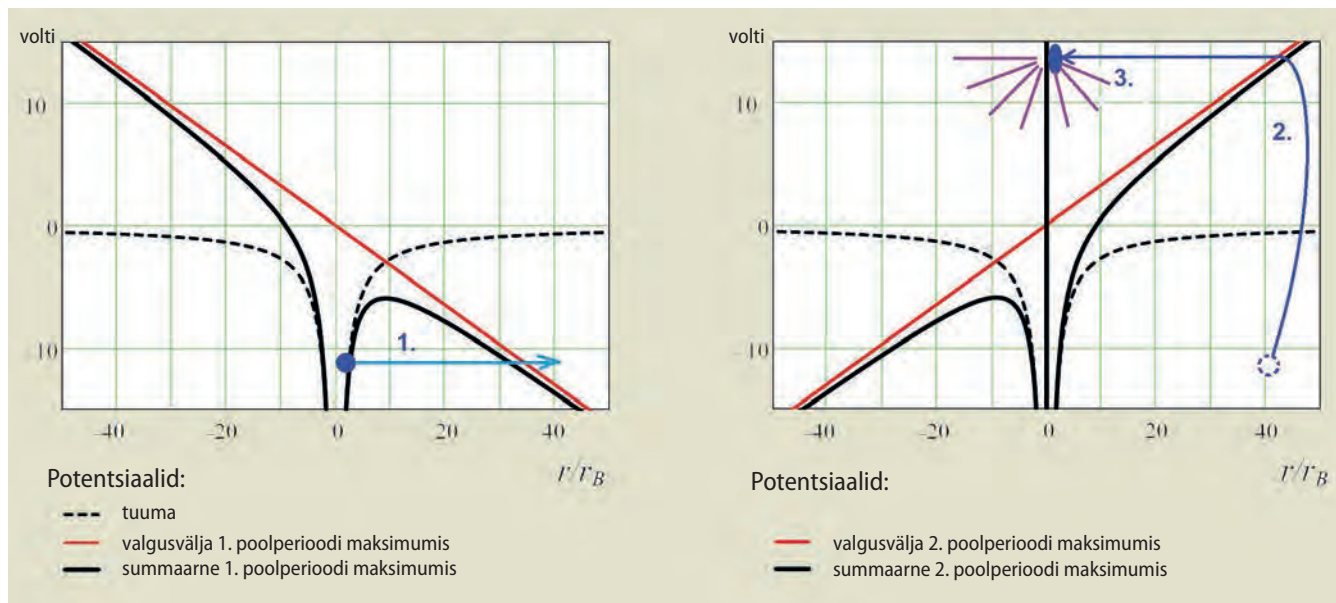
Alustame terminite tähendusest. „Mittelineaarne“ on üha moekam sõna, mida ohtralt kasutatakse paljudes valdkondades. Näiteks räägitakse „mittelineaarsest mõtlemisest“, mis olevat omane neuroloogiliste eripäradega inimestele. Kes küll saaks täielikult aru, mida see tähendab? Kas see võib aidata kvantmehaanikat mõista?

Signaalide ja süsteemide teoorias, elektroonikas ja füüsikas üldiselt tähendab linearsus lihtsalt öeldes seda, et kui sisendiks on sinusoidaalne ehk harmooniline võnkumine, siis väljundis ei ole muud kui seesama võnkumine, ehkki amplituud ja võnkefaas võib olla muutunud. Uusi sagedusi lineaarses süsteemis ei teki. Näiteks on takistitest, kondensaatoritest ja induktiivpoolidest kokku pandud suvaline elektroonika-süsteem just sellises tähenduses lineaarne. Nagu ka (kvaliteetne) helivõimendi, hoolimata tema tämbri muutmise nupudest, võimalusest lisada kajaefekt jms. Põhimõtteliselt samuti on klassikalises optikas, kus väljundvalguse annab pealelangeva valguse tekitatud lineaarne polarisatsioon, mis pole muud kui võnkumise tekitamine ainetüki mikrosakestes. Muidugi on asi keerulisem kui elektroonikaskeemis, kas või see-

Põhimõtteliselt samuti muutub lineaarne optika mittelineaarseks, kui vaid leida materjal, mille polarisatsiooniline koste langevale valgusele on mittelineaarne.

Kõrgete harmooniliste ehk ületoonide tekitamine krüptonis. See on atosekundiliste valgusvälgete tekitamise enim kasutatud tehnoloogiaid. Sedavõrd lühikeste impulsside abil saab vahetult uurida liikumisi aatomite sees ja molekulides

Atosekundiliste impulsside ja ülemtoonide tekitamise kolme sammu mudel



Vasakpoolisel joonisel moonutab ülitugeva infrapunalaseri impulsi elektiväli aatomituuma asukohas tuumalaengu Coulomb'i (kaugusega r pöördvõrdelist) potentsiaali nii, et energia põhitasemel olevale elektronil avaneb võimalus kvantmehaanilise tunneliefekti teel läbida moonutusest alles jäänud energiabarjäär ja eemalduda tuumast – 1. samm. Paremal muutub valguslaine poole perioodi võrra hiljem tema elektrivälja suund vastupidiseks ja seega tuumast eraldunud elektroni potentsiaalne energia suureneb – 2. samm. Kuna potentsiaal tuuma suunas väheneb, hakkab elektron kiirenevalt liikuma tuuma poole (selle asukohta tähistab must vertikaal) ning sellega kokku põrgates pidurdub, tekitades pärsskiirguse impulsi – 3. samm. Horisontaalteljeks on laserikiirega risti ja seega tema elektriväljaga paralleelne sirge, mis läbib tuuma asukohta ja mille skaala ühik on Bohri raadius r_B – vesiniku aatomi tuuma (prootoni) ja põhiolekus elektroni vaheline keskmine kaugus.

Joonised on teinud artikli autor aastail 1999–2010 Tartu ülikooli teise aasta füüsikuile tema loetud põhikursuse „Elekter ja magnetism“ interaktiivse töölehe alusel

tõttu, et signaaliks on kolmemõõtmelises ruumis leviv laine ja takistused; mahtuvused ning induktiivsused on ruumis laiali jaotatud.

Elektroonikast või elektrotehnikast leiame hästi tuntud alaldava diodi kui lihtsaima, kuid tugevalt mittelineaarse skeemielemendi. Vool diodis pole proportsionaalne sisendpingega, kui see märki muudab. Seetõttu sisaldab alaldatud ehk raadiosignaali puhul demoduleeritud väljund peale sisendi sageduse selle kordseid võnkumisi ehk kõrgemaid harmoonilisi ehk ülemtoone ja muidugi ka nullise sagedusega alalis-komponenti.

Põhimõtteliselt samuti muutub lineaarne optika mittelineaarseks, kui vaid leida materjal, mille polarisatsiooniline koste langevale valgusele on mittelineaarne. Asjaomane teooria võinuks olla kirja pandud ammu enne kvantmehaanika sündi ja viimast vajamata. Tegelikult arendas mittelineaarse optika süstemaatilise teooria 1960. aastail välja hollandi päritolu Ameerika füüsik Nicolaas Bloembergen, kes sai

selle eest Nobeli auhinna 1981. aastal. Varem oli puudunud piisavalt võimas ja n-ö puhas optiline laine, mille toimel tuleks esile ainete polarisatsiooni mittelineaarsus. Seepärast oli mittelineaarse optika kümneid efekte, sh optiline alaldamine, võimalik avastada pärast laseri leiutamist. Praegusajal on igaüks, kes on käes hoidnud rohelist kiirega laser- osutit, kasutanud tuntuimat mittelineaarse optika nähtust – teise harmoonilise genereerimist –, sest pointeris muudetakse väikese neodüümlaseri infrapunakiir sageduse kahekordistamise teel kristallitükis rohelisteks.

Agas enne kui akronüüm LASER sai pärast 1960. aastaid valdavaks, oli selle

Kvantmehaanika saab kokku mittelineaarse optikaga – ja ka lineaarsetega –, kui on vaja välja arvutada aine polarisatsiooni eri järku liikmed.

riistapuu nimetus „optiline kvantgeneeraator“. Kas seega pole kvantmehaanika geenid mittelineaarses optikas esindatud tugevamini, kui loo alguses sai väidetud? Nii ja naa... Ühelt poolt on monokromaatne laserivalgus nii lähedane kui võimalik – peaaegu eristamatult – klassikalise elektrodünaamika ettekujutustele võnkuvast elektromagnetväljast ning on praktiliselt sama puhas sinusoid nagu raadiolaine. Ent teiselt poolt pole laseri toimimise aluseks olev sundkiirgus võimalik klassikalises mudelis, kus laengud võnguvad mikroosakestest aines (muide, isegi siis mitte, kui need võnkumised kvantmehaanika kohaselt kvantiseerida). Sundkiirgus saab tekkida spetsiifiliselt paiknevate kvant-energiatasemete eri tõenäosustega asustamisel aines, aga diskreetsed energiatasemed on teadagi kvantmehaanika...

Senise kokkuvõtteks. Tavaliste valgustugevuste korral on aines tekkiv polarisatsioon lineaarne, uusi sagedusi väljundisse tekkida ei saa (jätame kõrvalvõlgu luminesentsi ja spontaanse hajumise)

mise, mida käsitletakse teistsuguses paradigmas). Mittelineaarses optikas aga saab, mis muu hulgas tähendab võimalust suruda valgusimpulss palju lühemaks, kui seda lubaks sisendimpulsi spektraalne koostis. Kvantmehaanika saab kokku mittelineaarse optikaga – ja ka lineaarsega –, kui on vaja *välja arvutada* aine polarisatsiooni eri järku liikmed. Veelgi enam tugevneb nende kahe teadusvaldkonna seos, kui me käsitleme suurema täpsuse ja süsteemsuse huvides ka valgust kvantväljana. Seega tuleb artikli alguse ketserlikku väidet pehmemdada.

Nüüd aga käsitleme mittelineaarse optika nähtust, kus kvantmehaanikat pole vaja mitte täpsuse pärast, vaid kus ta mängib nähtuse mõistmises põhimõtetel rolli. See on nn kõrgete harmooniliste ja atosekundiliste impulsside genereerimine. Asjaomaste eksperimentaalsete saavutuste eest said prantslased Pierre Agostini ja Anne L’Huillier ning ungari-saksa füüsik Ferenc Krausz eelmisel aastal Nobeli auhinna.

Juuresoleva infokasti potentsiaaligraafikute kohta tuleb märkida, et neil on üks puudus ja üks hea omadus. Puudus on tegelikkuses kolmemõõtmelises ruumis oleva potentsiaali kujutamine ainult ühest koordinaadist sõltuvana. Ent kui kolme ruumikoordinaati isegi kujutada kabinet-vm projektsiooni abil lehekülje tasandil, siis kuhu suunata neljas, volte näitav graafikutelg? Hea omadus on aga analoogia asukohapunkti kõrguse ja seeläbi raskusjõu potentsiaalse energiaga mägede ja orgudega maastikul. Seetõttu on kohe ilmselge, et joonisel (a) kujutatud elektron ei saa klassikalise mehaanika järgi lahkuda tuuma juurest üle potentsiaalimäe, sest tal ei jätku selleks energiat. Kvantmehaanika aga lubab tal teatava tõenäosusega potentsiaalibarjäärist läbi tungida. See nn tunneliefekt, mille avastas juba 1927. aastal Saksa füüsik Hermann Hund, kuulub kvantmehaanika raudvarasse ja seletub mikroosakeste laineomadustega. Ja loomulikult on kvantmehaanika see, mis joonisel (a) ei lase elektronil kukkuda tuuma põhjatusse potentsiaalauku, vaid hoiab ta energiatasemest olenevalt mingil keskmisel kaugusel tuumast. Edasise mõistmiseks joonisel (b) piisab aga klassikalisest elektrodünaamikast: muutunud suunaga elektrivälja kiirendab elektroni tuuma suunas ja sellel äkki

pidurdudes tekib nn pärsskiirgus (ingl *bremsstrahlung*; on tähelepanuväärne, et ingliskeelses füüsikas kasutatakse selle ja veel mõne termini saksakeelset kuju, justkui tunnustades Saksa füüsika liidriolli saja aasta taguses maailmas). Pärsskiirgus on muide põhiline röntgenikiirguse allikas meditsiiniaparatuuris, kus elektrone kiirendatakse makroskoopilise kõrgepingelise elektriväljaga.

Kuna laserikiire elektrivälja lainepikkus on palju suurem kui aatomite vahedkaugus gaasis, rääkimata vedelikest ja tahkistest, mida juba kasutataksegi asjaomasel eesmärgil, muudab elektrivälja märki korraga paljude aatomite asukohas ning tulemusena panustavad nad kõik pärsskiirguse impulssi. Infra-punalaseri elektrivälja võnkeperiood on mõne femtosekundi (10^{-15} s) suurusjärgus, niisiis kordub kogu protsess sama perioodiga ning tekib jada atosekundilisi (10^{-18} s) impulsse. Laserivälja sagedusega korduvus avaldub aga tekitatud kiirguse suure ulatusega spektris laserisageduse kõrgemate harmooniliste ehk ületoonide jadana, mis tuleneb juba üldistest signaalide sagedus- ja aegsitus (Fourier) seostest. Seega, kolme sammu mudel, mida nimetatakse ka poolklassikaliseks, sest sammud 2 ja 3 on mõistetatavad kvantmehaanikataagi, selgitab vaatlusaluse nähtuse vähemasti heas lähenduses ära.

Kui uurida joonist põhjalikumalt, võib järeldada: piisavalt tugeva laserivalguse korral moondub tuuma potentsiaal sedavõrd, et elektroni tuumast eemaldamiseks pole tunneliefekti vaja: laseri elektrivälja lihtsalt rebib ta toore jõuga tuumast eemale ja järgneval poolperioodil paiskab tagasi vastu tuuma. Kas sel juhul pole kvantmehaanikat vajagi? Jah, kuid esiteks, Nobeli auhinna vääriliste uurimuste tegemise ajal vähemasti nii võimsaid lasereid polnud. Teiseks, kas kvantmehaanikata ei kao ka protsessi ilu? Tegelikult n-ö korralikus kvantitatiivses käsitluses kirjeldatakse kogu protsessi läbinisti

**Peale mikroosakeste füüsika
sügavama mõistmise töötab
kõrgete harmooniliste
genereerimine ja manipuleeri-
mine atosekundiliste
impulssidega olla kasulik
uute materjalide ja ravimite
loomisel.**

kvantmehaanika aparaadi abil, ehkki laserivalguse kirjeldus on jäetud klassikaliseks. Kuid ainult seniks... Nimelt on tippajakirja Nature Physics oktoobri numbris ilmunud uurimus kõrgete harmooniliste ehk ületoonide genereerimisest Mg:LiNbO_3 kristallitükis, millele oli suunatud eriline valgusväli, nn ere muljutud vaakum (*brighth squeezed vacuum*). Me ei püüagi siinkohal avada selle sügavalt kvantoptikasse kuuluva termini sisu, kuid võtame teadmiseks, et sellise eksootilise valguse abil muutub kõrgete harmooniliste tekitamine oluliselt tõhusamaks.

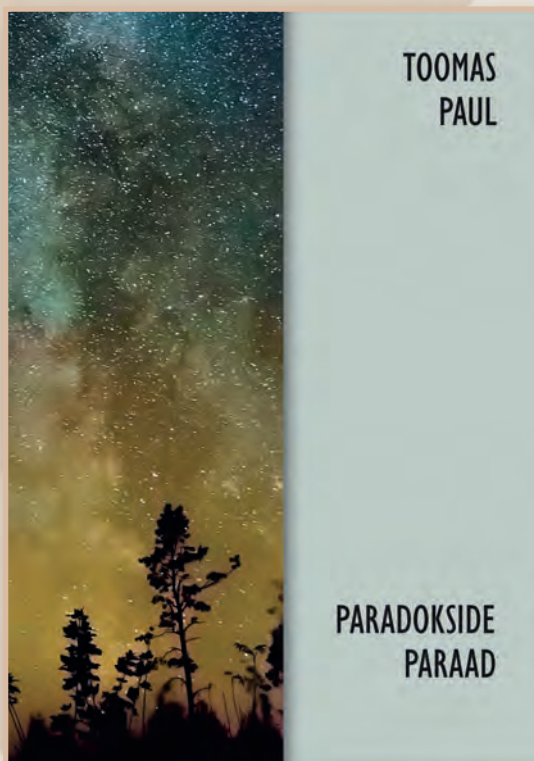
Milleks siis mõnekümne atosekundi kestusega impulsid head on? Olgu märgitud, et atosekund on nii lühike ajavahemik, et ühte sekundisse mahub neid umbes sama palju, kui on möödunud sekundeid universumi algusest. Atosekandid on atomaarne ajaskaala. Seega, niivõrd lühikesed impulsid annavad võimaluse vahetult jälgida ja uurida liikumisi aatomite sees ja molekulides. Peale mikroosakeste füüsika sügavama mõistmise töötab kõrgete harmooniliste genereerimine ja manipuleerimine atosekundiliste impulssidega olla kasulik uute materjalide ja ravimite loomisel, kui nimetada vaid mõnda kiiresti areneva atosekunditeaduse olulist praktilist rakendust.

Kvantmehaanika on matemaatilises mõttes küll lineaarne, kuid võib-olla tuleb temast mõelda mittelineaarselt? Teoreetilise füüsika korüfee Richard Feynman on kord pillanud lause: „Ma arvan, et võin julgelt öelda, et keegi ei mõista kvantmehaanikat.“ Kvantmehaanika alusepanijaid Niels Bohr on maininud: „Kui kvantmehaanika teid segadusse ei aja, pole te sellest tegelikult aru saanud.“

Jääb vaid tõdeda, et mittelineaarne optika ja kvantmehaanika pole üksteisele võõrad, vaid seda tihedamini põimuvad füüsikaharud, mida eksootilise- maid valgusvälju rakendatakse. Üldse, parafraseerides tuntud Murphy seadust „Kui see ei toimi, siis see on füüsika“, väidame lõpetuseks: „Kui se’s ei ole kvantmehaanikat, siis see pole füüsika.“

Peeter Saari (1945) on füüsik, Tartu ülikooli emeriitprofessor ning Eesti teaduste akadeemia ja Euroopa teaduste akadeemia liige. Üks tema uurimisvaldkondi on olnud füüsikaline optika.

KIRJASTUS ILMAMAA SOOVITAB



Toomas Paul
„Paradokside paraad.”
Toomas Pauli kirjutised Maalehes 2017–2023”
sari: Ilmatargad

Koostanud ja toimetanud: Mari Klein
Saatesõna: Rein Veidemann
Kujundanud: Mari Ainso
Ilmamaa 2024

Eesti esivaimuliku, teoloogi, õpetlase ja esseisti Toomas Pauli (sünd. 1939) ülesastumine esseistina ja veerukirjutajana algas „laulva revolutsiooni” aegu ning tema esseede ja kommentaaride arv läheneb nüüdseks kolmsaja piirile. „Paradokside paraad” koondab aastatel 2017–2024 Maalehes ilmunud kolmekümmet nelja esseed, olles omamoodi jätk 2018. aastal ilmunud raamatutele „Tõe lõpututel tagamaadel” (kirjutised aastatest 2008–2017) ja „Haihtunud hingede aeg” (aastatest 2000–2006). Toomas Paul kuulub nende eesti õpetlaste hulka, kelle sõnal on läbi aastakümnete olnud küllalt suunda näitavat valgust ning jõudu, et juhtida lugejaid ülesmäge vaimse ilma teedel. Autori sõnul: „Nii nagu otsese füüsilise aitamisega ja nõustamisega, nii on see viimselt ka vaimse aitamise ja nõustamisega, et see õnnestub vaid harva. Aga ehk on need harvad hetked, mida ise ära ei tunne või unustad – see oleks parim –, mis jäävad elatud elust alles. Ainsana.”

www.ilmamaa.ee
e-post: ilmamaa@ilmamaa.ee



Laurits Leedjärv
„Sada kosmilist etüüdi.”
Aastatel 2016–2024 Maalehes ilmunud lühilood”
sari: Ilmatargad

Toimetanud: Kristina Lepist
Kujundanud: Mari Ainso
Ilmamaa 2024

„Ilmatarkade” raamatusarjas on raamatukaante vahele pandud Laurits Leedjärve lood, mis varem on ilmunud „Maalehes”. Need hõlmavad nüüd üheskoos peaaegu kogu universumi kirjelduse. Autori pilk ja sulg ulatuvad raamatu seitsmes alajaotuses kodusest Päikesesüsteemist ja tähistaeva ilust kaugete eksootiliste maailmadeni, mustadest aukudest süvauniversumini. Sinna vahele mahub käputäis tähti, nipet-näpet ajast ja muust ning ka väikesest Eestist suures universumis. Need lood on nagu saja päeva peale laiali laotatud advendikalender, mida oleks kahju ühe õhtupoolikuga läbi lehitsedes raisata. Nii ütleb ka Tõnu Viik raamatu ümbrisel „Ma soovitan lugeda igal õhtul ühe loo ja järgmisel päeval või isegi nädalal mõtiskleda loetu üle.” Me ei tea, mitmekordselt on universumis tähti rohkem kui Maal liivaterasid. Sellest hoolimata arvab Laurits Leedjärv, et inimesel on privileeg olla universumi vaatleja, kes oma tillukesel koduplaneedil või seda ümbritsevas kosmoses suudab vastu võtta valguse osakesi vähemalt 13 miljardi valgusaasta kauguselt.

Ülijuhtivus, makroskoopiline kvantnähtus

TEET ÖRD

Juba üle saja aasta tagasi avastati ülijuhtivus: esimene makroskoopiline kvantfenomen, kus süsteemi kvantmehaanilised omadused ilmnevad atomaarsest palju suuremas mastaabis. Praeguseks on leitud veel mitu samalaadset nähtust. Ülijuhtivate materjalide järjest kasvav hulk koos nende omadustes avalduva väga eripalgelise füüsikaga on tinginud püsivalt suure huvi ülijuhtivuse vastu nii eksperimentaalses kui ka teoreetilises tahkisefüüsikas. Märkimist väärib asjaolu, et aja jooksul on selles valdkonnas antud Nobeli auhind kokku üheteistkümmele teadlasele.

JULIEN BOBROFF, FREDERIC BOUQUET, LPS / WIKIPEDIA



Püsिमagnet leviteerib –196 Celsiuse kraadini jahutatud kupraadist ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) ülijuhi kohal

Avastuslugu ja eksperimentaalsed tulemused

Määrav ülijuhtivuse avastamise eeldus oli madalate temperatuuride füüsika väljakujunemine, mis oli otseselt seotud edusammudega gaaside veeldamisel. Aastail 1877–1883 said Louis Paul Cailletet, Raoul-Pierre Pictet, Zygmunt Wróblewski ja Karol Olszewski temperatuuril 90,2 kelvinit (K) ehk –182,95 Celsiuse kraadi ($^{\circ}\text{C}$; temperatuurile 0 K vastab $-273,15^{\circ}\text{C}$) vedelat hapnikku, 1883 tekitasid Wróblewski ja Olszewski temperatuuril 77,4 K vedelat lämmastikku. 1898. aastal sai James Dewar temperatuuril 20,3 K omakorda vedelat vesinikku.

19. sajandi lõpus rajas Heike Kamerlingh Onnes Leideni ülikoolis krüogeenikalaboratooriumi, millest toona kujunes oma valdkonnas maailma juhtivaid uurimiskeskusi. 10. juulil 1908 vedati seal temperatuuril 4,2 K esimest korda heelium.

Seejärel seadis Kamerlingh Onnes sihi teha kindlaks ainete madalatemperatuurised omadused. Tema keskne huviobjekt oli metallide elektritakistuse käitumine olukorras, kus temperatuur läheneb absoluutsele nullile. Tol ajal oli tuntud kolm hüpoteesi. James Dewar oli veendunud, et takistus kahaneb mono-

Määrav ülijuhtivuse avastamise eeldus oli madalate temperatuuride füüsika väljakujunemine, mis oli otseselt seotud edusammudega gaaside veeldamisel.

toonselt koos temperatuuriga nullini. William Thomson seevastu oletas, et juhtivuselektronid hakkavad madala-temperatuurises piirkonnas „külumuma“, mille tõttu hakkab elektritakistus seal suurenema ning saab nulltemperatuuril lõpmata suureks. Augustus Matthiessen oli juba varem väitnud, et kahanev

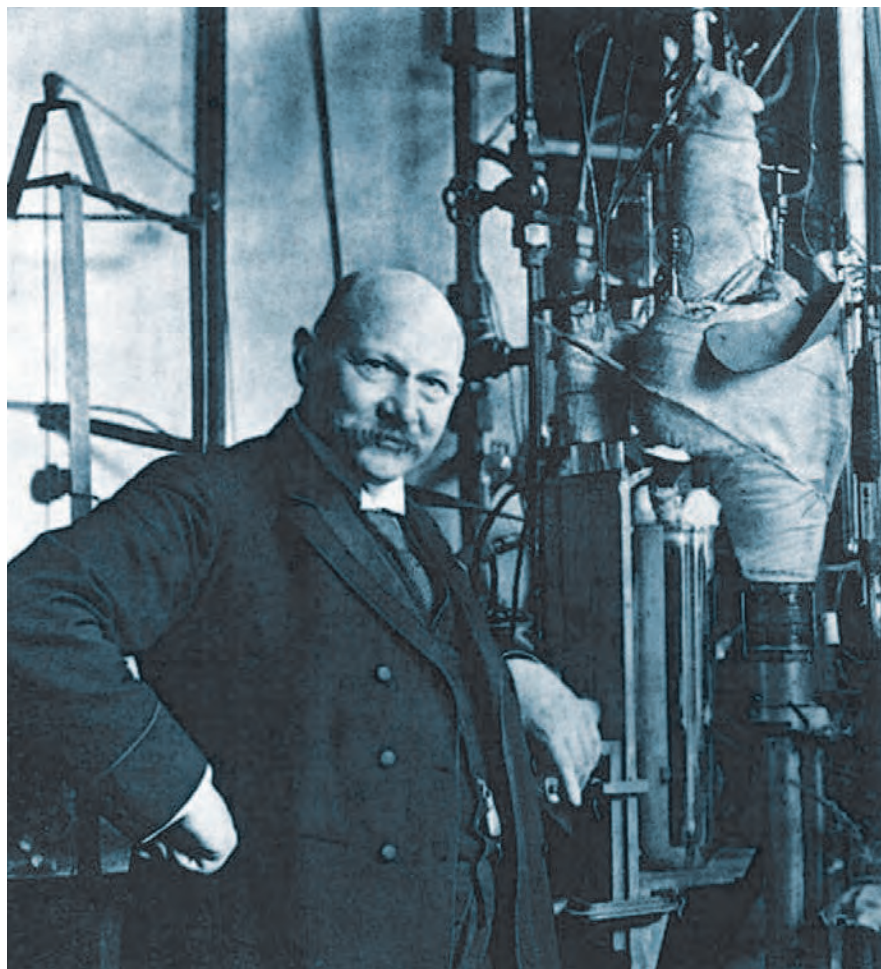
takistus stabiliseerub lõplikul väärtusel nullile lähedaste temperatuuride korral.

Elavhõbeda elektritakistuse temperatuurisõltuvuse mõõtmisel 1911. aastal saadi aga Kamerlingh Onnesi laboratooriumis täiesti ootamatu tulemus, mis ei olnud kooskõlas ühegi eelmainitud stsenaariumiga. Kui elav-

Omadus, mida valdavalt tuntakse Meissneri efektina, osutas sellele, et ülijuhtivus on palju keerukam nähtus kui lihtsalt elektritakistuse puudumine.

„Klassikaliste“ ülijuhtide avastamine

Aasta	Kriitiline temperatuur K	Keemiline ühend, kommentaarid
1911	4,154	Hg (Heike Kamerlingh Onnes avastas ülijuhtivuse)
1913	7,196	Pb (Heike Kamerlingh Onnes)
1932	9,25	Nb (kõrgeima kriitilise temperatuuriga keemiline element)
1932	11,5	NbC
1941	16,1	NbN
1953	17,1	V ₃ Si
1954	18,05	Nb ₃ Sn
1973	23,2	Nb ₃ Ge (kõrgeima kriitilise temperatuuriga „klassikaline“ ülijuht)

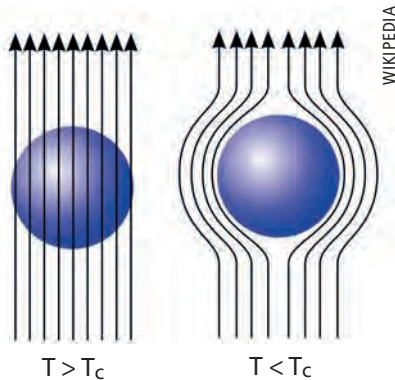


Ülijuhtivuse avastaja, hollandi füüsik Heike Kamerlingh Onnes Leideni ülikoolis oma laboratooriumis veeldamisaparaadi juures. 1913. aastal pälvis ta ülijuhtivuse avastamise eest Nobeli auhinna

hõbedat jahutati veidi allapoole heeliumi keemistemperatuuri, siis takistus kadus hüppeliselt. Pärast paljukordset kontrolli jõuti järeldusele, et on avastatud täiesti uus nähtus. Kamerlingh Onnesi enda sõnadega: „Seega on elavhõbe temperatuuril 4,2 K läinud uude olekusse, mida selle eriliste elektriliste omaduste tõttu võib nimetada ülijuhtivaks“. Järgmisel aastal tegi Kamerlingh Onnes kindlaks, et piisavalt tugev magnetväli taastab ülijuhtivas seisundis süsteemis lõpliku elektritakistuse, st ülijuhtivus seal kaob. Veel aasta hiljem registreeris ta ülemineku ülijuhtivasse olekusse pliiis. Ülijuhtivuse avastamine tõi Kamerlingh Onnesile 1913. aastal Nobeli auhinna.

Elektritakistuse puudumine juhul, kui temperatuur on väiksem kriitilisest temperatuurist T_C , jäi veidi üle kahekümneks aastaks ainsaks ülijuhtivust defineerivaks omaduseks. Alles 1933. aastal tegid Walther Meissner ja Robert Ochsenfeld kindlaks, et väline magnetväli tõrjutakse kriitilisest väiksema temperatuuri korral massiivsest ülijuhust välja, olenemata sellest, kas väli oli rakendatud enne või pärast sisenemist ülijuhtivasse olekusse. Kuni selle ajani arvati üldiselt, et magnetväli tungib ülijuhti ka allpool T_C -d ja lukustub seal pärast välja väljalülitamist, kui väli oli algul sisse lülitatud ülalpool T_C -d.

Niisugune käitumine järeldub ideaalsest elektrijuhtivusest. Leitud omadus, mida valdavalt tuntakse Meissneri efektina, osutas sellele, et ülijuhtivus on palju keerukam nähtus kui lihtsalt elektritakistuse puudumine. Mõnes mõttes võib Meissneri efekti pidada ideaalsest juhtivusest isegi fundamentalsemaks omaduseks. Ühtlasi sai selgeks, et ülijuhtivat olekut saab kirjeldada tasakaalulise termodünaamika kaudu, kuna efekti ilmumine ei sõltunud eksperimendi etappide ajalisest järgnevusest. Meissneri efekti on võimalik jälgida juhul, kui magnetvälja tugevus on väiksem kriitilisest väärtusest, mis sõltub temperatuurist. Kui välja tugevus ületab kriitilise väärtuse, siis ülijuhtivus kaob.



Meissneri efektina tuntud nähtus seisneb selles, et alla oma kriitilist temperatuuri jahutatud ülijuhist (joonisel parempoolne katsekeha) tõrjutakse üleminekul ülijuhtivasse olekusse magnetväli täielikult välja. Magnetvälja jõujooned on skeemil kujutatud nooltena. Vasakpoolse katsekeha temperatuur on üle kriitilise temperatuuri. Efekti avastasid 1933. aastal Saksamaa füüsikud Walther Meissner ja Robert Ochsenfeld, mõõtes magnetvälja ülijuhtivate tinast ja pliiist kehade lähedal. Detaile jahutati nende ülijuhiks muutumise temperatuurist allapoole ja seejärel mõõdeti magnetvälja muutusi. Ülijuhiks muutumise järel kadus kehade magnetväli. Teadlased avastasid niisuguse efekti kaudselt, selle järgi, et väljaspool katsekehi magnetväli tugevnes. Selle katsega näidati esimest korda, et ülijuhikud on midagi enam kui täiuslikud elektri-juhikud. Meissneri efekt on ainulaadne omadus, mille järgi saab ülijuhte ära tunda

Fenomenoloogilised arengud

Esimese Meissneri efekti kirjeldava teooria esitasid vennad Fritz ja Heinz London 1935. aastal. Selles fenomenoloogilises skeemis on kesksel kohal Londoni-Londoni võrrand, millest koos Maxwelli võrranditega järeldub, et välises magnetväljas paikneva massiivse ülijuhi sees magnetväli puudub. Väli on vaid õhukeses pinnakihis, kus see kiiresti kahaneb, kui liikuda ülijuhi pinnalt tema sisemusse (seda iseloomustab sissetungimissügavus). Magnetvälja väljatõrjumist põhjustab varjestav vool ülijuhi pinnal, mis tekib välises väljas ning mille enda tekitatud magnetväli kompenseerib välist välja ülijuhi sisemuses.

Järgmine väga otsustav samm ülijuhtiva oleku füüsika mõistmisel oli 1950. aastal avaldatud Ginzburgi-Landau fenomenoloogiline teooria. See lähtus Landau teist liiki faasisiirete teo-

riast, kus aga kompleksarvulise korrastusparameetri osa täidab ülijuhtivate elektronide süsteemi kui terviku (kondensaadi) lainefunktsioon, millele on kehtestatud spetsiifiline normeerimistingimus. Ülijuhtivust iseloomustatakse niimoodi ühe lainefunktsiooniga, kuna tegemist on makroskoopilise kvantolekuga. Dissipatsioonivaba voolu võimalikkuse tagab see, et kondensaadis oleva elektroni seisundi muutmisega peaks kaasnema väga suure arvu kõigi sinna kuuluvate elektronide seisundi samaeagne muutmine, aga selle tõenäosus on väga väike.

Ginzburgi-Landau teooria kirjeldab detailset ülijuhtide magnetilisi omadusi. Muu hulgas järeldub sellest Londoni-Londoni võrrand ja seega ka Meissneri efekti olemasolu. Teoorias ilmub kaks temperatuurist sõltuvat pikkuskaalat: magnetvälja sissetungimissügavus ja koherentsuspikkus. Need iseloomustavad vastavalt magnetvälja ja kondensaadi lainefunktsiooni võimaliku muutumise ulatust ruumis. Lähtudes nende pikkuskaalade vahekorra, õnnestus Aleksei Abrikosovil 1957. aastal eristada esimest ja teist liiki ülijuhte. Allpool kriitilist temperatuuri on nende käitumine välises magnetväljas täiesti erinev. Esimest liiki ülijuhtides realiseerub magnetväljas, mis on väiksem kriitilisest, Meissneri efekt. Teist liiki ülijuhte iseloomustab kaks kriitilist magnetvälja. Allpool väiksemat kriitilist välja on olemas Meissneri efekt. Väiksema ja suurema kriitilise välja vahele jääb aga nn seguseisund, kus väline magnetväli tungib ülijuhti niidikujuste ruumipiirkondadena. Katseliselt tegi teist liiki ülijuhtide olemasolu kindlaks Lev Šubnikov koos kaastöötajatega juba 1935. aastal.

Kvantefektid makroskoopilisel tasemel

Kvantmehaanikast järeldub, et suurused, nagu energia, impulss ja impulsmoment, võivad kindlatel tingimustel omandada ainult diskreetseid väärtusi. Aastakümneid oldi arvamisel, et selline kvantiseeritus avaldub üksnes mikroskoopiliste objektide korral. Praeguseks on hästi teada, et nii kvantiseeritus kui ka kvantnähtused üldisemalt ilmnevad näiteks ülijuhtivuses ka makroskoopilisel tasemel.

Kuna ülijuhtivad elektronid on tugevalt korreleeritud, moodustades kondensaadi, ei saa voolu tugevus ülijuhtivas rõngas olla suvaline, vaid peab

muutuma hüppeliselt. Selle põhjal osutub voolu tekitatud magnetvälja voog läbi rõnga, mis on makroskoopiline suurus, kvantiseerituks. Magnetvoo kvant avaldub Plancki konstandi ja elektroni laengu kaudu, mis võimaldab voo mõõtmise abil määrata makroskoopilisel tasemel Plancki konstanti. Efekti ennustas Fritz London aastal 1950 ning katseliselt avastati see 1961. aastal ühel ajal USA-s ja Saksamaal.

1962. aastal näitas Brian Josephson teoreetiliselt kahe uue ülijuhtivusega seotud makroskoopilise kvantefekti võimalikkust. Need on statsionaarne ja mittestatsionaarne Josephsoni efekt. Eksperimentaalne kinnitus saadi juba järgmisel aastal. Efektid realiseeruvad Josephsoni kontaktil, kus kaks ülijuhti on eraldatud õhukese mitteülijuhtivast materjalist barjääriga. Statsionaarses Josephsoni efektis läbib kontakti, millel puudub pinge, ülijuhtiv alalisvool. Nullist suurema pinge korral tekib aga seal ülijuhtiv vahelduvvool ning tegu on mittestatsionaarse Josephsoni efektiga. Kontakti läbiva ülijuhtiva voolu teket saab mõista, pidades silmas, et kogu süsteemi kirjeldab ühine kondensaadi lainefunktsioon. Selle voolu tugevus oleb kahel pool kontakti asuvate kondensaatide lainefunktsioonide faaside vahest.

Sümmeetria rikkumine

Üleminek normaalseisundist ülijuhtivasse toimub teist liiki faasisiirdena. Kõige üldisemalt tekib faasisiirde käigus mingi kaugkorrastruktuur, kuna spontaanselt rikutakse vastavat sümmeetriat. Näiteks siirdumisel vedelast olekust kristalliliselt rikutakse aines pidevat nihkesümmeetriat. Ferromagneetiline kaugkorrastruktuur ilmub, kui rikutakse pöördümmeetriat, mille tõttu üks ruumisuund aines muutub eelistatumaks.

Ginzburgi-Landau fenomenoloogilise teooria lähtekoht on kalibratsiooni-teisenduste suhtes muutumatuks jääv vabaenergia funktsionaal. Kalibratsiooni-teisendus on siin ülijuhtivuse komplekse korrastusparameetri (kondensaadi lainefunktsiooni) faasile suvalise reaalse panuse lisamine koos vastava elektromagnetvälja vektorpotentsiaali teisendusega. Üleminekul ülijuhtivasse seisundisse kondensaadi lainefunktsiooni faas aga lukustub, st spontaanselt rikutakse kalibratsiooni-sümmeetriat. Teatud määral sarnaneb see pöördümmeetria rikkumisega mag-

neetikutes, kus nullist erinev magneetumus on orienteeritud kindlas suunas.

Kalibratsioonisümmeetria rikumine ülijuhtivas faasis annab tõlgenduse Meissneri efektile. Sümmeetria rikumise tõttu osutub footoni seisumass ülijuhtis nullist erinevaks. See põhjustabki Meissneri efektis magnetvälja väljatõrjumise. Niisugune footoni lõpliku massi ilmumine sarnaneb elementaarosakeste füüsikas nn Higgsi mehhanismiga, mille kaudu teatud osakesed saavad massi.

Ülijuhtivuse Bardeeni-Cooperi-Schriefferi mikroskoopiline mehhanism

1957 ehk alles 46 aastat pärast Kamerlingh Onnesi avastust formuleerisid John Bardeen, Leon Cooper ja John Robert Schrieffer ülijuhtivuse kohta esimese mikroskoopilise teooria, nn BCS-teooria. See teooria andis nähtusele selge seletuse, mis tugines vastassuunaliste impulsside ja spinnidega elektronide paardumisele, mida põhjustab Fermi pinna läheduses elektronide ja kristallivõre võnkumiste vaheline vastastikmõju (elektroni-foononi interaktsioon). Need paardunud elektronid ehk Cooperi paarid moodustavad ülijuhtiva kondensaadi. Kristallivõre võnkumiste ehk foononite vahendatud elektroni-elektroni vastastikmõju tulemusena tekib ülijuhtivas faasis süsteemi üheelektroonses energiaspektris Fermi pinnal eksperimentaalselt jälgitav ülijuhtivuspilu. Selle kahekordne väärtus annab energia, mida tuleb kulutada Cooperi paari lõhkumiseks.

BCS-mudel on üks elegantsemaid ja edukamaid teooriaid tahkisefüüsikas. Koos edasiarendustega on see võimaldanud seletada paljude ülijuhtide omadusi. 1959. aastal näitas Lev Gorkov, kuidas BCS-teooriast järeldub Ginzburgi-Landau fenomenoloogiline teooria.

Kõrgtemperatuurne ülijuhtivus

Kõrgtemperatuurseteks nimetatakse ülijuhte, mille kriitiline temperatuur on suurem kui 30 K. See piir ületati 1986. aastal, kui Johannes Georg Bednorz ja Karl Alexander Müller avastasid esimese kupraatülijuhi $\text{La}_{1,85}\text{Ba}_{0,15}\text{CuO}_4$. Peagi lisandus arvukalt teisi samasse perekonda kuuluvaid süsteeme.

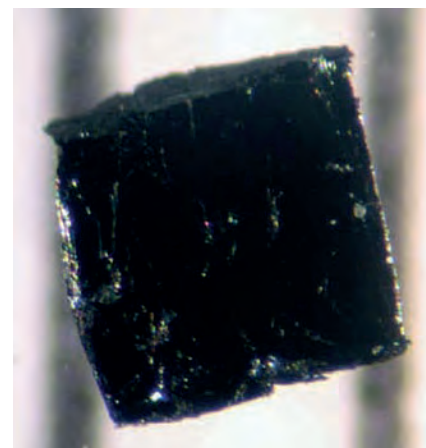
Ilma takistuseta elektrivoolu ülekanne on kõige menukam ülijuhtide potentsiaalne kasutusala. Praeguseks loodud ülijuhtkaablite abil on rajatud kuni ühe kilomeetri pikkusi liine.

Kõrgtemperatuursete ülijuhtide avastamine

Aasta	Kriitiline temperatuur K	Keemiline ühend, kommentaarid
1986	35	$\text{La}_{1,85}\text{Ba}_{0,15}\text{CuO}_4$ (avastati kõrgtemperatuurne ülijuhtivus) Johann Georg Bednorz, Karl Alexander Müller
1987	93	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (ületati vedela lämmastiku temperatuur)
1988	125	$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$
1991	33	$\text{RbCs}_2\text{C}_{60}$
1993	133	$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$
1994	164	$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ (30 GPa rõhu all)
1995	138	$\text{Hg}_{0,8}\text{Tl}_{0,2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8,33}$ (kõrgeim kriitiline temperatuur normaalrõhu all)
2001	39	MgB_2
2009	38	Cs_3C_{60} (0,7 GPa rõhu all)
2009	54	$\text{SmO}_{0,8}\text{F}_{0,2}\text{FeAs}$
2013	65	FeSe kiht SrTiO_3 substraadil
2015	203	H_2S , mis on transformeerunud H_2S (155 GPa rõhu all)
2019	250	LaH_{10} (170 GPa rõhu all)

Nendes struktuurides on ülijuhtivuse jaoks otsustava tähtsusega vase- ja hapnikuioonidest moodustunud tasandid. Järgnevalt leiti ootamatult ülijuhtivus (seejuures kõrgtemperatuurne) fulleriidides ($\text{RbCs}_2\text{C}_{60}$, Cs_3C_{60} jt). C_{60} klastritest moodustunud kuubiline kristall on isolator, mis muutub aga elektrijuhiks, kui sinna viia sisse leelismetalli aatomid. Kui 2001. aastal avastati ülijuhtiv faasisiire MgB_2 -s temperatuuril 39 K, siis loodeti, et boriidide hulgas võib olla teisigi kõrge T_C -ga ühendeid. Paraku need lootused ei täitunud. Küll aga avastati 2008. aastal raua põhinevate ülijuhtide perekond ($\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$, $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$, FeSe jt), mille arvukatest liikmetest liigituvad paljud kõrgtemperatuurseteks, kuid on siiski madalama T_C -ga kui kupraadid.

Viimased kümmekond aastat on tähelepanu keskmes püsinud hüdriidülijuhid, kus väga kõrge rõhu all on saavutatud LaH_{10} korral seni maksimaalne kriitiline temperatuur 250 K. Loodeatakse, et hüdriidid, aga ka laiemalt vesiniksidemega süsteemid, annavad võimaluse realiseerida ülijuhtivus toatemperatuuril, kuigi senised tulemused on seotud rohkem kõrge rõhu rakendamisega.



Kõrgtemperatuurse ülijuhi Bi-2223 (vismuti strontsiumkaltsium-vaskoksiid) tükike

JAMES SIEZAK / WIKIPEDIA

Ebatavalised ülijuhid

Ebatavaliste ülijuhtide all mõeldakse materjale, mille omadusi ei saa seletada BCS-teooria ega selle edasiarenduste kaudu. Nende hulka kuuluvad kõrgtemperatuursetest ülijuhtidest eelkõige kupraadid ja raua põhinevad ühendid. Samas hüdriide käsitletakse pigem tavalist ülijuhtide paradigmas. Olulisemad näited madala T_C -ga ebatavaliste ülijuhtide kohta on Sr_2RuO_4 , raskete fermionidega metallid (UPt_3 , URhGe jt) ja orgaanilised ülijuhid.

BCS-mudeli otsene üldistus juhuks, kus ülijuhtivuse tekkes osaleb mitu elektrontsoon, pakuti juba 1959. aastal. Nüüdseks on omaks võetud arusaam, et



SARUNO HIROBANO / WIKIPEDIA

Üks ülijuhtivusel põhineva tehnoloogia tuntumaid näiteid on magnethõljukrong. Pildil on Jaapanis Yamanashi katserajal kihutav magnethõljukrong L0 Series. 2015. aasta aprillis püstitas see rongide sõidukiiruse maailmarekordi 603 km/h

mitmetsooniline ülijuhtivus ei ole midagi erandlikku. Need on süsteemid, kus allpool kriitilist temperatuuri avaneb mitme Fermi pinna olemasolu tõttu mitu ülijuhtivuspilu. Ülijuhtiva faasi mitmekomponendiline iseloom on tehtud kindlaks (või on seda vähemalt oletatud) sellistes ühendites nagu NbSe_2 , V_3Si , Nb-legeeritud SrTiO_3 , FeSe_{1-x} , Sr_2RuO_4 , MgB_2 , kupraadid jt.

Tehnoloogilised rakendused

Ülijuhtide ainulaadsed omadused on paljude rakenduste alus. Samas on tulnud ületada mitmesuguseid tehnilisi raskusi, mis tekivad vajadusest tegutseda madalatemperatuursetes piirkonnas ja praktika seisukohast ebamugavate füüsikaliste omaduste pärast näiteks kupraat-ülijuhtides.

Ilma takistusega elektrivoolu ülekannet on kõige menukam ülijuhtide potentsiaalne kasutusala, kuigi vahelduvvoolu korral on siin võimalikud mõningad energiakaod. Niisugused elektriliinid on majanduslikult tasuvad, kui dissipationivabast ülekandest saadav otsene kasu ületab kulutused, mis tuleb teha, et saavutada ülijuhtivuseks vajalik madal temperatuur ja seda hoida. Praeguseks loodud ülijuhtkaablite abil on rajatud kuni ühe kilomeetri pikkusi liine.

Selleks et kaitsta elektriliine ja nende ühendatud seadmeid järskudest voolutõusudest, näiteks lühisest tingitud

kahjustuste eest, kasutatakse rikkevoolu piirajaid. Ülijuhtivate rikkevoolu piirajate tööprintsip tugineb ühele ülijuhtivuse põhiomadusele: kui voolu tugevus ülijuhtivas süsteemis ületab kriitilise piiri, siis toimub hüppeline üleminek nulltakistusega olekust suure elektritakistusega normaalseisundisse. Seda tüüpi piirajad on kasutuses, kuid mitte hulgaliselt.

Tehnoloogiad, mis põhinevad ülijuhtivusel – eriti kõrgtemperatuurset ülijuhtivusel – on loonud uusi tehnilisi võimalusi arendada niisuguseid masinaid, mille tööpõhimõte tugineb magnetlevitatsioonile. Üldtuntud on näiteks magnethõljukrong. Selle hõõrdevaba liikumise tagab väga tugev magnetväli, mida ülijuhte mittekasutatavate insenerilahenduste kõrval saab tekitada ülijuhtiva voolu abil. Suure maksumuse tõttu pole niisugused rongid, mis liiguvad kiirusega 500 km/h, veel laiemalt levinud. Magnetlevitatsiooni rakendatakse ka magnetlaagrites, et vähendada hõõrdumist generaatorites ja elektrimootorites, aga ka hooratta energia-salvestites.

Ülijuhtival voolul töötavad elektromagnetid võimaldavad tekitada kümnete tesladeni ulatuvaid ülitugevaid magnetvälju, sest ei ole välja tekitava

voolu tugevuse piirangut, mis tuleneb juhtmete sulamisest. Sellised magnetid on asendamatud füüsika ja keemia eksperimentaaluuringutes, meditsiinis (magnetresonantstomograafia), osakeste kiirendites jm. Samuti saab ülijuhtiva pooli abil, kui temperatuur on väiksem kriitilisest, salvestada magnetvälja energiat, kuna poolis tekitatud takistusevaba vool ja selle magnetväli ajas ei muutu. Selle tähtis rakendus on elektrienergia ülekande stabiliseerimine.

Ülijuhtidel põhinevate elektroonikaseadmete füüsikas on kesksel kohal Josephsoni efekt. Ülijuhtiv kvantinterferomeeter on olemuselt kontuur, mis sisaldab ühte või mitut Josephsoni kontakti. Niisugune süsteem on ülimalt tundlik magnetvälja suhtes ning võimaldab teha suure täpsusega mõõtmisi ja registreerida väga nõrku väljasid. Seda tehnoloogiat saab kasutada meditsiinis (näiteks uurida aju ja südame magnet-signaale), aga ka geofüüsikas, arheoloogias, materjaliuuringutes jm. Samuti on ülijuhtielektronika perspektiivne kvantarvutite arendamises. •

Teet Örd (1954) on füüsik, Tartu ülikooli emeriitprofessor. Teadustöös keskendunud peamiselt kondensaine teooriale, struktuursetele faasiiretele, ülijuhtivuse teooriale ja stohhastilistele protsessidele.

NÄITUS

NÄHTAMATU TARTU

800 AASTAT
LINNA
ALGUSEST



Haridusprogrammid II ja III kooliastmele ja gümnaasiumile:

Kuidas näha ja kirjutada ajalugu?
Kuidas näha nähtamatut keskaega?

Tellides korraga kolm haridusprogrammi, on kolmas programm tasuta!
Lisateave ja tellimine: muuseum@ut.ee

Tartu Ülikooli muuseum
Lossi 25, Tartu

muuseum.ut.ee



TARTU LINNAAJALOO
MUUSEUMID
Tartu City History Museums



TARTU ÜLIKOOL
ajaloo ja arheoloogia
instituut

TARTU



Tartu
2024



MUINSUSKAITSEAMET



Eesti
Teadusagentuur



TARTU ÜLIKOOL
muuseum

Rändlindude kompassi töö põhineb kvantmehaanikal

ÜLAR ALLAS

Esmapilgul näib kvantmehaanika kuuluvat hoopis teise maailma kui bioloogia. Ent ilmneb, et nii mõndagi protsessi organismis suudetakse paremini mõista, kui neid kirjeldada kvantteooria alusel. Asjaomast teadusharu nimetatakse kvantbioloogiaks. Üks põnevaim kvantbioloogia uurimisteema on lindude ränne. Nimelt on selgunud, et rändlinnud juhinduvad rändel Maa magnetväljast ja rakendavad kvantmehaanikat.



Vöotsaba-viglele kuulub rändelennu rekord

Lindude ränne on imelisemaid looduse vaatamänge. Mitut liiki linnud lendavad igal aastal tuhandete kilomeetrite kaugusel paiknevatele pesitsus- ja talvitusalaadele, ilmutades sealjuures hämmastavat täpsust. Lennurekord kuulub viiekuusele vöotsaba-viglele, kes 2022. aastal lendas 11 päevaga Alaskalt Lõuna-Austraaliasse, läbides peatusteta 13 560 km.

Teadlased on pikka aega püüdnud lindude uskumatu navigeerimisoskuse tagamaid mõista. Selgub, et lindude käsutuses on mitu kompassi. Üks neist vaatleb päikese asukohta, teine jälgib tähtede mustreid öötaevas ja kolmas juhindub Maa pinnavormidest. Kõige müstilisem kompass põhineb magnet-

retseptsioonil ehk võimel tajuda Maa magnetvälja. See tähendab, et linnud justkui näevad magnetvälja jooni ning kasutavad seda teavet, leidmaks rändtee mandrite ja ookeanide vahel.

Vana teooria

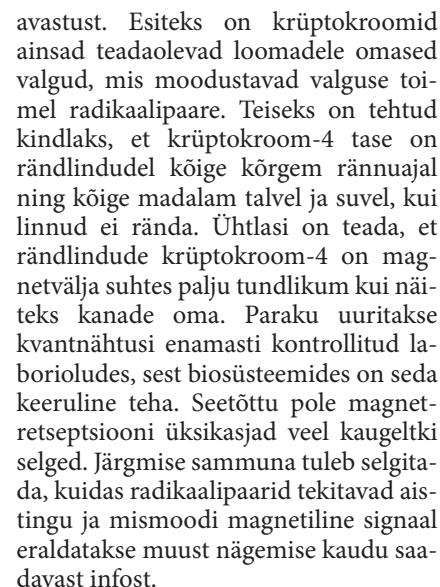
Hüpotees, et linnud võivad rändel juhinduda magnetväljast, sündis juba 19. sajandil. Esimesena kirjutas sellest 1859. aastal baltisaksa-eesti päritolu zooloog Alexander Theodor von Middendorff. 1960. aastatel leiti esimesed tõendid selle kohta, et punarinnad ja teisedki linnuliigid kasutavad tõepoolest orienteerumisel magnetvälja, kuid nähtuse mehhanism jäi arusaamatuks. 1978. aastal oletas saksa füüsik Klaus

Schulten, et magnetväli võib mõjutada mõningaid lindude silmades toimuvaid keemilisi reaktsioone. Ideesse suhtuti esialgu umbusuga, kuna Maa magnetväli on väga nõrk ja oli raske uskuda, et see suudab molekulidele mõju avaldada. Kuid Schulten sai innustust 10 aastat varem esitatud teooriast, mis kirjeldab radikaalide, lühiajaliste keemiliste vaheühendite käitumist. Radikaalid on molekulid, mis on kaotanud või omandanud elektroni. Paardumata elektroni tõttu muutuvad sellised molekulid magnetvälja suhtes tundlikuks.

2000. aastal esitas Klaus Schulten koos kolleegidega rändlindude magnetkompassi mudeli. Selle järgi etendab magnetretseptsioonis võtmerolli rändlindude silma võrkkestas asuv valk krüptokroom-4. Samasse klassi kuuluvad valke leidub ka taimedel, putukatel, kaladel ja inimesel. Krüptokroomid on seotud mitmesuguste ülesannetega, näiteks juhivad valgusest olenevat taimede kasvu ning reguleerivad une- ja ärkvelolekutsüklit. Nagu teisedki valgud koosneb krüptokroom-4 aminohapete ahelatest, mis on kokku volditud keerukaks struktuuriks. Valgu keskel peitub flaviinadeniindinukleotiidi (FAD) molekul ja sellest paari nanomeetri kaugusel paikneb aminohape trüptofaan.

Lindude käsutuses on mitu kompassi. Üks neist vaatleb päikese asukohta, teine jälgib tähtede mustreid öötaevas ja kolmas juhindub Maa pinnavormidest. Kõige müstilisem kompass põhineb magnetretseptsioonil ehk võimel tajuda Maa magnetvälja.

ANDREAS TREPTE, WWW.AVI-FAUNA.INFO



Inimesed on magnetkompassi abil ilmakaari määranud ligi 2000 aastat. Kui Maa magnetpoolused pöörduksid, osutaks magnetkompassi punane ots põhja asemel lõunasse. Lindude rännet Maa magnetvälja pöördumine ei mõjutaks, sest nende kompass jälgib magnetvälja telge ja nurka, mille see maapinnaga moodustab. Ka mobiilsidevõrgud ei häiri linde, kuna seal kasutatavad sagedused on orienteerumismeele mõjutamiseks liiga kõrged. Küll aga segavad lindude suunataju raadio- ja telenalained ning linnade öine valgusreostus.

Kuigi linnu aju on vaid mõne grammi raskune, on see ometigi piisavalt keeruline, et rakendada kvantnähtusi, mille mõistmiseks kulub inimajudel tuhandeid aastaid. Lindude kvantkompass illustreerib füüsika ja bioloogia omavahelist seotust ning rõhutab erialadevaheliste uuringute tähtsust. Üha enam andmeid kinnitab, et kvantmehaanika põhimõtted etendavad elu protsessides seni arvatust märksa tähtsamat osa. Lindudel avastatud mehhanismid võivad anda inspiratsiooni, loomaks uut tüüpi navigatsioonivahendeid. Ühtlasi võib kvantbioloogia nähtuste uurimine aidata arendada kvantsenso-reid ja teisi tehnoloogiaid, mis järgivad looduse enda loomingu. •

Mudeli järgi käivitab rändlindude navigatsioonimehhanismi sinine valgus. Kui krüptokroom neelab valguse footoni, vallandub reaktsioonide ahel, mille tulemusel tekib trüptofaani ja FADi elektronide osalusel radikaalide paar. Elektronid käituvad selles ühendis nagu imepisikesed magnetid. Nende olekut

iseloomustab spinn, mis võib olla paral-
leelne või antiparalleelne. Kui radikaali-
de paar moodustub, on spinn alguses
alati antiparalleelne, kuid edaspidi vön-
gub see miljoneid kordi sekundis kahe
väärtuse vahel. Mõlema spinni korral
võib FAD siduda vesinikiooni, mille
tõttu krüptokroom aktiveerub ja ajusse
edastatakse vastav signaal. Antiparal-
leelse spinniga radikaalipaar võib ka
laguneda ning sel juhul signaali ei edas-
tata. See, milline spinni väärtus domi-
neerib ja kui palju krüptokroomid sig-
naale luua jõuavad, oleneb linnu asen-
dist magnetvälja suhtes.

Ülar Allas (1977) on molekulaarbioloog, Tartu ülikooli arvutiteaduse instituudi teadusarvutuskeskuse konsultant. Doktoritöös uurinud antibiootikumide toimemehhanisme ja antibiootikumiresistentsust. Teinud koostööd 2017. aasta Nobeli keemiaauhinna laureadi Joachim Frankiga. Tundud ka kui DJ Smaddy.

Kvantmagnetism avab tee uutele tehnoloogiatele

RAIVO STERN

Kvantmagnetismis saavad kokku kvantmehaanika ja magnetism. See teadusvaldkond uurib materjalide magnetilisi omadusi, mille tähtis osa on kvantefektid. Klassikalisest magnetismist arenenud distsipliin on võimaldanud kvantmehaanikat hõlmates avastada uusi magnetfaase ja ebaharilikke kvantolekuid. Mõnes mõttes on tegu „topeltkvantiseerimisega“, sest kvantfüüsikat appi võtmata ei õnnestu kuidagi lõpuni ära seletada ka klassikalist magnetismi. Hiljutised edusammud kvantmagnetismi vallas on tunduvalt parandanud meie arusaamist materjalide kummalistest omadustest, avades ukse uuenduslikele tehnoloogilistele rakendustele. Muu hulgas analüüsitakse kvantspinnide (peamiselt elektronspinnide, aga mingil tasandil ka aatomi tuumaspinnide) vastastikmõju eri materjalides. Spinni ja selle avaldumiste käsitletus ning klassikalise magnetismi ülevaade jääb siinsest artiklist välja. Spinnide vastastikused mõjutused ehk nende vastastikmõjud võivad ilmneda ainulaadsetel viisidel, mida mõjutavad nii materjali struktuuriomadused kui kindlasti ka keskkonnategurid. Proovime siin näidata, kuidas need nn kvantkäitumised aitavad luua uusi võimalusi tehnoloogias ja teaduses.

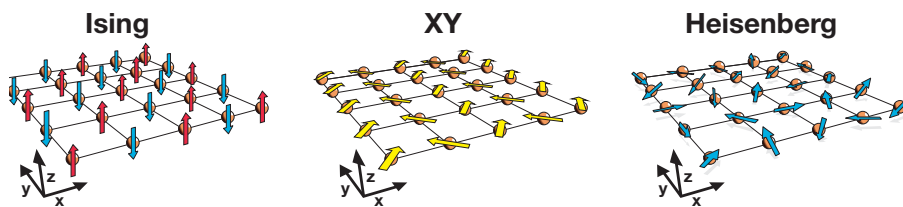


VIDA PRESS / ALAMY

Magnetilisi nähtusi on uuritud iidsetest aegadest, kuna looduslikke magneeditud materjale, nagu magnetiit (Fe_3O_4 , ingl *lodestone*), osati tähele panna juba varakult. 19. sajandil löid André-Marie Ampère ja James Clerk Maxwell klassikalised teooriad, kus on esitatud empiirilised makroskoopilised põhiseisukohad magnetnähtuste kohta. Ent kvantmehaanika areeniletulek 20. sajandi alguses muutis meie arusaama mikrokoopilisel tasandil. Kvantteooria tutvustas spinni mõistet: elektronide põhiomadust, mis annab ühe koostisosa materjali summaarsele magnetmomendile. Selle arengu kaudu töötati välja kvantmagnetism, mis keskendub spinnide käitumisele ja vastastikmõjudele eri materjalides. Valdconnas on tehtud märkimisväärsed saavutusi, sealhulgas on avastatud nn kvant-Halli efekt ja kõrgtemperatuurne ülijuhtivus. Mõlemad on sügavalt seotud kvantmagnetiliste nähtustega. Need avastused on avardanud meie arusaama ning toonud esile kvantmagnetsüsteemide keerukuse ja rikkuse, ärgitades uurima veel keerulisemaid materjale ja nähtusi. Eelkõige ajendatuna kõrgtemperatuurse ülijuhtivuse probleemi lahenduste otsingutest, on mitmesuguste magnetiliste korrastruktuuride (nn spinn-vedelikud, frustreeritud spinn-korrad, orbitaalne korrastruktuur jpt) uurimisest saanud tahke keha füüsika tähtis uurimisvaldkond.

Kvantmagnetismi põhimõtted

Kvantmagnetismi juhivad materjalis leiduvate kvantspinnide vahelised vastasmõjud, mis põhjustavad mitmesuguseid magnetilisi faase, nagu ferromagnetism, antiferromagnetism ja spinn-vedelikud. Kvantpõimumine ja superpositsioon etendavad selles ülisuurt osa, hõlbustades niisuguseid nähtusi nagu kvant-tunneleerumine ja spinnkoherents. Peamised teoreetilised mudelid, sealhulgas Isingi ja Heisenbergi mudelid, kirjeldavad neid spinn-interaktsioone ja aitavad ennustada magnetilist käitumist eri temperatuuridel ja välistingimustel (rakendatud rõhk või magnetväli).



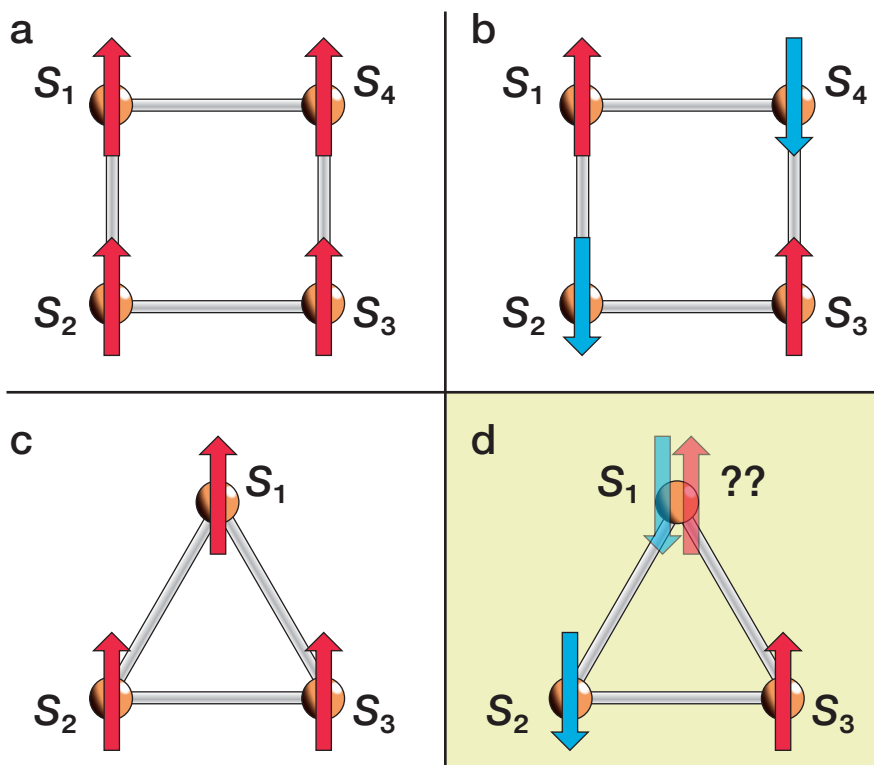
Ruutvõre spinnimängud

Elektronide spinnid võivad eri materjalides olla mõningates suundades piiratud.

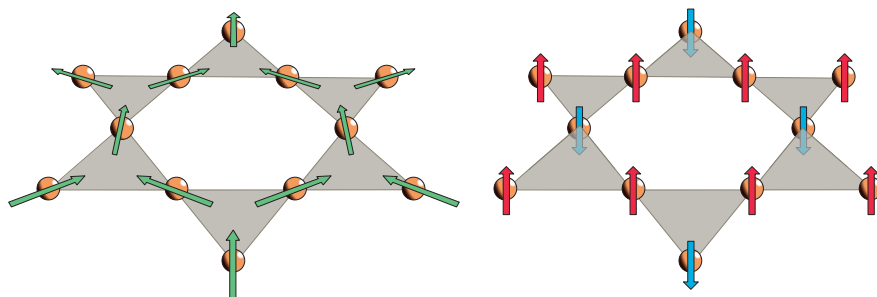
Isingi mudel käsitleb spinne, mis on suunatud ainult üles või alla.

XY-mudel selgitab materjalide käitumist, kus spinnid võivad vabalt liikuda üksnes x- ja y-teljel (täpselt nagu kellaoosutid).

Heisenbergi mudel käsitleb spinne, mis osutavad mis tahes suunas



Magnetmomentide võimalikud lähikorrapärad ruutvõrel (a-b) ja kolmnurgas (c-d): ferromagnetiline (a, c), antiferromagnetiline (b) ja frustreeritud struktuur (d)



Kagomé võre on kahekaupa jagatud nurkadega kolmnurkade triangulaarne (kolmnurkne) võrgustik. Sellesse võrgustikku või võresse saab spinne paigutada kahel viisil: nn Kagomé spinn-jää (vasakul), mille Isingu-sarnased spinnid asuvad võrgu tasandil, ja Kagomé Ising (paremal), mille spinnid on suunatud piki vertikaaltelge

Teraherts-spektroskoopia võimaldab otseselt jälgida spinni ja laengu dünaamikat, pakkudes väärtuslikku teavet kvantmaterjalide vastastikmõjude ja sidemete kohta.

Peale selle on kvantmagnetsüsteemide uurimisel üliolulised üha enam täiustatud meetodid, nagu neutronite hajumine, magnetresonants ja sünkrotronkiirgus. Need võimaldavad teadlastel süveneda spinn-interaktsiooni ja dünaamika mikroskoopilistesse üksikasjadesse, andes parema ülevaate kvantmagnetismi põhimehhanismidest. Keeruliste kvantmagnetnähtuste imiteerimisel on suur roll ka keerukate arvutusmodelite väljatöötamisel: need aitavad aru saada eksperimentide tegelikest tulemustest.

Kvantmaterjalide tuumamagnetresonants- ja terahertsspektroskoopia

Tuumamagnetresonantsspektroskoopia (TMR) on üks peamisi spektroskoopia-võtteid, millega nüüdisajal uuritakse kvantmagnetismi probleemide kõrval laialdaselt ka keemia, bioloogia ja füüsika omi. Selle meetodi tugevus seisneb

ainulaadses võimes saada mitmekülgset informatsiooni uuritava aine lokaalse struktuuri ja dünaamika kohta mitte-invasiivselt ehk ainet ennast muutmata. Seega on TMR-eksperimentidest saadav info väärtuslik täiendus difraktsioonimeetoditega hangitud teadmistele uurimisobjekti struktuuri kaugkorrapära kohta. Eriti teaberiikkad on TMR-mõõtmised ainetes, milles kaugkorrapära hoopiski puudub; ainetes, mille omadused määrab väike hulk lisandeid, või ainetes, mille omadused määratakse eeskätt lähikorra iseärasustega, nagu enamikus magnetilistes materjalides.

Hiljutised teraherts- ehk THz-spektroskoopia edusammud on kvantmagnetismi uurimist märkimisväärselt mõjutanud. Magnetilisi ja topoloogilisi materjale on uuritud THz-kiirguse abil, mis suudab tuvastada madala energiaga ergastusi. Nõnda on tehtud kindlaks uusi magnetilisi olekuid ja dünaamikat ning paranenud meie arusaam kvantmagnetilistest nähtustest mikroskoopilisel tasemel. THz-spektroskoopia võimaldab otseselt jälgida spinni ja laengu dünaamikat, pakkudes väärtuslikku teavet kvantmaterjalide vastastikmõjude ja sidemete kohta. Mõlema kirjeldatud spektroskoopiaaliigiga tegeletakse

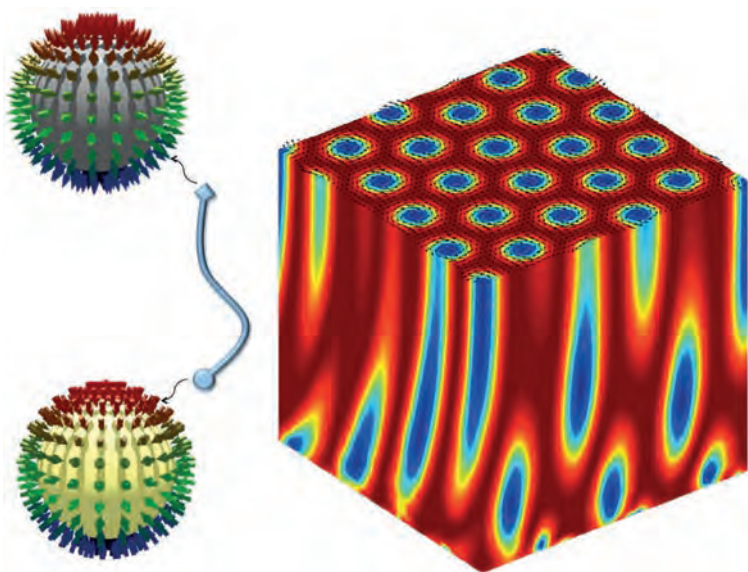
ka keemilise ja bioloogilise füüsika instituudi (KBFI) keemilise füüsika laboris. THz-kiirguse abil on hõlpsam uurida ka ülikiireid magnetilisi protsesse, sh kvantmagnetsüsteemide mõõduvaid käitumisviise ja mittetasakaalulisi olekuid. Need teadmised on üliolulised, et töötada välja ülikiireid spintroonika-seadmeid ja mõista magnetiliste lülituskiiruste põhipiiranguid. Seega aitavad THz-spektroskoopia edusammud teha nii alusuuringuid kui ka luua praktilisi rakendusi kvantmagnetismi valdkonnas.

Spintroonika ja kvantarvutid

Kvantmagnetism on tublisti kaasa aidanud spintroonika ja kvantarvutite arengule. Hiljutised uuringud on keskendunud spinnolekute manipuleerimisele, mille siht on salvestada ja töödelda teavet. Nõnda on võimalik arendada spinnipõhiseid kvantbitte (*qubits*). Need edusammud lubavad luua kiiremaid ja tõhusamaid andmetöötlustehnoloogiasid koos võimalike rakendustega krüptograafias ja keerukates simulatsioonides. Spintroonika kasutab elektronide spinn-vabadusastet, pakkudes mitmesuguseid eeliseid, nagu püsivus, kiire töö ja väike energiatarve. Integreerides spintroonikat kvantarvutusega, on loodud kvantspintroonika kontseptsioon, kus kvantarvutuste tegemiseks kasutatakse spinni olekuid. See hübriidne käsitlusviis ühendab mõlema valdkonna parimad omadused, loomaks tugevaid ja skaleeritavaid kvantarvutusvõtteid.

Magnetilised skürmionid

Magnetilised skürmionid (*skyrmions*), nanomõõtmelised spinnistruktuurid, on pälvinud suurt tähelepanu nende stabiilsuse ja andmete salvestamise potentsiaali tõttu. Hiljuti on uuritud skürmionide loomist ja manipuleerimist elektriväljade ja temperatuuri gradientide abil. Nende edusammude toel võib õnnestuda töötada välja suure tiheduse ja väikese võimsusega mälu-seadmeid ning uudeid spintroonikarakendusi. Skürmionidel on topoloogiline kaitse: nad peavad vastu häiretele ja defektidele. Seetõttu on nad ideaalsed selleks, et usaldusväärselt andmeid salvestada. Võimalus juhtida skürmioni



VIDA PRESS / ALAMY

Magnetitest leitud skürmion on stabiilne mesoskoopiline topoloogiline ergastus, kus spinnid mähkuvad kera pinnale ühte täisringi. Skürmione on täheldatud näiteks magnetilistes materjalides, millel puudub inversioonsümmeetria. Skürmionide tüüpiline suurus on umbes 10 nm. Vasakul on skemaatiline vaade skürmioni segmentist kui stringitaolisest ergastusest, mille kahes otsas on magnetilise monopoli ja anti-monopoli paar. Paremal selliste segmentide sirge joonvõre kolmemõõtmelises magnetis

dünaamikat väliste stiimulite, näiteks elektriväljade kaudu, lubab andmetöölusel toimida paindlikult ja energia-säästlikult. Teadlased uurivad ka skürmionide kasutamist neuromorfes andmetööluses, kus nende ainulaadsete omaduste tõttu saab jälgendada neuro-nite ja sünapside käitumist. See võib anda võimaluse luua suurema tõhususe ja jõudlusega tehisevärivörke.

Kvantmagnetismi katsumused

Hoolimata arvukatest edusammudest on kvantmagnetismi valdkonnas endiselt palju lahendamata probleeme. Neist üks peamisi on materjalide kvantspin-nide täpne juhtimine ja mõjutamine. Endiselt on keeruline saavutada sidusaid spinolekuid ja neid hoida sellistel temperatuuridel ja tingimustel, mida saab tegelikkuses rakendada. Usaldus-väärsete kvantseadmete väljatöötami-seks on äärmiselt tähtis mõista kvant-teabe kadumist põhjustavaid dekohe-rensiefekte ja osata neid leevendada.

Edusammud sillutavad teed kvantandurite ja spintroonikaseadmete arengule.

Teine suur proovikivi on kvantmagnet-materjalide integreerimine praeguste tehnoloogiatega. Neid materjale kasu-tavate kvantseadmete valmistamist ja haaret tuleb märkimisväärselt paran-dada. Pealegi, teoreetilisi mudeleid ja arvutusmeetodeid, millega saaks täpselt kirjeldada keerulisi kvantmagnetsüs-teeme, alles töötatakse välja. Probleeme on võimalik lahendada üksnes siis, kui jätkata erialadevahelist uurimistööd ja koostööd, mis ühendab füüsika, mater-jali- ja inseneriteaduse valdkonna teadmisi.

Tulevikuväljavaated ja järeldused

Kvantmagnetismi tulevik on paljutöö-tav, seda kinnitavad eksperimentaalsed ja teoreetilised uuringute edusammud. Need edusammud sillutavad teed kvant-

andurite ja spintroonikaseadmete aren-gule. Sellele aitab tublisti kaasa süga-vam arusaam kvantmagnetnähtustest.

Kui kvantmagnetismi lõimitakse teiste kvanttehnoloogiaharudega, suu-detakse anda panus valdkondadesse, mis ulatuvad andmetöölusest materjali- ja isegi terviseteaduseni.

Kokku võttes: hiljutised kvantmag-netismi edusammud rõhutavad selle teadusvaldkonna dünaamilist olemust. Rakendades magnetiliste omaduste uurimisel kvantmehaanikat, avastavad teadlased uusi füüsikalisi nähtusi, mis võimaldavad luua uuenduslikke tehnoloogilisi lahendusi. Seades sihi teha tulevikus teoks kvantmagnetismi täielik potentsiaal, on otsustav tähtsus käsil olevatel erialadevahelistel uuringutel ja koostööl. •

Raivo Stern (1963) on keemilise ja bioloogilise füüsika instituudi (KBFI) juhtivteadur, KBFI keemilise füüsika labori juhataja, kelle teadustöö põhisuunad on magnetism, ülijuhtivus, tuumamagnetresonants ja tugevad magnetväljad.

Ära anna maitset alla – vali maailma parima maitse ja toimega FRANK Fruities'e vitamiinid!

Kui tänapäeval enamus toidulisandeid sisaldavad rohkemal või vähemal määral siiski täite- ja lisaaineid, siis **FRANK Fruities'**e puuviljakommides ongi täite- ja lisaaineteks ehtsad puuviljad. Ja seda lausa üle ühe kilogrammi ühes purgis! Ei ole lisatud suhkruid, säilitusaineid, želatiini, värvaineid ega plastikut – need on loodud teadlikule tarbijale, kes otsib puhtaid ja tervislikke vitamiiniallikaid.

FRANK Fruities on võtnud puuviljade segamisel ja kontsentreerimisel kasutusele EcoCert sertifikaadiga tehnoloogia, mis säilitab puuviljade loomuliku maitse, magususe ja õrna pehme koostise. Puuviljasegud on rikastatud parimate vitamiinide ja

mineraalidega ning tänu puuviljadele on nende imendumine suurepärase. Seega on tegu toidulisanditega, mis päriselt toimivad! Vitamiinid on pärjatud ka tiitliga "Great Taste Awards 2021".

Et külmetus-haigused ei kimbutaks, turguta ennast ja oma pere **FRANK Fruities'**e vitamiinidega.



Saadaval hästi varustatud apteekides, erinevate edasimüüjate juures ja veebipoes www.yumtek.ee
Veebipoest leiate ka komplekte, mis sobivad ideaalselt kingipakki!

Kvantmehaanika interpretatsioonid

PIRET KUUSK JA VEIKO PALGE

Mis on kvantmehaanika interpretatsioonid? Ja miks on üht füüsikateooriat, mida peetakse 20. sajandi üheks kõige edukamaks teooriaks, üldse vaja interpreteerida? Edukad füüsikateooriad on ju tavaliselt edukad ka sellepärast, et nad annavad hea seletuse seni mõistatuslikuna näiva fenomenoloogia kohta; et nad korrastavad meie kontseptuaalse aparaadi ja loovad selguse sinna, kus varem oli segadus, sinna, kus varem ei nähtud korrapära. Kindlasti on üks hea seletuse tunnus asjaolu, et me saame temast aru. Ometigi on kvantmehaanikaga kummalisemad lood. Järgnevas anname ülevaate kvantmehaanika eri interpretatsioonide tekke põhjustest; samuti esitame lühiülevaate nendest interpretatsioonidest.



WELLCOME COLLECTION

Materiialainete esitaja
Louis de Broglie

1. Mõõtmisprobleem

Mis on kvantmehaanika? Kõige lihtsalt öeldes on kvantmehaanika teooria, mis kirjeldab mikromaailma, seda, mismoodi käituvad elementaarosakesed ja nende kogumid, aatomid, molekulid; kuidas käituvad need objektid väga suurte kogumitena, nt tahkistena; kuidas käitub kiirgus, valgus; kuidas nn materia ja kiirgus interakteeruvad.

Kvantmehaanika esitatakse sageli postulaatidena. Esimene neist ütleb, et süsteemi seisund on antud normeeritud vektoriga Hilberti ruumis. Näiteks, kui tegu on kahetasemelise süsteemiga, siis

seda kirjeldab vektor, mille komponentideks on kaks kompleksarvu. Tähistame selle vektori $|\psi\rangle$ -ga, see on kvantmehaanikas laialdaselt kasutatav nn Diraci *bra-ket*-sümbolism.

Füüsika kirjeldab objektide liikumist ehk seisundi muutumist ajas. Kvantmehaanika teine postulaat ütlebki, et süsteemi ajaline areng on määratud Schrödingeri võrrandiga

$$i \frac{d|\psi(t)\rangle}{dt} = H|\psi(t)\rangle,$$

kus H on süsteemi energia operaator ehk hamiltoniaan. Võrrandi formaalne

lahend on määratud unitaarse operaatoriga $U = e^{-iHt}$ ehk teisisõnu, kui süsteemi seisund alghetkel on $|\psi_0\rangle$, siis ajahetkel t on seisund $|\psi(t)\rangle = e^{-iHt}|\psi_0\rangle = U|\psi_0\rangle$.

Enne kui läheme kolmanda postulaadi juurde, uurime ühte iseäralikku probleemi, mis tekib kahe esimese postulaadiga. Oletame, et meil on kvantosake seisundis $|a_1\rangle$, mis vastab mingi vaadeldava A omaväärtusele a_1 , ja me teeme süsteemis mõõtmise.

Enne mõõtmist on mõõteseade algseisundis $|M_0\rangle$ ning pärast mõõtmist peab ta olema seisundis, mis vastab mõõdetava vaadeldava A väärtusele a_1 , tähistame selle seisundi vektoriga $|M_1\rangle$. Kokkuvõttes saame mõõtmisprotseduuri kujutada järgmise skeemiga:

$$|M_0\rangle |a_1\rangle \rightarrow |M_1\rangle |a_1\rangle,$$

kus tähistust $|M_0\rangle |a_1\rangle$ võib lugeda „aparaat on seisundis $|M_0\rangle$ ja kvantosake on seisundis $|a_1\rangle$ “. Vasakul on kogusüsteemi algseisund, nool kujutab mõõtmise protsessi ning paremal on kogusüsteemi lõppseisund. Täpselt samamoodi saame mõõta osakest, mis on alghetkel seisundis $|a_2\rangle$, seda kirjeldab protsess

$$|M_0\rangle |a_2\rangle \rightarrow |M_2\rangle |a_2\rangle.$$

Kuid nüüd tekib meil järgmine probleem. Kvantmehaanika teine postulaat ütleb, et süsteemi ajaline areng – siin mõõtmise protsess – on antud mingi unitaarse operaatoriga U , ja see on lineaarne operaator. See tähendab, et kui meil on tegu seisundite summaga $c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$, siis operaator U mõjub järgmiselt:

$$U(c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle) = c_1U|\psi_1\rangle + c_2U|\psi_2\rangle.$$

Kui me nüüd oletame, et enne mõõtmist oli kvantsüsteemi seisund antud kahe ülalmainitud seisundi summaga, siis saame järgmise mõõtmisprotsessi:

$$|M_0\rangle(c_1|a_1\rangle + c_2|a_2\rangle) \rightarrow c_1|M_1\rangle|a_1\rangle + c_2|M_2\rangle|a_2\rangle.$$

Kuidas peaks nüüd aru saama lõppseisundist? Kas aparaat näitab tulemust a_1 ? Ei, sest siis peaks ta olema seisundis $|M_1\rangle$. Kas ta näitab tulemust a_2 ? Samuti mitte, sest siis peaks ta olema seisundis $|M_2\rangle$. Kvantmehaanika keske postulaadi, Schrödingeri võrrandi järgi saame mõõtmise tulemusena seisundite $|M_1\rangle|a_1\rangle$ ja $|M_2\rangle|a_2\rangle$ nn superpositsiooni. Oluline on siin tähele panna, et mõlemad seisundid esindavad teineteist loogiliselt välistavaid situatsioone. Tegelikult näeme mõõtmise lõpus aparaati näitamas kas ühte mõõtetulemust või teist mõõtetulemust, aga mitte mõlemat korraga. Ja ometigi ütleb kvantmehaanika midagi muud.

Kuidas seda olukorda lahendada? Ilmselt tuleb meil ülalloodud kvantmehaanika postulaatidele midagi juurde lisada, et teooria tegelikkusega kooskõlla viia. See lisandus, mis teeb kvantmehaanika kogemusega kooskõlaliseks, ongi kvantmehaanika interpretatsioon. Kontseptuaalselt võib kvantmehaanika interpretatsioone vaadata kui püüdeid lahendada mõõtmisprobleem. Kvantmehaanika nüüd peaaegu saja-aastase ajaloo vältel on neid esitatud mitu, siin teeme ülevaate kolmest peamisest interpretatsioonist.

2. Mõõtmise postulaat ja kvantoleku kollaps

Tähelepanelik lugeja märkas, et me jätsime kvantmehaanika teooria tutvustamise katki ega esitanudki kolmandat postulaati. Seda sellepärast, et kolmas postulaat – mõõtmise postulaat –, mis standardselt kvantmehaanika teooria esituses antakse, kuulub meie nomenklatuuri järgi kvantmehaanika *kollapsi* interpretatsiooni, olgugi et see on füüsikute igapäevatööriist.

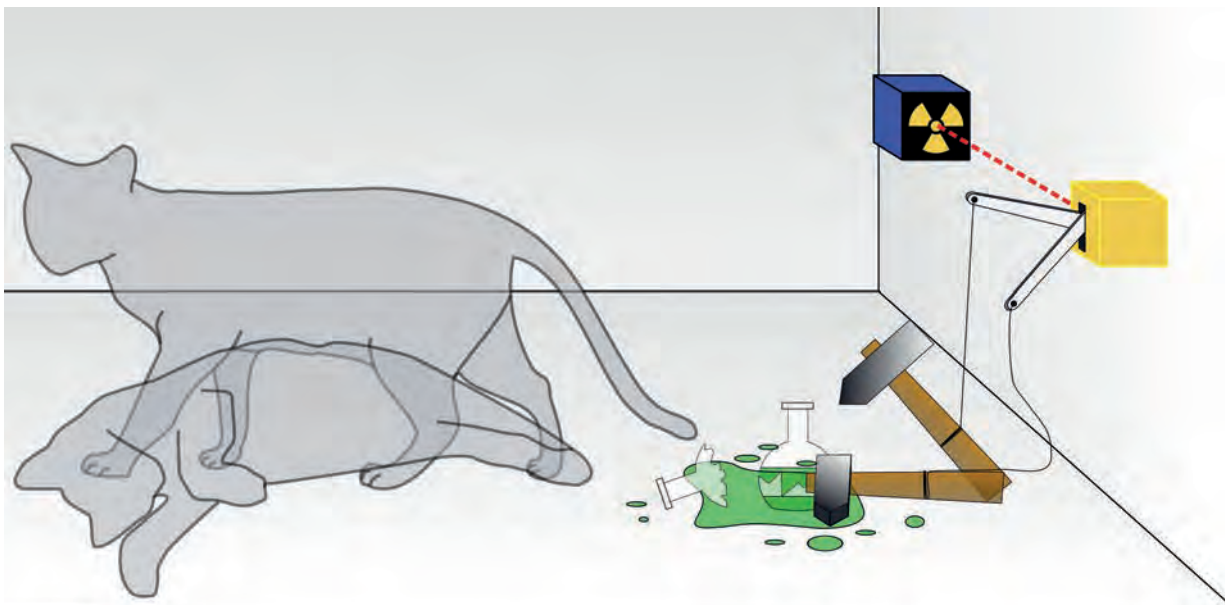
Mõõtmise postulaat väidab, et kui kvantsüsteem on olekus $|\psi\rangle$ ja mõõdetakse omadust A , siis on tulemuseks ainult operaatori A mingi omaväärtus a_i ning kvantsüsteem on sellele omaväärtusele vastavas omaolekus $|a_i\rangle$. Seega, ülalloodud mõõtmisprotsessi näites saame tulemuseks kas $|M_1\rangle|a_1\rangle$ või $|M_2\rangle|a_2\rangle$, just nii, nagu eksperiment näitab. Mõõtmispostulaat ütleb veel, et kui teha seisundiga $|\psi\rangle$ suur hulk mõõtmisi, siis omaväärtus a_i esineb tõenäosusega $|c_i|^2$, kus kompleksarv c_i on kor-daja oleku $|\psi\rangle$ esituses operaatori A baasis. Seda eeskirja nimetatakse ka Borni reegliks.

Kuigi mõõtmisprotsessi kirjeldus on üsna matemaatiline, on selle tuum lihtne: kui enne mõõtmist on kvantsüsteem olekus $|\psi\rangle$, siis pärast mõõtmist on see olekus $|a_i\rangle$. Olek ei muutu ajas Schrödingeri võrrandi kohaselt pidevalt, vaid järsu, diskreetse hüppena ühte omaolekusse. Seda nimetatakse oleku kollapsiks: algolekut kirjeldavast lineaarkombinatsioonist on säilinud ainult üks sei-

sund, nimelt see, millele vastavat omaväärtust näitas mõõteaparaat. Sel viisil on kollaps mõõtmisprobleemi lahendus: pärast mõõtmist ei kirjelda kvantsüsteemi enam meile üsna arusaamatu olekute superpositsioon, vaid üks kindel olek, mille saab määrata mõõtmistulemusest. Näiteks kui Schrödingeri kuulus kass oma kinnises kastis on alguses elusa ja surnud oleku superpositsioonis, siis kasti sisse piilumine on mõõtmine, mis mitte ainult ei anna meile teada, kas kass on elus või surnud, vaid kassi olek kollapseerub ühte neist kahest olekust, selle põhjal, mida me näeme.

Kuid selline kahetine arusaam kvantobjekti ajalisest arengust ei ole algusest peale tundunud rahuldav ja ikka on otsitud võimalust, kuidas kaks arenguviisi ühendada üheksainsaks protsessiks. Näiteks on täiendatud Schrödingeri võrrandit nii, et lahend võiks kirjeldada kvantoleku juhuslikult toimuvat spontaanset kollapsit. Kuid sel juhul ei oleks kvantsüsteemi ajaline areng enam unitaarne ja see tekitab uusi probleeme. On vaadatud ka võimalusi, et kollapsi

Lisandus, mis teeb kvantmehaanika kogemusega kooskõlaliseks, ongi kvantmehaanika interpretatsioon. Kontseptuaalselt võib kvantmehaanika interpretatsioone vaadata kui püüdeid lahendada mõõtmisprobleem.



Schrödingeri kass elusa ja surnud oleku superpositsioonis

DHATFIELD / WIKIMEDIA COMMONS

võivad esile kutsuda mitmesugused gravitatsiooniga seotud nähtused. Siin on takistuseks asjaolu, et kollaps kuulub kvantteooria valdkonda, aga praegu teada olevad gravitatsiooniteooriad on klassikalised ja seni ei ole veel õnnestunud gravitatsiooni kvantiseerida. Seega sisaldaks kollapsi seletamine gravitatsiooni kaudu taas kahetist arusaama.

Kollapsit on püütud seletada veel paljudel muudel viisidel, kuid ükski neist pole olnud ei probleemitu ega ka mitte üldtunnustatud. Ent kvantmehaanikal on ka teisi tõlgendusi, kus kollaps üldse puudub.

3. Mitme maailma interpretatsioon

Princetoni ülikooli doktorant Hugh Everett ja tema juhendaja John Archibald Wheeler esitasid 1957. aastal kvantmehaanika kohta uue arusaama, milles pole tarvis kvantoleku kollapsit. Nad tõlgendasid kvantmehaanika valemid täiesti realistlikult: kõik olekud kvantmehaanilises summas (superpositsioonis) on tegelikult olemas ja mõõtmisel esinevad kõik mõõtmistulemused ühekorraga, kuid igaüks eri maailmas, mille vahel puudub igasugune otsene side. Meie elame ühes kindlas maailmas: olekute superpositsiooni ühes liikmes, kus kvantmehaanika poolt määratud tõenäosusega ilmneb kindel mõõtarv Borni reegli alusel. Kuid meil pole põhimõtteliselt võimalik saada mingit katselist või vaatluslikku teavet teiste maailmade ja neis esinevate mõõtmistulemuste kohta.

Kümmekond aastat hiljem näitas Bryce DeWitt, et Everetti-Wheeleri arusaam pole midagi muud kui oletus, et kõiki kvantteooria valemid saab seada otsesesse vastavusse tegelikkusega, mida võib nimetada kvantmehaanika täiesti realistlikuks interpretatsiooniks mitteklassikalises mõttes. See tähendab, et reaalseks ei peeta mitte ainult seda ühte mõõtmistulemust, mis saadi „meie“ maailma ühes konkreetse mõõtmisaktis, vaid ka kõiki teisi võimalikke mõõtmistulemusi, mis küll selles mõõtmisaktis ei ilmnenu, kuid teooria kohaselt oleksid võinud teatud tõenäosusega ilmneda. Sealjuures „elavad“ kõikvõimalikud mõõtmistulemused eri maailmades ning mõõtmisaktis haruneb universum üksteisest täiesti eraldatud maailmadeks. Kvantoleku kollaps on siin asendatud maailmade paljususega. Niisuguse tõlgenduse puudus on asjaolu, et pole loomulikku viisi, kuidas

omistada eri mõõtmistulemustele tõenäosusi, mida on tarvis teoreetilise pildi kooskõlastamiseks katsetulemustega.

4. Bohmi interpretatsioon

Kvantmehaanika kujunemise algusaastail, 1920ndatel, esitas Louis de Broglie kvantmehaanika realistliku ja deterministliku tõlgenduse. Osakeste liikumine oli määratud võrrandiga, milles sisaldus Schrödingeri võrrandiga kirjeldatud kvantmehaaniline olekufunktsioon. Kuna olekufunktsioon „suunas“ osakeste liikumist, nimetati de Broglie' teooriat ka pilootlaine teooriaks.

Kolm aastakümnet hiljem hakkas de Broglie' teooriat täpsemalt välja arendama David Bohm. Matemaatilisel on tema teoorias kaks põhivõrrandit: Schrödingeri võrrand pilootlaine jaoks ja Bohmi võrrand osakeste trajektoride jaoks. Kuna osakesi ei saa katsetes jälgida, nimetatakse neid ka teooria varjatud parameetriteks.

Bohmi teoorias ei ole kvantnähtuste tõlgendamisel neid probleeme, mis ilmnevad ortodoksses kvantmehaanikas. Mõõteriist ja mõõdetav objekt koosnevad (kvant)osakestest ja pärast mõõtmisprotsessi on mõlemad kindlates olekutes, mis välistab kvantoleku kollapsi vajaduse. Kvantteooriale iseloomulik tõenäosuslikkus tuleneb põhimõttelisest võimatusest täpselt määrata võrrandite algtingimusi. Teooria kujundati kooskõlaliseks kõikvõimalike katsetulemustega, mis tähendab, et füüsika raames pole võimalik üht teooriat teisele eelistada.

Kahjuks on Bohmi teoorias väga vaevaline arvutada konkreetsete katsete tulemusi, mistõttu on takerdunud selle arendamine füüsikas. Kuid filosoofidele meeldib Bohmi teooria lihtne ja selge ontoloogia, nii et praegu räägivad ja kirjutavad sellest teooriast pigem teadusfilosoofid kui füüsikateoreetikud.

5. Lõpetuseks

Kui oluline on mõõtmisprobleem ja selle lahendamiseks pakutud kvantmehaanika interpretatsioonid? Ühelt poolt on selge, et mõõtmisprobleemi lahendamine on möödapääsmatu, kui kvantmehaanika tahab olla empiirilisel adekvaatne teooria. Kollapsiteooria oli üks esimesi lahendusi, mis välja arendati ning mis on tänini jäänud füüsika igapäevatööriistaks. Teisalt oli sellel lahendusel hulk probleeme, ja sellest tingitud rahulolematuse ajendas looma

Suhtumine kvantmehaanika mõõtmisprobleemi tähtsusesse on füüsikute hulgas olnud ühest spektri äärest teise.

uusi interpretatsioone. Peab kohe lisama, et suhtumine kvantmehaanika mõõtmisprobleemi tähtsusesse on füüsikute hulgas olnud ühest spektri äärest teise. Kui näiteks Stephen Hawking on pidanud seda ebaprobleemiks, siis John Belli arvates on see üks olulisimaid kvantmehaanika probleeme. Bell eristas praktilist käsitlusviisi, kus me kasutame mõisteid 'mõõteaparaat' ja 'vaatleja' eksperimendi kirjeldamiseks, kuid osutas samas teravalt asjaolule, et kui kvantmehaanikat pidada reaalsuse fundamentaalseks kirjelduseks, siis ei ole sellistel hägusatel mõistritel teooria aksioomides kohta. Sest „[m]is kvalifitseerib mingi füüsikalise süsteemi 'vaatlejaks'? Kas pidi maailma lainefunktsioon kollapsihüppe tegemiseks ootama sadu miljoneid aastaid, kuni ilmus esimene üherakuline elav organism? Või pidi ta ootama natuke kauem, kuni ilmus pisut paremini kvalifitseeritud süsteem [---], kellel oli PhD kraad?“^{*} Samuti peaks kvantteooria kirjeldama maailma üldiselt, mitte ainult eksperimendi ja vaatleja kontekstis.

Kokkuvõtteks võib öelda, et pinge kvantmehaanika aluste ja mõõtmisprobleemi ümber on endiselt olemas. Viimase sajandi jooksul on tehtud palju tööd kvantmehaanika aluste probleemide, selle tulemusena on meil palju selgem pilt kvantmehaanika kontseptuaalsest struktuurist, sh mõõtmisprobleemist, ning võimalustest seda lahendada. Kvantmehaanika interpretatsioonid on näited püüete kohta mõelda läbi erisugused loogilised võimalused ja asetada teooria rahuldavale kontseptuaalsele vundamendile. Paraku pole need püüded seni vilja kandnud. Kas see on vihje, et ainus väljapääs on uus füüsika, näiteks ühendada kvant- ja gravitatsiooniteooria Einsteinil püüdmatuks jäänud suurde ühendteooriasse? Tulevik näitab. •

^{*}John Bell (1990). „Against 'measurement'“, Physics World 3 (8) 33.

Piret Kuusk (1947) on füüsik ja teadusfilosoof, Tartu ülikooli füüsika instituudi kaasprofessor.

Veiko Palge (1971) on füüsik ja filosoof, Tartu ülikooli teoreetilise füüsika teadur.



Sodalis
VÄIKELOOMAKLIINIK

Tartus Tähe 98

E-R 9-19 L 10-16

738 8111, 5393 6397

Võrus Pikk 21

E-R 9-17 L 10-13

782 0707, 514 5790

Räpinas Võhandu 31

E-R 9-17

796 1117, 516 5922



ÕHUS ON SÜGIST!

Kvantarvutid kompavad tavaarvutite võimete piiri

JOHANNES HEINSOO

IQM

Kvantarvutid töötavad ja on saavutanud *kvant-üleoleku*. See tähendab, et kvantarvutitel on tehtud arvutusi, mida kõige võimsamad tavaarvutid ei suuda samasuguse täpsuse ja arvutusajaga teha. Samas on siiski võimalik kontrollida leitud lahenduste õigsust. Seni on sel eesmärgil valitud niisugused matemaatilised ülesanded, mille lahenduse leidmise algoritm sobib ideaalselt praegustele kvantarvutitele ja kasutab maksimaalselt nende võimsust. Ometi pole tehtud arvutustest tänini olnud muud kasu kui kvantarvuti võimete demonstratsioon – *kvantkasu* pole veel saavutatud.

Soome ettevõttes IQM loodud ülijuhtivatest vooluahelatest kvantarvuti jahutusseadme ehk krüogeenilise külmiku sisemus. Enne külmiku jahutamist paigaldatakse selle ümber silinder ja sisemus pumbatakse vaakumisse. Külmiku sees on palju vasest osasid, sest vask juhib hästi soojust ka väga madalatel temperatuuridel. Ühtlasi on külmikus palju läikivaid osasid, sest neelamise asemel peegeldavad need tagasi kõrgema temperatuuriga välisseintelt langeva soojuskiirguse. Kvantprotsessor paigutatakse pildi allosas asuvasse magnetvarjestusse ja töötamisel ühendatakse sellega mikrolaine koaksiaalkaablid

Matemaatilisi probleeme liigitatakse muu hulgas nende lahenduse leidmise keerukuse järgi. Näiteks selleks et leida sortimata nimekirjast mingi nimi, tuleb tavaarvutil halvimal juhul kõik nimed läbi vaadata. Säärase probleemi raskus on tavaarvuti jaoks võrdeline nimekirja pikkusega. Seevastu näiteks molekulide täpse kuju leidmise keerukus kasvab eksponentsiaalselt elektronide arvuga. Kuigi eeltoodud otsimisülesande keerukus on kvantarvuti jaoks võrdeline vaid nimekirja pikkuse ruutuurega, on selle ülesande korral kvantarvuti eelis liiga väike, et üle kaaluda tavaarvuti mälu suurus, töösagedus ja madal hind. Seejärel on otstarbekas tavaarvutiga lahendada kõik probleemid, kus kvant-algoritmi keerukus ei ole tavaprogrammi keerukusest kõrge astmega polünoomi võrra väiksem.

Samas on teada mitu tähtsat ülesannet, mida kvantarvuti lahendab eksponentsiaalselt väiksema tehete arvuga. See tähendab, et isegi kui tavaarvutit edasi arendatakse, saab kvantarvutiga ühel päeval lahendada tavaarvutile praktiliselt võimatuid ülesandeid. Nende hulka kuuluvad arvutused keeruliste molekulide õige kuju või reaktsioonide täpse käigu kohta. Väikeste molekulide korral saab seda kvantarvutitega teha juba praegu.

Kvantkasu on saavutatud, kui kvantarvuti hakkab ülesandeid lahendama parimast tavaarvutist kiiremini, odavamalt või täpsemini. Olenevalt kvantarvutuste veamäärast, vigade tegemise tõenäosusest ühe tehte kohta, on vaja tuhandeid või miljoneid kvantmälu elemente ehk kvantbitte. Vajalik kvantoperatsioonide veamäär on hinnanguliselt vahemikus üks kümnest miljonist kuni üks sajast miljardist. Siis saab lahendada näiteks lämmastiku sidumise, vesiniku tootmise, päikesepaneelide efektiivsuse, kõrgetemperatuuriülijuhtide, akude ja superkondensaatoritega seotud kvantkeemia ja materjaliteaduse probleeme. Isegi väikestes tavaarvutites

Kvantarvutiga saab ühel päeval lahendada tavaarvutile praktiliselt võimatuid ülesandeid. Nende hulka kuuluvad arvutused keeruliste molekulide õige kuju või reaktsioonide täpse käigu kohta.

Kvantarvutuse vigade allikas on kvantbittidele mõjuvad juhuslikud muutused lähikeskkonnas, mis muudavad tundliku kvantarvuti tavaliseks arvutiks.

on miljoneid transistoreid ja kindlasti on põhimõtteliselt võimalik, et kvantarvutites oleks miljoneid kvantbitte.

Vead ja veaparandus

Kõik arvutid teevad arvutades mingi tõenäosusega vigu. Kvantarvutid on kvantbiti materjali puhtuse ja juhtelektroonika täpsuse suhtes eriti tundlikud. Kvanteduks vajaliku arvutusvõimsuse saavutamiseks peab vigade mõju leevendama ja vigu parandama.

Kvantarvutuse ajal võivad juhtuda mitmesugused vead. Põhimõttelist laadi vigade allikas on kvantbittidele mõjuvad juhuslikud muutused lähikeskkonnas, mis muudavad tundliku kvantarvuti tavaliseks arvutiks. Üks tehnilist laadi vea allikas on kvantarvutit juhtiva elektroonika lõplik täpsus. Digitaalses tavaarvutis saab väikseid kõrvalekaldeid, näiteks CD-plaadi mustri sügavuses või pooljuhtmälu mõõdetud pinges, ümardada enne nulliks või üheks sildistamist. Kvantarvutis on kõikvõimalikud kvantbiti väärtused üksteisele nii lähedal, et neid muutes peavad kvantbitte mõjutavad elektripinged olema väga täpsed, nagu oleks tegu analoogarvutiga. Teine tehniline probleem on vajalike tehnoloogiate madalam tehniline küpsusaste, mis teeb toote kalliks, tootmise viljakuse väikeseks ja süsteem tervikuna ei ole nii töökindel, kui vaja.

Vealeevendus vähendab vigade mõju, keskmistades tulemusi või ekstrapoleerides. Vealeevendus teeb arvutuse aeglasemaks, sest vajab suurt hulka kordusi. IBM, mis on arendanud seni suurimad kvantarvutid, on vealeevenduse meetodikat palju arendanud. Praegu avaldatakse selle kohta palju teadustöid. Selleks et saavutada kiire kvantedu, on vealeevendust vaja, aga arvatavasti on vaja ka kvantveaparandust.

Kvantveaparandus erineb tavaarvutite veaparandusest. Tavaarvuti veaparandusprotokollis hoitakse andmetest palju koopiaid, mõõdetakse ära bittide väärtused ja arvutatakse neist paarsus: paaritu või paaris. Kui bittide väärtused pole samad, siis on mõnega juhtunud

viga. Kui koopiaid on piisavalt, siis paarsused osutavad vigade täpsetele asukohtadele registris ja vea saab parandada. Kvantinfo talletamiseks veaparanduse abil peab kvantbitid kopeerimise asemel hoopis põimima ja kvantbittide paarsust tuleb hinnata, mõõtmata kvantbittide väärtusi. Selle võimalikkus tundub ehk veidi üllatav, aga kujutage ette näiteks kahte värvilist kuuli kahes kotis. Lihtne on kontrollida, et mõlemas kotis on üks kuul, ilma et me teaksime, kummas kotis on kumb kuul. Mõõtes kvantbittide registris paarsusi, saab vead teada ja parandada isegi siis, kui registrisse salvestatud info ei ole teada.

Kvantveaparandusel on ka teine iseärasus: kvantbitil on kaks vabadusastet ja tuleb mõõta kahte tüüpi paarsust. Nõnda saab veaparandusega kvantregistris salvestada nii klassikalist informatsiooni kui ka võimalikke kvantinformatsiooni superpositsioonolekuid.

Paljude füüsiliste kvantbittide registrisse salvestatud üksikut kvantinfo tükki nimetatakse loogiliseks kvantbitiks. Kvantveaparandus võimaldab peale loogiliste kvantbittide talletamise ka nendega veakindlalt arvutada. Veakindla arvutuse tehted erinevad suuresti füüsiliste kvantbittide operatsioonidest. Selle kirjeldamiseks on leiutatud uued matemaatikavaldkonnad, nagu võrekirurgia ja ZX-algebra.

Kvantarvuti ehituse nüüdissesse

Üks füüsikaline objekt, kuhu kvantbiti saab salvestada, on elektroni spinn, millel on täpselt kaks omaolekut. Vaikses elektromagnetilises keskkonnas on sinna võimalik salvestada ka omaolekute superpositsioonolekuid. Neid üksikuid elektrone saab hoida ka suhteliselt tavalistes ränipõhistes pooljuhtides. Nii-suguse platvormi suur eelis on asjaolu, et põhimõtteliselt saab seda kõike teha praeguse pooljuhtide tehnoloogiaga ja

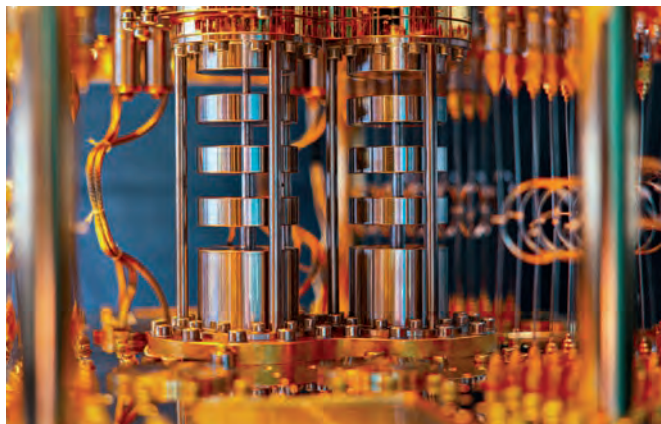
Kvantveaparandus võimaldab peale loogiliste kvantbittide talletamise ka nendega veakindlalt arvutada. Veakindla arvutuse tehted erinevad suuresti füüsiliste kvantbittide operatsioonidest. Selle kirjeldamiseks on leiutatud uued matemaatikavaldkonnad, nagu võrekirurgia ja ZX-algebra.

sama kiibi sisse panna kvantprotsessori juhtimiseks vajaliku tavaelektroonika. Samas on vaja materjalide absoluutset puhtust ja väikest kristallidefektide hulka. Üks selle platvormi juhtiv arendaja on pooljuhtide maailmas üledukas Intel, mis on teinud seni keerukaima integreeritud kvantbittide juhtloogika kiibi (Intel Horse Ridge II), mis töötab head selle platvormi skaleerimisele. Praegu on sellistel seadmetel tüüpiliselt kuni 14 kvantbitti ja vigade tõenäosus on alla ühe protsendi.

Teine platvorm, mis pealtnäha meenutab samuti tavalist elektroonika-kiipi, on ülijuhtivad vooluahelad, kus kvantbitti ühte olekut tähistab üks mikrolaine sagedusega võnkeringi salvestatud energiakvant – plasmon. Superpositsioonoleku korral on võnkeringis korraga 1 ja 0 plasmonit. Samade sagedustega võnkeringid võivad olla eri induktiivsusega. Suure induktiivsusega võnkeringis on suured voolukõikumised, aga väikese induktiivsusega võnkeringis on suured pingekõikumised. Voolubittid on tundlikud magnetvälja mürade ja pingebittid on tundlikud elektrivälja mürade suhtes. Voolubitidega on praktikas lihtsam teha kiireid arvutusi ja need ajavad vähem sassi 0 ja 1 olekut. Pingebitte on rohkem uuritud, need on veidi lihtsama ehitusega ja ajavad vähem sassi kvantbitti superpositsioonolekuid. Pingebitte arendavad näiteks suurfirmad, nagu Google ja IBM, kvanttehnoloogiafirmad Rigetti Ameerikas ja IQM Euroopas. IQM on juba mitu viie kuni viiekümne kvantbitiga arvutit müünud riiklikele teadusasutustele ja superarvutuskeskustele, tõustes riistvara müügi liidriks. Voolubitte arendavad näiteks Amazoni meeskond Singapuris ja Ameerika-Euroopa noor idufirma Atlantic Quantum. Noorteadlased, kes on seotud Massachusettsi tehnikainstituudi ja Atlantic Quantumiga, on avaldanud teadustöö loogikaoperatsioonist, mille veamäär enne veaparandust on vaid üks tuhandest. See

Pinge-bitte arendavad näiteks suurfirmad Google ja IBM, kvanttehnoloogiafirmad Rigetti ja IQM. Voolu-bitte arendavad Amazon ja Atlantic Quantum.

Kvantarvuti jahutus-seadme kõige külmemad osad, nn segupotid, eemaldavad töö käigus kumbki 15 μ W soojus-energiat temperatuuril 20 mK (s.o veidi alla -273 Celsiuse kraadi)



Eestlased kvantarvutustehnoloogias

Johannes Heinsoo

Olen doktorikraadiga füüsik ja üks IQM-i esimestest töötajatest. IQM arendab ja müüb ülijuhtivate kvantarvutite täiskomplekte ja võimaldab oma süsteemidele ligipääsu pilve kaudu. Kõige alguses tuli teha plaane, patentida meie kesksed ideed, koordineerida esimese labori sisseseade soetamist, kavandada tööprotseduurid, mille järgi disainida kvantkiipe ja neid eksperimentide jaoks karakteriseerida. See omakorda tähendas põhjalikku tutvumist kümneid tuhandeid eurosid maksvate laboratoorse mikrolaineseadmete tootekirjeldustega, krüogeeniliste süsteemide osade disainimist, tublis koguses tarkvaraarendust ja suhtlust järjest kasvava inseneride meeskonnaga. Viis aastat hiljem on meil peaaegu 300 töötajat, enamik Soomes ja Saksamaal. Mina olen keskendunud ennekõike kvantarvuti süsteemi-inseneeriale, s.o abstraktsete süsteemi alamosade kirjeldamine sellise detailsusega, et süsteemi alamosad sobiksid pärast sõltumatut arendamist omavahel hästi kokku. Selleks on vaja tihti aru saada eri valdkondade ekspertide leitud kitsendustest, et teha terviku tasemel kõige targemaid kompromisse.

Ants Remm

Lõpetasin möödunud aastal Šveitsi föderaaalse tehnoloogiainstituudi Zürichis doktoritöö, milles olen demonstreerinud ülijuhtivatest elektriahelatest kvantbittidega veaparandust. Minu ja kolleegide töö tulemuseks oli maailma esimene demonstratsioon teatud kvantveaparanduse protokolli. Sel aastal kolisin Bostonisse, kus asusin tööle Massachusettsi tehnikainstituudi vastses kõrvalfirmas Atlantic Quantum, millel on haru Rootsis Göteborgis. Atlantic Quantum arendab ülijuhtivate kvantbittide tehnoloogiat, mis oleks praktiline suureskaalaliste kvantarvutite ehitamiseks. Teistest firmadest, mis tegelevad ülijuhtidest kvantarvutite ehitamisega (IQM, Google, IBM, Rigetti), eristab meid kasutatud kvantbitte moodustav elektri-ahel, mis koosneb peale tavapärase kondensaatori ja Josephsoni siirde (nn transmon-tüüpi kvantbitt) veel induktiivpoolist (nn fluxonium-tüüpi kvantbitt). Minu praegune töö seisneb kvantkiipide mõõtmises ja nende toimimise kontrollimises. Sellel on kaks põhieesmärki. Esmalt tuleb kiiresti teha kindlaks kvantkiibi omadused, et saaksime võimalikud puudujäägid edasises arendusjärgus parandada. Teisalt arendan kvantoperatsioonide häälestamise meetodeid, mis lubaksid võimalikult kiiresti leida parameetrid (tugevus, sagedus, ajastus jne) signaalidele, mis teevad kvantoperatsioone.

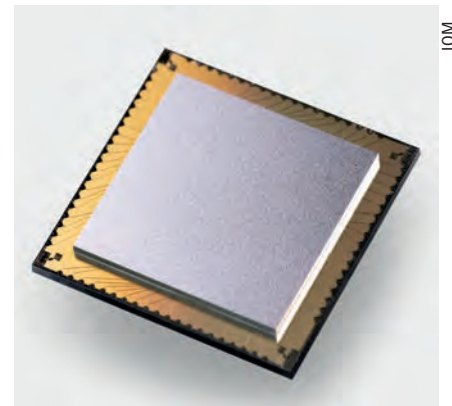
Roland Matt

Pärast füüsika bakalaureuseõpinguid Tartu ülikoolis omandasin kvantfüüsika doktorikraadi lõksustatud ioonidega kvantinformatsiooni töötlemise alal Šveitsi föderaaalse tehnoloogiainstituudi Zürichis. Mahukas doktoritöö võimaldas end arendada nii fundamentaalse aatomifüüsika kui ka nüüdisaegse inseneeria valdkonnas. Töö käigus sisustasin uue teaduslabori ja ehitasin kvantarvuti prototüübi, mis põhineb lõksustatud kaltsiumioonidel. Peale ülitäpsete isotoopnihete mõõtmise demonstreerisin uudset aatomite laserjahutamise meetodit. See avab tee eri kaltsiumioonide isotoopidel põhineva kvantarvuti ehitusele. Praegu töötan idufirmas Oxford Ionics kvantarhitektina, minu ülesanne on arendada ettevõtte tehnoloogilist visiooni ja juhtida käsil olevate arendusprojektide füüsikaliste teoreetiliste sisu. Minu põhihuvi on arendada skaleeruvaid paralleelseid kontrollimeetodeid, sest need on tarvilikud suuremastaabiliste kvantarvutite loomiseks. •

Kõige väiksemate kvantloogikaoperatsiooni veamääradega arvutusi tehakse elektrivälja lõksustatud ionide siseolekutega.

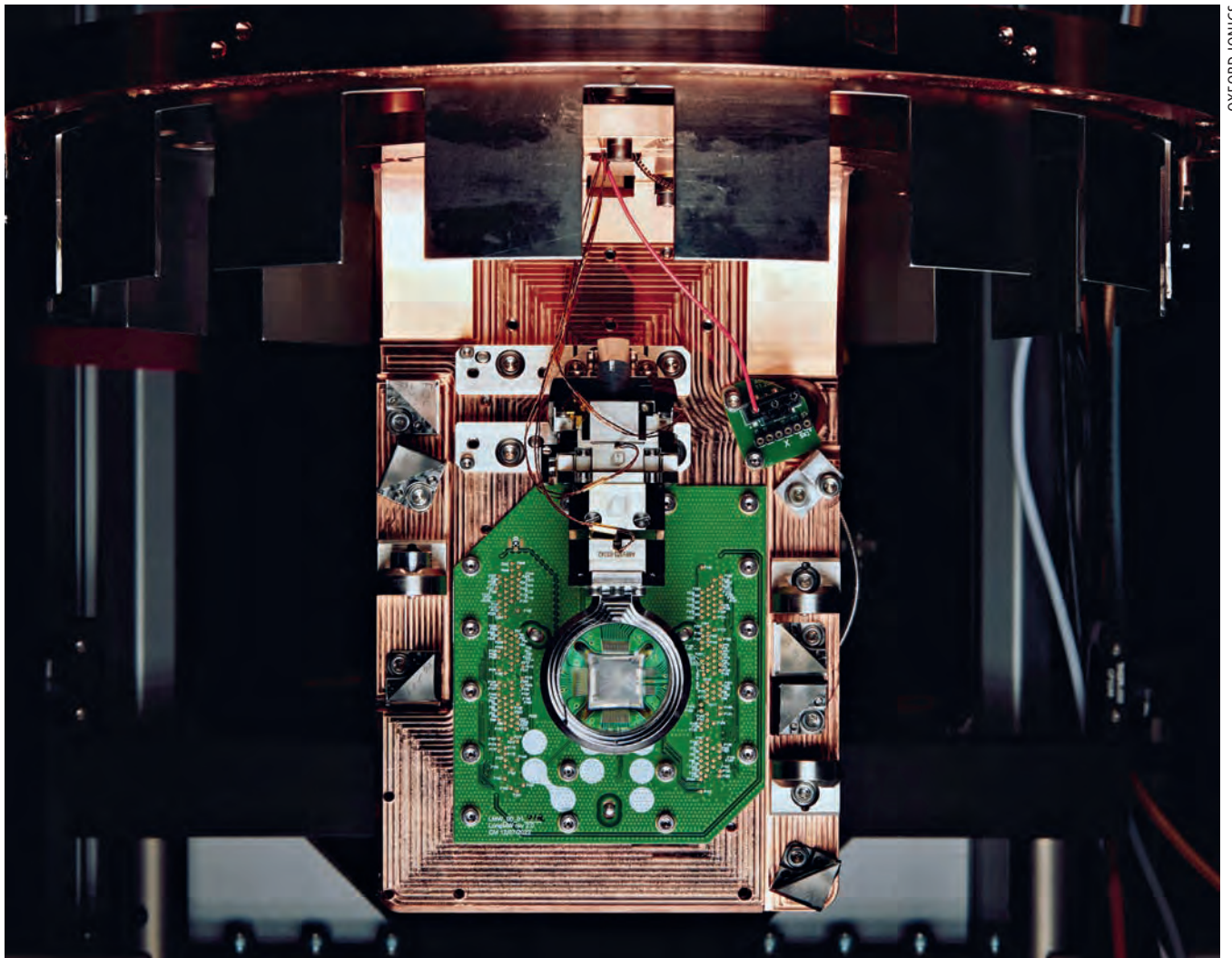
on ülijuhtide rekord. Suurimaid, 433 veaparanduseta kvantbitiga seadmeid on näidanud IBM (IBM Osprey). Ainult Google'i meeskond on demonstreerinud, et neil on kõik veamäärad piisavalt väikesed, et veaparandusega operatsioonide veamäär järjekindlalt väheneks, kui veaparanduskoodi suurus suureneb kolmest seitsmeni.

Kõige väiksemate kvantloogikaoperatsiooni veamääradega arvutusi tehakse elektrivälja lõksustatud ionide siseolekutega. Samalaadset tehnoloogiat kasutatakse täpseimates aatomkellades. Sel suvel on ilmunud Oxford Ionicsi meeskonna teadustöö käsikiri, kus kirjeldatakse riistvara veamäära enne veaparandust kolm viga kümnest tuhandest, mis on praegu rekord. Ameerika firma Quantinuum teeb koostööd Microsoftiga; koos on nad näidanud seni väikseima veamääraga veaparandatud põimolekut: ainult üks viga sajast tuhandest. Loogikaoperatsioonide tegemiseks on vaja ioone valgustada laseripulssidega, mille läbimõõt on ioonidest tunduvalt suurem. Seepärast peab



IQM

Ettevõttes IQM arendatud 20 kvantbitiga kvantkiip koosneb tegelikult kahest räniplaadist, mille metalliga kaetud pooled on asetatud vastastikku ja metallikihti on söövitatud mikrolaine lainejuhid kvantbitid



OXFORD IONICS

Lõksustatud ionidel põhineva kvantarvuti südamik, mis asub ülikõrgvaakumis temperatuuril 5 K (veidi alla –268 Celsiuse kraadi). Ioone hõljutatakse kiibi pinna kohal, kasutades täpselt kontrollitud elektrivälju umbes 50 µm kõrgusel (s.o veidi vähem kui juuksekarva läbimõõt).

Ioone jahutamiseks ja kontrolliks kasutatakse laservalgust, mis jõuab kiibini peeglite ja läätsede süsteemi kaudu. Fotol keskmes asuva suure läätse abil kogutakse ionide hajutatud valgust, mille põhjal saab tuvastada nende kvantoleku. Kvantarvuti on arendatud ettevõttes Oxford Ionics

paralleelse arvutuse jaoks operatsioonis osalevaid ioone liigutama laseri ette, muutes löksu elektroodide pingeid. Lähimõeldult väikeste ja samas suurte pingetega elektroodide ehitamine on tehniline proovikivi:ioonid on ülitundlikud elektrivälja mürade suhtes ja liiga aeglane ionide liigutamine piirab arvutuse kiirust. Kui need probleemid lahendada, siis võivad ioonidest saada parimad kvantarvutid.

Paljulubavaid platvorme on veel teisi. Veidi üllatavalt on areenile ilmunud laenguta aatomid. Eelmisel aastal avaldasid seni mahukaima veaparanduse demonstratsiooni Harvardi ülikooli ja iduettevõtte Quera meeskond. Nad kasutasid 280 aatomit optilises löksus, salvestasid igauhte ühe füüsilise kvantbiti ja tegid esimesena arvutusi 48 veaparandatud loogilise kvantbitiga. Nende loodud süsteemis saab optilise löksu kuju kiirelt arvutiga muuta ja see võimaldab eraldi kõiki aatomeid soovi järgi liigutada. Nõnda saab valida, millised aatomid omavahel interakteeruvad olenemata nende algsest asukohast. Seetõttu saavad neutraalsed aatomid vabamalt liikuda, kaugete aatomitega saab kergelt arvutada ning nendega on võimalik kasutada keerukamaid veaparanduskoodi, mis on selle platvormi suure eelis. Samas võib aatomite liigutamise kiirus liialt piirata arvutuse kiirust ja võib-olla muutub tehniliselt raskeks teha homogeenne optiline löks tuhandetele aatomitele, piirates sellise kvantarvuti skaleeritavust.

Kokkuvõte

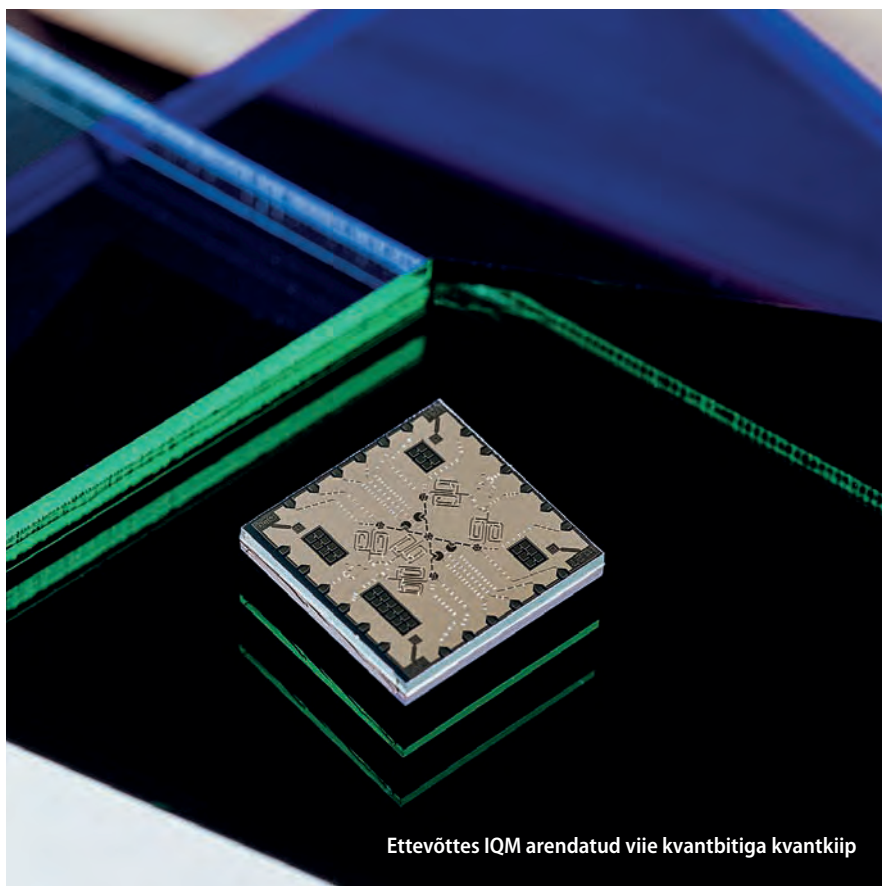
Veel ei ole teada, milline riistvaratüüp saavutab esimesena kvantkasu. Selleks on vaja üliväikest veamäära, palju kvantbitte ja kiireid operatsioone. On väike võimalus, et piisab mõnest uuest algoritmist, paarisajast kvantbitist, vaid üks suurusjärk väiksematest veamääradest, vealeevendusest ja ehk teatab keegi kvantkasust juba järgmise aasta jooksul. Kui läheb vaja ka veaparandust ja väikeste lahendamata ülesannetele leitakse vastus hoopis näiteks masinõppega, võib vaja olla miljoneid kvantbitte. Valdkonna rahastus võib koos praeguse õhinaga taanduda ja kvanteduks võib kuluda ka kümneid aastaid. Kvantinfo tehnoloogia areneb praegu väga kiiresti – eespool mainitud rekordid pärinevad peaaegu kõik sellest aastast! Kui saavutatakse kvantkasu, siis muutub ka meie maailm ja igapäevaelu kindlasti paremuse poole. •

Kvantbitt ja arvutus

Informatsioon koosneb jagamatutest tükkidest ehk bittidest. Peale kahe tavabiti võimaliku väärtuse võib kvantbiti olek olla nende kombinatsioon ehk superpositsioon. Mõistmaks kvantinformatsiooni, on väga tähtis teada, et võimalikke superpositsioonolekuid, ka selliseid, kus kvantbiti olek on ühesugune mõlemas biti olekus, on lõpmata palju. Samas on võimalik neid olekuid siiski üksteisest eristada. Sama kaaluga superpositsioonolekute erinevust nimetatakse faasiks.

Peale üksikute kvantbittide superpositsioonide on olemas kvantbiti registrite olekute superpositsioonolekud. Kui registri olekust ei saa täielikku ülevaadet, kirjeldades üksnes eraldiseisvate registriosade olekuid, nimetatakse neid registriosasid põimituks. Põimolekud sarnanevad tavainfo korrelatsioonidega, aga võimalike põimolekute ja tavaliste korrelatsioonide suhe suureneb kvantbittide arvuga eksponentsiaalselt. Seega, kvantregistrisse mahub palju tavalist infot ja see võimaldab lahendada ülesandeid, tehes palju vähem tehteid.

Tähtsaim kvantalgoritmi osa on arvutuse lõpp: vastuse väljalugemine ehk kvantregistri mõõtmine. Definitsiooni järgi koosneb meie tavamaailma probleemide kasulik vastus tavalistest bittidest, mitte kvantbittidest. Selleks et väljundbittides oleks õige osa registris peitunud kvantinformatsioonist, tuleb registri olekuruumis seada kvantinfo võimalike väljundbittide suhtes nõnda, et eri faasidega superpositsioonolekud omavahel kasulikul moel interfereeruksid. Algoritmid, mis seda ei kasuta, ei ole tavaarvuti algoritmidest võimsamad. Selle interferentsi tekitamine on kasuliku algoritmi leiutamise kõige tähtsam osa. •



Ettevõttes IQM arendatud viie kvantbitiga kvantkiip

Autor tänab Mari Tagelit, Roland Matti ja Ants Remmi, kes on aidanud kaasa artikli valmimisele.

Johannes Heinsoo (1989) on füüsik, kes töötab juhtiva kvantinsenerina Euroopa suurimas kvantarvutiosi tootvas ettevõttes IQM. 2019. aastal kaitsenud Šveitsi föderaalset tehnoloogiainstituutis Zürichis doktoritöö ülijuhtivatest kvantbittidest kvantarvuti ja selle juhtarkvara arendamise kohta.

TELESKOOP.EE

VÕTA PAREM TELESKOOP

Bresser Messier NT-130/1000

Exos-1

- D = 130 mm
- F = 1000 mm (f/7,7)
- 6x30 optiline otsija
- 2" fokuseerija üleminekuga 1,25"
- 26 mm Plössl okulaar (suurendus 38x)
- suurim teoreetiline suurendus 260x
- Exos-1 ekvaatoriline monteering
- stabiilne terastorudest kolmjalg
- päikesefilter

549 €



Bresser Messier AR-102/1000 Exos-2

- D = 102 mm • F = 1000 mm (f/9,8)
- 6x30 optiline otsija
- 2" fokuseerija üleminekuga 1,25"
- 26 mm Plössl okulaar (suurendus 38x)
- suurim teoreetiline suurendus 204x
- Exos-2 ekvaatoriline monteering, GoTo valmidusega
- stabiilne terastorudest kolmjalg
- päikesefilter

679 €



Võta julgelt ühendust!

Ostueelne ja -järgne nõustamine eesti keeles.

Digitaalne USB mikroskoop DST-1028 5 Mpix

Arvuti USB pesasse ühendatav suumobjektiiviga mikroskoop, mille pildi saad otse ekraanile kuvada!

- Suurendus 10x-280x
- LED rõngasvalgusti, heledus muudetav
- Sony IMX335 CMOS sensor, 2592x1944 pix
- metallist töölauga statiiv

169 €



Ekraaniga mikroskoop Analyth LCD

Kvaliteedi kontrollimiseks, pindade analüüsimiseks, margikogumiseks jne

- Suurendus: sujuv suum 0,7x-4,5x, ekraanil kuni 52x
- Vaatevälja suurus (17,5x10,0) mm kuni (4,7x2,5) mm
- LED rõngasvalgusti, heledus muudetav
- Toide vooluvõrgust
- Sony IMX335 CMOS sensor, 2592x1944 pix
- Ekraani resolutsioon 1024x600 pix, diagonaal 22,5 cm
- Pildid ja videod salvestuvad SD kaardile

549 €

Juhtmevaba (komplektis on laetavad Li-ion akud). Mälu ja tarkvara andmete analüüsimiseks.

Möödud: 2
50 x 160 x 65 mm.

169 €



CO² indikaator

ruumi siseõhu kvaliteedi hindamiseks

Klassiruumi, elutoa ja muu suurema ruumi õhu kvaliteedi hindamiseks. Möödud: 388 x 43 x 288 mm.

199 €

- CO₂ indikaator, mis annab märku, kui on vaja ruumi tuulutada
- ühik on ppm (parts per million), mille näit võiks jääda alla 1000 ppm; selle näidu ületamisel tuleb ruumi tuulutada
- lisaks näitab seade õhutemperatuuri ja suhtelist õhuniiskust



Skywatcher Starquest 102R

Lihntne klassikaline läätsteleskoop

- D = 102 mm
- F = 650 mm
- punatäpp otsija
- 1,25" diagonaal
- 25 mm (20x) ja 10 mm (50x) okulaarid, suurim teoreetiline suurendus 200x
- EQ/AZ monteering ja kolmjalg on komplektis

359 €



Skywatcher Starquest 130P

Lihntne klassikaline peegelteleskoop

- D = 130 mm
- F = 650 mm
- punatäpp otsija
- 25 mm (26x) ja 10 mm (65x) okulaarid, suurim teoreetiline suurendus 260x
- EQ/AZ monteering ja kolmjalg on komplektis

299 €



MAKSA HILJEM | esto

Osta parem teleskoop ESTO järelmaksuga!

E-pood: teleskoop.ee

Helista: 528 9895

Kirjuta: taevatoru@teleskoop.ee

facebook.com/teleskoop.ee

Taust: NASA/JPL-Caltech/UCLA

Kuidas kvantsensorid aitavad läbi seinte näha

ANDI HEKTOR

Füüsikud on juba 70 aastat teadnud, et looduslikust kosmilisest kiirgusest pärinevad osakesed, mida nimetatakse müüoniteks, võimaldavad sõna otseses mõttes näha läbi seinte. See võime aitaks meil tõhusamalt renoveerida ehitisi, ära hoida hoonete ja sildade ootamatuid varinguid, hooldada tuuma- ja keemiatööstuse seadmeid. Ühtlasi saaks seda kasutada turvalisuse ja meditsiini tarbeks.

Et see unistus igapäevaelus tõeks teha, on vaja väga täpseid ja tundlikke osakestedetektoreid ning keerukaid, sageli tehisintellektil põhinevaid algoritme. Ainult siis suudame väga müra- rohketest andmetest koostada kolmemõõtmelise ruumilise pildi. Selle võimalikkust on näidanud teaduslikud eksperimendid ja Eesti juurtega ettevõttes GScan välja töötatud tehnoloogia. Näiteks on selle tehnoloogiaga ehk müüontomograafia läbi valgustatud Paldiskis asuvate vanade tuumareaktorite sisemus, et neid ohutumat ja odavamalt lammutada.

Järgmise põlvkonna tundlike detektorite ja kiirete algoritmide puhul võib meil juba lähitulevikus väga palju kasu olla kvantefektidest. Enne kui hüppame

pea ees kvantmaailma, võtame kokku selle, kuidas müüonid aitavad meil seintest läbi näha ehk kuidas toimib müüontomograafia.

Elektroni raskem kaksik

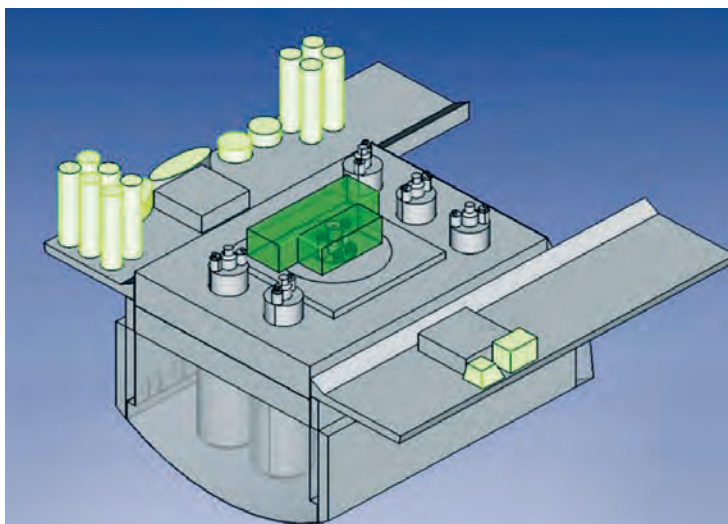
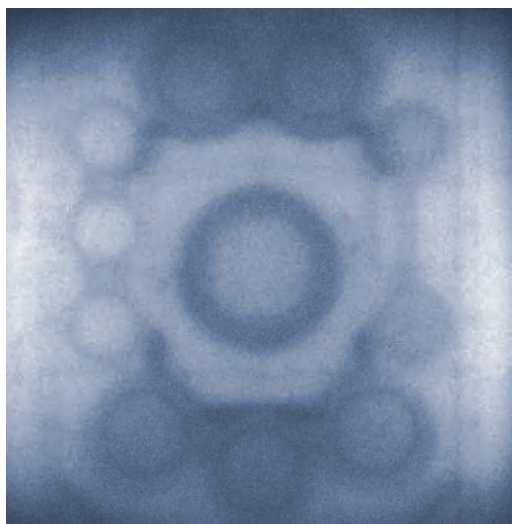
Alustame sellest, kust looduslikud müüonid pärinevad. Müüonikiirgus tekib atmosfääris umbes 25–30 km kõrgusel maapinnast, kui kosmilised kõrge energiaga osakesed (enamasti prootonid ja heeliumi aatomituumad) pommitavad Maa atmosfääri. Sellise osakese kokkupõrkel atmosfäärigaaside aatomituumas oleva prootoni või neutroniga tekib väga palju piioneid. Nende osakeste eluiga on ülilühike, enamik neist laguneb kiiresti müüoniks.

Ka müüon ise on ebastabiilne

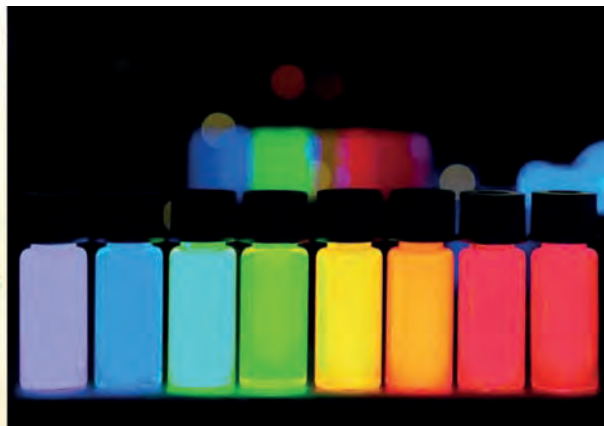
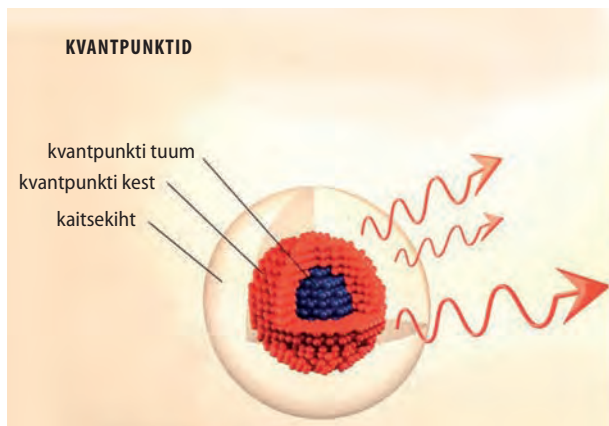
osake, püsib kõigest kaks mikrosekundit. Kuna tekkivad müüonid on väga suure energiaga, liiguvad need peaaegu valguse kiirusega. Piisab paarist mikrosekundist, et nad jõuaksid maapinnani ning isegi peaaegu kilomeetrini maapõues ja meresügavikes.

Müüon on väga põnev osake. Ta on ligi 200 korda raskem kui elektron, aga väga sarnane sellega, mõnikord öeldakse tema kohta „elektroni raskekaaluline vend“. Aga just sellest tuleneb tema kaks

Müüon on väga põnev osake. Ta on ligi 200 korda raskem kui elektron, aga väga sarnane sellega, mõnikord öeldakse tema kohta „elektroni raskekaaluline vend“.



Need pildid on näide selle kohta, milliseid võimalusi loovad tundlikud ja täpsed osakestedetektorid. Vasakpoolsel pildil on looduslike müüonite abil loodud kujutis Eestis Paldiskis asuva tuumareaktori sisemusest. Reaktorit ei tohi avada, sest see on radioaktiivne ja pealegi täidetud kivistunud betooniga. Paremal pool on näha reaktorist koostatud kolmemõõtmeline pilt, kus müüonitega mõõdetud andmete põhjal on loodud inseneridele sobiv nn CADI-mudel reaktorist. Aastal 2023 Eesti ettevõttes GScan ellu viidud projekt oli ainulaadne: esimest korda ajaloos kasutati müüontomograafiat, et muuta reaktorite lammutamine ohutumaks



ANTIPOFF / WIKIMEDIA COMMONS

Nn kvantpunktid on üks näide, kuidas kvantefektid aitavad sensoreid efektiivsemaks muuta. Kvantpunkt on pooljuhtmaterjalist terake, mille mõõtmed on nanomeetrises skaalas (veidi väiksemad viirustest). Muutes selle terakese suurust, muutub näiteks osakeste kiiratud valguse värvus. Kuna füüsikud ja keemikud oskavad luua selliseid tootmisprotsesse, kus tekkivate kvantpunktide suurust saab sobivalt muuta, võimaldab see luua väga peenelt häälestatud sensoreid ja luminofoore

väga head omadust. Esiteks, suure massi tõttu suudab müüon läbida sadu meetreid materjale ilma seal neeldumata. Teiseks, tänu oma laengule (nagu ka elektroni) on teda üsna lihtne mõõta. Selleks saab kasutada näiteks nn stsintillaatori tüüpi detektoreid, kus läbilendav laetud osake tekitab spetsiifilise valgus-sähvatus, mida mõõdetakse näiteks tundliku pooljuhtelemendiga. Aga võib kasutada ka pooljuhtidel või hoopis gaaslahendusel põhinevaid detektoreid.

Näitab ka keemilist koostist

Kui müüonid mingist materjalist läbi lähevad, siis väike osa neist siiski neeldub, aga enamik „hajub“. Hajumine on nähtus, kus osake muudab veidi suunda võrreldes algse liikumissuunaga. Kombineerides hajumist ja neeldumist saadud andmeid, on võimalik luua kolmemõõtmeline pilt objektist, mida müüonid on läbinud. See võib kõlada veidi ulmeliselt, aga tegelikult sarnaneb sellega, kuidas moodsad röntgentomograafid ehk kompuutertomograafid teevad meie sisemusest arsti juures käies ilusa kolmemõõtmelise pildi.

Müüontomograafial on veel üks suur eelis röntgenipildi ees: müüonpildil on peale aine tiheduse näha aine aatomarne (lihtsustatult, keemiline) koostis. Just seetõttu on müüontomograafiaga väga sobilik avastada näiteks roostet või mis tahes keemilisi muutusi. Tundub olevat pisiasi, aga ainuüksi rooste tekitab inimkonnale igal aastal ligi triljoni euro eest kahju. Kui see õigel ajal avastada, saaks kokku hoida palju raha ja säästa inimelusid, vältides rajatiste kahjustusi ja tööstusõnnetusi.

Kvantsensorid

Oleme nüüd läbi vaadanud müüontomograafia põhialused. Kust tulevad aga mängu kvantefektid, mida lubasime pealkirjas? Kui kõik ausalt ära rääkida, siis ka senised müüonisensorid, näiteks mainitud stsintillaatorid, põhinevad kvantefektidel. Ent praeguses kirjutises tahame rääkida nn kvantsensoritest ehk sensoritest, kus rakendatakse kvantfüüsika efekte üsna kontsentreeritud kujul. Need süsteemid kasutavad selliseid kvantefekte nagu kvantpõimitus, -interferents ja teised väga isoleeritud kvantnähtused.

Miks tasub niisuguseid kvantseisundeid kasutada sensorites? Sest need on ülitundlikud, iga väikseimgi väline segamine rikub kvantoleku! Teoreetiliselt võiksid need sensorid olla väga väikesed, ülitundlikud ja ülitäpsed. On ainult üks „väike“ probleem: füüsikud alles õpivad, kuidas ja mis tehnoloogiaga luua keerukusteta kvantsensoreid. Praegused kvantsensorid nõuavad materjalide jahutamist väga madalate temperatuurideni ja kõrgvaakumit. Selliseid tingimusi on kallid ja keerulised luua, ühtlasi ei suudeta luua väga väikseid sensoreid. See on peapõhjus, miks kohatame kvantsensoreid igapäevaelus väga harva.

Kuna keemikud ja füüsikud oskavad nanoosakeste suurust vajadust mõõda muuta, saab toota väga spetsiifiliste ja huvitavate omadustega kvantpunkte.

Kvantpunktid

Astudes sammukese tagasi, võib öelda, et lihtsamaid kvantnähtusi võimendavad sensorelemendid on juba leidnud tee argirakendustesse. Üks säärane on nn kvantpunkt. See on pooljuhtivast materjalist nanoterake, mis on nii väike, et selles hakkavad peale materjali omaduste rolli mängima osakese suurusest tulenevad kvantnähtused. Kuna keemikud ja füüsikud oskavad nanoosakeste suurust vajadust mõõda muuta, saab toota väga spetsiifiliste ja huvitavate omadustega kvantpunkte.

Üks kvantpunktide tuleviku-rakendus on väga efektiivsed stsintillaatorid, millega mõõdetakse laetud osakeste, näiteks müüonite hulka. Ka Eesti ettevõttes GScan välja töötatud müüon-detektorites kasutatakse spetsiaalseid stsintillantest läbipaistvast plastist valgustjuhtivaid kiude, et täpselt mõõta detektorist läbi lendava müüoni trajektor. Tulevikus võiks kvantpunktidel põhinevad materjalid muuta selle lahenduse tunduvalt täpsemaks, kompaktsemaks ja ka odavamaks.

Eespool rääkisime sellest, kuidas kvantnähtused aitaksid luua paremaid sensoreid ja detektoreid. Aga kvantmaailm võib ühtlasi aidata mõõdetud andmetest koostada kolmemõõtmelist pilti. Siin saaksid meile appi tulla kvantarvutid. Selle põneva loo jätame mõneks järgmiseks korra. •

Andi Hektor (1975) on füüsik, ettevõtte GScan kaasasutaja ja strateegiajuht.

Üksikuid footoneid püüdes

EGON ASTRA, TOOMAS KÜBARSEPP, ANDREI POKATILOV, MATT RAMMO, MEELIS-MAIT SILDOJA

Metrosert loob mõõtemetodeid, mis toetavad kvanttehnoloogia arendamist.

Kuvand metroloogist kui sinises kitlis isikust, kes askeldab ringi kaalupommidega, on visa kaduma, ehkki ka mõõteteadusega tegelejate seas on nobeliste.

Näiteks 1920. aastal sai Charles Édouard Guillaume, omaaegne rahvusvahelise kaalude ja mõõtude büroo direktor (*Bureau International des Poids et Mesures*, BIPM), Nobeli auhinna nikli ja terase sulamite (invar, elinvar) leiutamise ja omaduste uurimise eest. Tänu Guillaume'i uuringutele paranes navigatsioon, sest invarit, millel on nullilähedane soojuspaisumistegur, hakati kasutama laevade kronomeetrites, kus ühtlast temperatuuri on väga keeruline hoida.

BIPM avaldas 2019. a kauakestva rahvusvahelise koostöö tulemusena rahvusvahelise mõõtühikute süsteemi (SI) uued definitsioonid, mille järgi kõik seitse põhiühikut rajanevad füüsikaliste põhikonstantide fikseeritud arvvaartustel. Uurides ja rakendades kvantfüüsikalisi nähtusi, võimaldavad fikseeritud vaartused täpselt väljendada põhiühikute arvvaartusi.

Kvantfüüsikalistel nähtustel põhinevad mõõtemetodid on kvanttehnoloogia arengu alus. Kvantarvutid, eri rakendused kvantsides, uuenduslikud sensorid, arenev meditsiinitehnoloogia ja aja ülitäpne mõõtmine tuginevad meie võimele mõista kvantfüüsikalisi nähtusi ning seeläbi arendada välja veel täpsemaid mõõtemetodeid. Peale selle on kvantmetroloogiat vaja, tõestamaks hüpoteesi – kas väidetav protsess rajaneb tõepoolest kvantnähtustel –, mille saab seejärel teoorias ja praktikas kasutusele võtta. Kvantmetroloogiaga tegeletakse ka Eestis, täpsemalt ASis Metrosert, mis etendab Eesti metroloogia keskastutuse osa.

Üksikute footonite püüdmine

Metrosert võttis kvantmetroloogia süvenenumalt käsile rahvusvahelises projektis „Üksikute ja põimitud footonite allikad kvantmetroloogia tarbeks“ (*Single- and entangled photon sources for quantum metrology*). Projekti viis Met-

rosert ellu koostöös keemilise ja bioloogilise füüsika instituudi, Aalto ülikooli, Tšehhi metroloogiainstituudi, Berliini tehnikaülikooli ja Erlangen-Nürnbergi Friedrich-Alexanderi ülikooliga, saavutades suutlikkuse mõõta üksikute footonite voogusid 200 – 10 000 kcps (tuhat loendamist sekundis) täpsusega ± 10 kuni $\pm 2\%$. Selline nivoovahemik lubab uurida valdavat osa üksikute footonite allikaid ja kalibreerida laviin-detektoreid, mis on vajalikud, arendamaks kvanttehnoloogilisi seadmeid.

Projekti käigus arendasime välja Põhja-Euroopas ainulaadse mõõtesüsteemi üksikute footonite allikate usaldusväärseks mõõtmiseks. Selle aluseks olev skeem on alloleval joonisel.

Üksikutel footonitel põhinev sidetehnoloogia

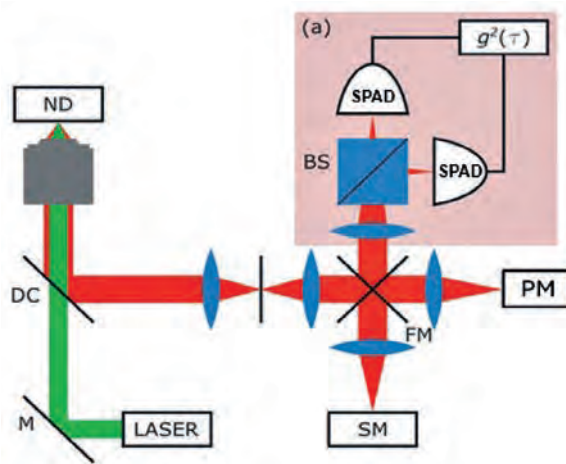
Tuleviku kvantvõrgud kasutavad kvantmehaanika põhimõtteid kvantinfo (kvantbittide) edastamiseks eri asukohade vahel. Kvantinfo kandjaks sobivad hästi üksikud footonid ehk valgusosakesed nii optilises kius kui ka vabas ruumis. Kvantvõrkudel on suur potentsiaal kutsuda esile pööre sellistes valdkondades nagu turvaline kommunikat-

sioon, hajutatud kvantarvutus ja kõrgtäpsusega mõõtmine.

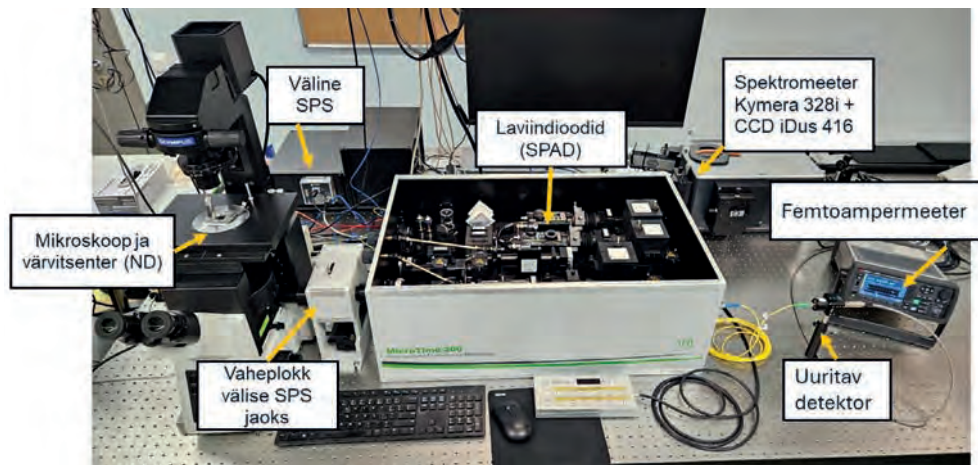
Üks küpsemaid kvantvõrkude rakendusi on kvantvõtme jaotamise (*Quantum Key Distribution*, QKD) tehnoloogia, mis viib küberturvalisuse täiesti uuele tasemele. Turule on ilmunud uued seadmed, mis loovad kvantvõtmeid tunnustatud protokollide järgi. Kui kvantvõtme jaotamise protokollide tehnilisest teostusest kaldutakse kõrvale, võib kvantside sattuda turvariski. Kvantmetroloogia aitab veenduda, et seadmed toimivad usaldusväärselt.

Kvantside projekti EstQCI (*Estonian Quantum Communication Infrastructure*) käigus uurib Metrosert QKD-seadmepaari, kuhu kuulub kvantvõtme jaoks sobivaid footoniolekuid genereeriv ja edastav seade (saatja) ning footoneid loendav ja analüüsiv seade (vastuvõtja). Footonite olekuid genereeritakse umbkaudu lainepikkusel 1550 nm ja eeldatavasti nõrkadel voogudel < 10 Mcps (miljonit loendust sekundis). Seadmepaar on omavahel ühendatud optilise kiuga, mille pikkust saab muuta, kasutades muudetava väärtusega optilist nõrgendajat.

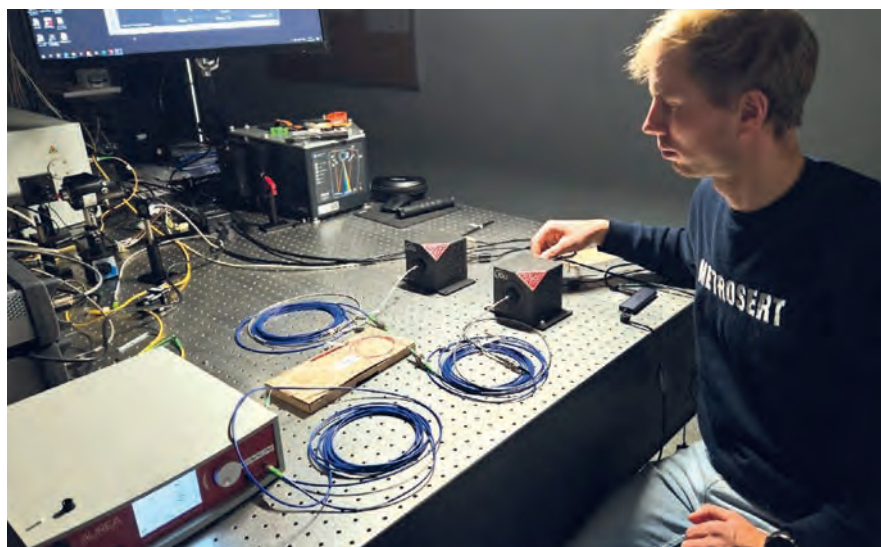
Selleks et saatjast välja footonivoo



Mõõteskeem üksikute footonite allika metrooloogilise iseloomustuse kohta. Hanbury Browne ja Twissi interferomeetriga (osa a) määratakse uuritava allika teist järku korrelatsioonifunktsioon $g^2(\tau)$, pärast seda mõõdetakse allika spekter spektromeetriga SM ja valgusvoo absoluutne väärtus võimsusmõõturiga PM. Mõõtesüsteemi saab kasutada lainepikkuste vahemikus 400 nm kuni 1000 nm. Joonisel on värvišenter teemandis (ND)



Üksikute fotonite mõõteskeem



ASI Metrosert teadur Matt Rammo kahe IR-SPAD-detektoriga uurimas allikat, mis peaks väljutama 240 700 põimfotonite paari sekundis

olemust uurida, rakendab Metrosert kahte üksikute fotonite laviindetektorit IR-SPAD (vt foto).

Reguleeritava suikeajaga kuni 80 ms on võimalik 10-protsendise efektiivsusega määrata kindlaks fotonite saabumist müratasemel alla 500 loendust sekundis. Kui rakendada katikut, saab mõõta sisendsignaali kuni kordussageduseni 100 MHz. Detekteerimise tõhusust on võimalik suurendada kuni 35 protsendini, kuid signaali ja müra suhe halveneb. Suhteliselt suur müratase takistab IR-SPAD kasutamist footoneid eraldava (*photon number resolving*, PNR) detektorina. Kui soovitakse üksikute fotonite statistikat otseselt mõõta, siis võib rakendada kas siirdeääretajurit (*Transition-Edge Sensor*, TES) või ülijuhtiva nanotraadiga üksikfoton-detektorit (*Superconducting Nanowire single photon detector*, SNSPD).

SNSPD on ülitäpne optiline detektor, mis suudab üksikuid footoneid tuvas-

tada väga suure tundlikkusega ja väga tõhusalt, võimaldades kiiret reageerimisaega ja suurt ajalohutust. SNSPD-detektoris kasutatakse õhukest ülijuhtivat nanotraati, mis jahutatakse temperatuurini 2,5 K. See on eelis võrreldes TES-detektoriga, mida tuleb jahutada temperatuurini 100 mK.

Metrosert kasutab SNSPD-detektorit, millega mõõdame nõrku valgusvoolusid nii laborioludes kui ka tegelikes fiiberoptilise kommunikatsiooni ehk valguskaabli võrkudes. Samuti võimaldab ülitundlik SNSPD-detektor kombineerida vastuvõtja omaduste, näiteks detekteerimise piire, millel põhineb seadme paari kvantvõtme loomine väidetavalt QKD-protokolli järgides.

Üksikute fotonite mõõtmise jälgitavus

Mõõtetulemusi üksikute fotonite tasemel tuleb esitada tunnustatud ja arusaadaval viisil, st rahvusvahelise mõõtuühikute süsteemi (SI) ühikutes. Selleks et

siduda fotonite loendusrežiimis töötavate detektorite signaal SI-süsteemi ühikutega, saame rakendada kalibreeritud nõrgendaja meetodit. Selle tarbeks oleme kirjeldanud ja konstrueerinud mitu nn tunnel-detektorit, millel on mõõtmiste seisukohalt oluline omadus: need fotodetektorid võimaldavad mõõta optilise kiirguse väärtust ja samal ajal jälgida selle ajalisi stabiilsust. Tunnel-detektoris neeldumata jäänud nõrga valgusvoo, mille optiline võimsus on hästi teada, saab suunata üksikute fotonite loendurisse ning registreerides elektrilist signaali, selle lugemist vajaduse korral korrigeerida.

Nõrku fotonvooge mõõtes on tähtis täpselt mõõta detektorite genereeritud elektrivoolu väikseid tasemeid. Moodus ülitäpsed vooluallikad põhinevad keerukatel eksperimentidel, kaasates mitut kvantefektil töötavat seadet. Seejärel arendatakse praktilisemat moodust, kasutades täiustatud elektronide allikaid ja täpset toatemperatuuril toimivat võimendit, millega saab elektrivoolu võimendada kuni 1000 korda. Elektrivoolu pärast võimendit saab taas täpselt mõõta Josephsoni ja Halli seadmetega, mis põhinevad kvantefektil.

Niisugune ülistabiilne madala müratasemega vooluvõimendi (*Ultrastable Low-noise Current Amplifier*, ULCA) on olemas ka Metroserdis. See võetakse kasutusele, kui on vaja genereerida elektrivoolu väikseid tasemeid ning tagada täppisseadmete, sh ioniseeriva ja mitteioniseeriva kiirguse mõõtevahendite usaldusväärsus.

Kokkuvõtteks

Tõenäoliselt saavad üsna vähesed detailiselt aru kvantfüüsikal põhinevate tehnoloogiliste arenduste tööpõhimõtetest. Uuendusliku tehnoloogia aluseks olevaid kvantfüüsikalisi nähtusi ei saa silmaga näha ega käega katsuda. Kvantfüüsika nähtustel rajanev metroloogiline uurimistöö on vajalik veendumaks, et arendatud seadmed töötavad just nii, nagu ette nähtud. Metrosert osaleb edaspidigi kvantmetroloogia uurimistöös, et ka Eestis leiduks teadlasi, kes sellist tehnoloogiat mõistavad ja suudavad edasi arendada ning et neil teadlastel oleks järelkasvu. •

Egon Astra (1989), Matt Rammo (1988) ja Meelis-Mait Sildoja (1981) on Metroserdi teadurid. Toomas Kübarsepp (1965) on Metroserdi juhtivteadur. Andrei Pokatilov (1978) on Metroserdi elektriliste suuruste riigietaloni labori vanemteadur.

***Teadus ei vaja müstikat ja
müstika ei vaja teadust.
Inimene aga vajab mõlemat.***

Fritjof Capra

Kvantmüstika

MARTIN VÄLLIK

Kvantfüüsika on üks tänapäeva teaduse alustalasid, mille kehtivus on leidnud hulgaliselt kinnitust ja mille saavutusi kasutame edukalt oma igapäevaelus, näiteks laserid, diodid ja transistorid peenelektroonikas, sh fotosensorid kaamerates, LED-lambid, päikese-paneelid, tuumamagnetresonants-kuvatehnika jne. Kvantmehaanika abil mõistame paremini keemiliste sidemete olemust ja näiteks fotosünteesi. On aga üks suur lahendamata ning sügavalt inimlik probleem, millele on pikalt vastust otsitud: mis on teadvus ja kuidas füüsilisest protsessist saab kogemusi. Me kogeme maailma ja teadvustame oma kogemust.

Mõnikord elame läbi kogemusi, millele ei oska ratsionaalset selgitust anda, mõnikord nimetame neid müstilisteks kogemusteks.

Müstilisus viitab arusaamadele ja tegevustele, mille siht on tunnetada ühtsust universumiga või kõrgema (vaimse, üleloomuliku) väega, mõista suuri saladusi ja varjatud tõdesid. Teadus pürgib samuti lahendama seni varjatud saladusi, kuid need kaks teed erinevad meetodi poolest. Teaduses saab igaüks põhimõtteliselt katseid korrata ja üle kontrollida, müstiline kogemus on aga individuaalne, erakorraline ja kordumatu, see on nagu otsetee teadmiste algallika ja kõigi tagajärgede juurpõhjuse ni.

Kvantfüüsika on ühelt poolt edukas nähtuste selgitaja, teisalt aga keeruline, matemaatiline ja abstraktne teadus, mille selgitamine makromaailma nähtuste abil või tõlkimine tavakeelde põhjustab paradokse. See jätab kvantfüüsikast mulje kui veidrast ning imesid ja müstilisi kogemusi õigustavast distsipliinist.

Kvantfüüsika ja müstika võimalikud seosed said esmalt läbi vaieldud juba kvantfüüsika kujunemise aegadel 1920. ja 1930. aastatel. On teada, et Erwin

Schrödinger ja Werner Heisenberg olid tuttavad idamaiste müstiliste õpetustega, kuid oma füüsikasse nad neid otsest ei seganud. Ajastu üldisemalt oli müstikale avatud. Kuivõrd teosofiilised ja spiritistlikud harrastused olid rahvas seas parasjagu populaarsed, siis Albert Einsteini arvates paistsid need ideed imbuvat ka mõne teadlase arutlustesse kvantfüüsika tähenduse üle. Einstein ise hülgas kategooriliselt igasugused müstilised selgitusviisid, mida Niels Bohr ja Heisenberg näisid tema meelest kandvat.

VAATA SIIA!

**Vaatleja efekt
on füüsikas kasutatav termin kirjeldamaks protsessi,
mille käigus vaatlemine häirib vaadeldavat süsteemi**



INTERNETIMEE REDDITIST

„Meele-ollus“

Õli valas tulle Einsteini relatiivsusteooria väsimatu tutvustaja Arthur Eddington, kes kõrvutas kvantfüüsika mittekausaalsust üleloomulikkuse toimimisega ja täitis universumi primaarse „meele-ollusega“ (*mind-stuff*), kus välismaailm on teadvuse tuletis. Inglisekeelses maailmas, kus Eddingtoni sõnal oli suur kaal, seostati Einsteini müstiliste arusaamadega, mis näis rahumeeli siduvat inimeste igipõlist igatsust imede ja müstika järele ning teaduslikku maailmapilti.

Einstein kulutas hulga aega ja tekstiridu, et sellist väärtõlgendust tõrjuda. Koos oma mentori ja sõbra Max Planckiga kirjutas ta kriitilisi lugusid sellest, kuidas isegi haritud inimesed on huvitatud uutest religioonidest, mis jäävad segase müstitsismi ja toore ebaus

**Kvantfüüsika on ühelt poolt
edukas nähtuste selgitaja,
teisalt aga keeruline,
matemaatiline
ja abstraktne teadus.**

vahele, ning olgu teooria kuitahes ebamõistlik, leidub ikka keegi, kes seda tõena võtab ja sellesse usub.

„Miks peaks keegi võtma vaevaks tähti uurida, kui ta ei usu, et tähed olemas on?“ päris Einstein retooriliselt vastuseks tollal populaarsete ida filosoofiate vahendusel kerkinud küsimusele, kas reaalsus on olemas või on see vaid meie meelte ettekujutus ja teadvuse tuletis.

„Phüüsikud“

Moodsama aja kvantmüstika algust seostatakse John von Neumanni, Eugene Wigneri ja eriti Capra nimega. Fritjof Capra märgiline teos „Füüsika ja tao“ püüab siduda moodsat füüsikat ja 1970. aastatele omast hipivaimust kantud psühheedeletset ja idamaise hõnguga tunnetust. Suur osa inspiratsioonist selle raamatu tarbeks tulenes vestlustest Werner Heisenbergiga. Capra oli seotud ka ühendusega Fundamental Fysiks Group (inglise kirja pildi eripära järgi võiks eesti kirjakuju olla 'fundamentaalne phüüsikarühm'), kus arutati kvantfüüsika filosoofilisi järeldusi ja praktilisi rakendusvõimalusi. Üheks uurimissuunaks kujunesid paranormaalsed nähtused, näiteks kaugnägemine ja telepaatia, mida püüti õigustada kvantfüüsika abil ja mis pakkusid huvi ka luureametkondadele.

Siit järgneb lõputu rida New Age'i ('uusvaimsus') teooriaid ja praktikaid, eneseabikursusi ja alternatiivmeditsiini pseudoteaduslikke selgitusi, kus kvantfüüsikalised selgitusparadoksid ja vabatolgendused rakendatakse kommerts-vankri ette ja püütakse jätta eksitavat muljet, et kõigel sellel on midagi pistmist teaduse ja teadvusega.

Klassikaline katse, mille abil illustreeritakse teadvuse mõju, on elektroni de kaksikpilu katse. Elektrone tulistatakse ükshaaval läbi kaksikpilu ja nad jätavad ekraanile lainetele omase interferentsipildi. Kui aga mõõta, kummast pilust elektron läbi lipsab, kaob interferentsipilt ja nähtav jäljend on omane osakestele. Elektroni lainefunktsioon kollapseeerub ja tema lainetõenäosuslik ebamäärasus (superpositsioon) muutub korraga konkreetseks paiknemiseks tänu faktile, et tema teekonda vaadeldi. Seega, vaatlusakt – teadvuslik tegevus – muutis kvanttasandi reaalsust. Sellest saab teha vaid ühe järelduse: teadvus mõjutab ja lausa loob reaalsust.

Siit edasi astudes saame tuletada, et

kasutades oma teadvust teatud moel, võime reaalsust muuta soovitud suunas: parandada tervist, luua õnnelikke suhteid, meelitada ligi küllust (raha), saada ligi infot, mis on peidus mineviku või tuleviku horisondi taga.

Libameditsiin

Kvanttervendamine on nn energia-meditatsiooni haru, mis kasutab enesekuvandis kvantfüüsikast pärit mõisteid loomingulisel moel. Kandva idee järgi ei ole materia kvanttasandil mitte aine-line, vaid energia ja vibratsioon, ning haigus on häiritus selles energiaväljas. Kuivõrd mõttega on võimalik kvanttasandil muutust esile kutsuda, siis haiguse ravi seisneb õigel viisil õigete mõtete mõlgutamises, et tagada DNA emiteeritud footonite põimitus kvantteadvusväljaga.

Kvantnähtustega püütakse selgitada ka näiteks homöopaatia toimimist. Homöopaatia on 18. sajandi lõpuküm-nendil välja mõeldud tegevus, mis püüdis kümnete teiste süsteemide seas saada jälile haiguste põhjustele ja leiutada raviviise. Keemia, füsioloogia, füüsika ja teiste teadusharude ning kliinilise praktika areng tõrjusid homöopaatia unustusse koos humoraalteooria ja aadrilaskmisega. Ometi on homöopaatia hauast üles tõusnud ja tal on praegusa-jal teatav kultuslik järgijaskond. Üleloomulike nähtuste ja maagiaga pole tänapäeval viisakas oma lemmikumb-luteooriat seletada, kui soovitakse jätta teaduslikku muljet, seepärast tarvita-takse nüüd kvantfüüsikast laenatud sõnavara.

Eestis kasutavad mõned „terapeu-did“ seadmeid, mille nimes esineb *kvant* või *quantum*. Nende seadmetega diagnoositakse seadusvastaselt inimeste ja lemmikloomade tervise seisundeid ja bioresonantsiga ravitakse kõiki haigusi. Turvaline on sellistest teenustest eemale hoida. Skeptik.ee tegevuse käigus sattus vaatluse alla „Jaapanlaste nano-tehnoloogia baseeruvad Kvantripatsid, mis võimendavad skalaar-energiat“ (kirjaviis muutmata).

„Pealtnägija“ saates sai korraldatud katse selle toimimise kohta ja loodetavasti veendus kogu eesti rahvas, et toode ei toimi.

Kvantravitemise suurguruks võib pidada Deepak Choprat, kelle raamatuid on avaldatud ka eesti keeles. Tema tekstid kubisevad teaduskõlalistest vormelitest ja sõna „kvant“ esineb seal

TEHISARU



Pilt kujutab AI arusaama inimese teadvuse ühendusest mikro- ja makrokosmosega

sageli. Sellist tekstiloomet on nimetatud tehnolobaks: laused, mis koosnevad tehnilistest ja teaduslikest sõnadest, aga ei tähenda midagi. Unikaalse kvantfüüsika tõlgenduse eest määrati Choprale 1998. aasta satiirilise Ig Nobeli auhind füüsikas. Üks alternatiivseid fakte kajastav portaal on spekulatsioon, et kvantfüüsika põhjal võib teha järelduse: viimaste aastate vähese lumega talved ei ole tingitud mitte niivõrd inimtekkelisest kliimasoojenemisest, vaid meie kollektiivsest uskumusest inimtekkelise kliimasoojenemise kohta. Mediteerimisega tegelevad ringkonnad korraldavad regulaarseid ühismediteerimisi, et saavutada maailmas rahu. Üks selgitus selle toimimise kohta sisaldab kvantfüüsika tõlgendust, et ühiselt oma mõtte suunamine loob reaalsust ehk kui mediteerida rahu eest, siis saabub maailmas rahu.

Sõna „kvant“ tähendab portsjonit, füüsikalise suuruse väikseimat osa. Nüüdistähendus kujunes 20. sajandi alguses, kui Max Planck püüdis leida võrrandit, millega kirjeldada mustkeha kiirgust. Mingil ajal kaaperdavad kasutu kauba ja teenuste müüjad iga eduka idee, seda lihtsustades ja moonutades. Kui lugeja näeb edaspidi sõna „kvant“, siis tasub olla tähelepanelik ja kriitiline eriti tervisetemaalist kirjutiste korral ja isegi siis, kui seda kasutavad teadlased väljaspool oma pädevusvaldkonda ja soovivad õigustada oma metafüüsilisi uskumusi. •

Martin Vällik (1970) on füüsikaõpetaja ja portaali skeptik.ee asutaja.

Septembri keskelt novembri keskpaigani

■ **17. septembril** startis Canaverali neemelt kosmosejõudude stardikompleksist kanderakett Falcon 9 ja viis orbiidile kaks Euroopa satelliitnavigatsiooni-tehiskaaslast Galileo.

■ **20. septembril** startis Hiina Taiyuani kosmosekeskusest kanderakett Long March 2D, et viia orbiidile Hiina firma Chang-guang Satellite Technology kuus Jilin-sarja kaugseiretehiskaaslast. Kuus tundi hiljem startis Xichangi stardikompleksist tahkekütusrakett Kuaizhou 1A ja viis orbiidile neli Tianqi-sarja sidesatelliiti.

■ **20. septembril** startis Vandenbergi kosmosejõudude baasist kanderakett Falcon 9, mis viis orbiidile 20 Starlinki sidesatelliiti.

■ **21. septembril** startis Uus-Meremaa Rocket Labi stardikompleksist kanderakett Electron ja viis orbiidile viis Prantsuse firma Kinéis sidesatelliiti.

■ **23. septembril** eraldus kosmosejaamast ISS kosmoselaev Sojuz MS-25, mis maandus kolm ja pool tundi hiljem Kasahstani stepis. Nõnda toodi Maale tagasi kosmonaudid Oleg Kononenko ja Nikolai Tšub ning NASA astronaut Tracy Caldwell Dyson. Seekord kestis kosmonautide lend rekordiliselt 374 ööpäeva ning Dyson viibis ISS-is 184 ööpäeva. Kononenko summaarne kosmoses viibitud aeg on samuti rekordiline: 1110 ööpäeva, 14 tundi ja 56 minutit.

■ **24. septembril** startis Hiina Jiuquani kosmosekeskusest tahkekütusrakett Kinetica-1 ja viis orbiidile radartehiskaaslast CAS-01 ja CAS-02 ning Jilin-1 ning kaks Yunyao-1 meteoroloogiatehiskaaslast.

■ **24. septembril** startis Hiina idaranniku lähedal ujuvalt



CAS SPACE / WIKIPEDIA

Hiina tahkekütusrakett Kinetica-1

stardiplatvormilt kanderakett Jielong-3, et viia orbiidile kaheksa kaugseiretehiskaaslast.

■ **25. septembril** startis Vandenbergi kosmosejõudude baasist kanderakett Falcon 9, mis viis orbiidile 20 Starlinki sidesatelliiti.

■ **26. septembril** startis Jaapani Tanegashima kosmosekeskusest kanderakett H-2A ja viis orbiidile radarsatelliidi IGS-Radar 8.

■ **28. septembril** startis Canaverali neemelt kosmosejõudude stardikompleksist kanderakett Falcon 9, mis viis orbiidile kosmoselaeva Dragon Freedom, pardal NASA astronaut Nick Hague ja Vene kosmonaut Aleksandr Gorbunov. 29. septembril põkkuti kosmosejaamaga ISS. Tegu oli esimese



NASA JOHNSON SPACE CENTER

SpaceX-i kosmoselaev Dragon Freedom, mille pardal on NASA astronaut Nick Hague ja Vene kosmonaut Aleksandr Gorbunov, läheneb rahvusvahelisele kosmosejaamale

mehitatud stardiga sellelt stardiplatvormilt. Meeskond koosnes vaid kahest liikmest, sest kaks vaba kohta on planeeritud kosmoselaeva Boeing Starlineri meeskonnale, kes ei saanud oma laevaga Maale tagasi pöörduda.

■ **4. oktoobril** startis Canaverali neemelt kosmosejõudude stardikompleksist oma teisele katselennule Cert-2 United Launch Alliance'i uus kanderakett Vulcan Centaur. Lennu esimene etapp kulges edukalt. Kanderaketi viimase astme töotsükli peaks viima selle koos

proovilaadungiga lõpuks helio-tsentrilisele orbiidile.

■ **7. oktoobril** startis Canaverali neemelt kosmosejõudude stardikompleksist kanderakett Falcon 9 ja viis kosmosesse ESA kosmosesondi Hera. Plaan on külastada asteroidi Dimorphos, mille orbiidi muutmise eksperimentis kukutati sinna 2022. a septembris NASA sond DART, ning uurida, mis olid selle tagajärjed.

■ **13. oktoobril** liitus Eesti 45. riigina kosmoseuuringute koalitsiooniga Artemis Accords. Eesmärk on leppida kokku ühised põhimõtted, juhtnöörid ja tegevused Kuu ja kaugemate kosmiliste objektide uurimisel.

■ **13. oktoobril** startis SpaceX-i Boca Chica stardikompleksist oma viiendale katselennule kosmoserakett Starship. Lend kulges ka seekord plaanipäraselt: kanderakett Super Heavy maandus kontrollitult seitse minutit pärast starti tagasi stardipaigas. Teine aste Starship jätkas lendu kosmosesse ja pöördus seejärel kontrollitult tagasi Maale, kukkudes India ookeani.

■ **14. oktoobril** startis NASA Kennedy kosmosekeskusest kanderakett Falcon Heavy ja viis Jupiterile suunduvale trajektorile NASA kosmosesondi Europa Clipper. Algul oli plaan kasutada võimsamat kanderaketti SLS, kuid selle väljatöötamine on veninud ning seetõttu kogub sond kiirust Marsi möödalennuga veebruaris 2025 ning möödalennuga Maast detsembris 2026. Seejärel on sonni kiirus küllaldane, et jõuda Jupiteri juurde 2030. aasta aprillis. Plaan on uurida Jupiteri kaaslast Europat, täpsemalt selle jääga kaetud pinda ning selle all asuvat võimalikku ookeani.

■ **15. oktoobril** startis Canaverali neemelt kosmosejõudude



ESA

Kunstniku kujutus kosmosesondist Hera asteroidi Didymos (vasakul) ja selle väikese kaaslast Dimorphose vahel

stardikompleksist kanderakett Falcon 9, mis viis orbiidile 23 Starlinki sidesatelliiti.

■ **18. oktoobril** startis Canaverali neemelt kosmosejõudude stardikompleksist kanderakett Falcon 9, et viia orbiidile 20 Starlinki sidesatelliiti.

■ **20. oktoobril** startis Vandenbergi kosmosejõudude baasist kanderakett Falcon 9 ja viis orbiidile 20 lairibasidesatelliiti Eutelsat OneWeb.

■ **23. oktoobril** startis Hiina Xichangi stardikompleksist kanderakett Long March 2C, mis viis orbiidile kolm sarja Yaogan-43 luuresatelliiti.

■ **23. oktoobril** startis Canaverali neemelt kosmosejõudude stardikompleksist kanderakett Falcon 9 ja viis orbiidile 23 Starlinki sidesatelliiti.

■ **23. oktoobril** startis Texase osariigi Blue Origini stardikompleksist missiooni New Shepard raames kanderakett Booster 5 ning viis suborbitaalsele katseleenule mehitamata meeskonnakapsli RSS Kármán Line. Pärast tõusmist 101 km kõrgusele maapinnast kapsel eraldus ja mõlemad maandusid edukalt.

■ **23. oktoobril** eraldus kosmosejaamast ISS kosmoselaev Dragon Endeavour, et tuua Maale tagasi NASA astronaudid Matthew Dominick, Michael Barratt ja Jeanette Epps ning Vene kosmonaut Aleksander Grebenkin. 25. oktoobril maanduti Florida ranniku lähedal.

■ **24. oktoobril** startis Vandenbergi kosmosejõudude baasist kanderakett Falcon 9 ja viis missiooni NROL-167 käigus orbiidile USA luuresatelliidid. Tegu oli juba sajanda Falcon 9 stardiga 2024 aastal.

■ **26. oktoobril** startis Canaverali neemelt kosmosejõudude stardikompleksist kanderakett Falcon 9, mis viis orbiidile 22 Starlinki sidesatelliiti.

■ **29. oktoobril** startis Hiina



NASA / JPL-CALTECH

Kunstniku kujutus kosmosesondist Europa Clipper Jupiteri kuu Europa orbiidil

Jiuquani kosmosekeskusest kanderakett Long March 2F ja viis orbiidile kosmoselaeva Shenzhou 19, pardal taikonautid Wang Haoze, Cai Xuzhe ja Song Lingdong. 6,5 tundi hiljem põkkuti kosmosejaamaga Tiangong, kuhu on plaanis jääda kuueks kuuks.

■ **30. oktoobril** startis Vandenbergi kosmosejõudude baasist kanderakett Falcon 9, et viia orbiidile 20 Starlinki sidesatelliiti.

■ **30. oktoobril** startis Canaverali neemelt kosmosejõudude stardikompleksist kanderakett Falcon 9 ja viis orbiidile 23 Starlinki sidesatelliiti.

■ **4. novembril** saabus Hiina kosmosejaamast Tiangong Maale tagasi kosmoselaev Shenzhou 18, pardal taikonautid

Ye Guangfu, Li Cong ja Li Guangsu. Töö kosmoses kestis pool aastat.

■ **4. novembril** startis Jaapani Tanegashima kosmosekeskusest kanderakett H3 ja viis orbiidile militaarsidesatelliidi Kirameki 3.

■ **5. novembril** startis Uus-Meremaa Rocket Labi stardikompleksist kanderakett Electron, mis viis missiooni „Changes in Latitudes, Changes in Attitudes“ käigus orbiidile teadmata kommertskliendi tehiskaaslase.

■ **5. novembril** startis NASA Kennedy kosmosekeskusest kanderakett Falcon 9 ja viis orbiidile veolaeva Cargo Dragon, pardal 2,7 tonni varustust kosmosejaama ISS. Umbes 10 tunni pärast põkkutigi ISS-iga. Muu hulgas oli pardal puidust

kuupsatelliit, et katsetada puidu kasutamise võimalusi kosmoses.

■ **5. novembril** startis Venemaa Vostotšnõi kosmodroomilt kanderakett Sojuz-2.1b, mis koos lisaastmega Fregat viis orbiidile 49 Vene satelliiti, Vene-Hiina tehiskaaslase, Vene-Zimbabwe satelliidi ja kaks Iraani väikesatelliiti.

■ **7. novembril** startis Canaverali neemelt kosmosejõudude stardikompleksist kanderakett Falcon 9 ja viis orbiidile 23 Starlinki sidesatelliiti.

■ **9. novembril** startis Vandenbergi kosmosejõudude baasist kanderakett Falcon 9, et viia orbiidile 20 Starlinki sidesatelliiti.

■ **11. novembril** startis Canaverali neemelt kosmosejõudude stardikompleksist kanderakett Falcon 9, mis viis orbiidile 24 Starlinki sidesatelliiti.

■ **11. novembril** startis NASA Kennedy kosmosekeskusest kanderakett Falcon 9 ja viis orbiidile Korea telekommunikatsioonitehiskaaslase KoreaSat-6A.

■ **11. novembril** startis Hiina Jiuquani kosmosekeskusest tahkekütusrakett Kinetica-1, mis viis orbiidile Omaani kaugseiretehiskaaslase OL-1.

■ **14. novembril** startis Vandenbergi kosmosejõudude baasist kanderakett Falcon 9, toimetamaks orbiidile 20 Starlinki sidesatelliiti.

■ **14. novembril** startis Canaverali neemelt kosmosejõudude stardikompleksist kanderakett Falcon 9, et viia orbiidile 24 Starlinki sidesatelliiti.

■ **15. novembril** startis Hiina Wenchangi kosmosekeskusest kanderakett Long March 7 ja viis orbiidile veolaeva Tianzhou 8, pardal 7,5 tonni varustust kosmosejaamale Tiangong, millega põkkutigi juba mõni tund hiljem.



WIKIPEDIA

Vaade Hiina Tiangongi kosmosejaamale. Vasakul on jaama laborimoodul Mengtian, keskel põhimoodul Tianhe (selle all on näha jaamaga põkkunud kosmoselaeva Shenzhou) ja paremal laborimoodul Wentian

Jüri Ivask, Horisondi kosmosekroonik

Noorfüüsikute olümpiaadiretked Indoneesiasse ja Gruusiasse

Tänavusele rahvusvahelisele füüsikaolümpiaadile (IPhO) Eesti noored füüsikud ei jõudnud, kuid nad said oma taset näidata mitmel teisel rahvusvahelisel võistlusel. Eesti võistkond ei saanud IPhO-l osaleda, kuna võistlus peeti Iraanis, kuhu Eesti välisministeeriumi tungiva hinnangu järgi ei tasu reisida. Samas oli meie õpilastel sponsorite abiga võimalik esimest korda osaleda rahvusvahelisel rakendusfüüsikaolümpiaadil (IAPhO) Indoneesias. Juulikuus peeti Gruusias Euroopa füüsikaolümpiaad, kus oli rekordiliselt palju osalejaid.

Rakendusfüüsika olümpiaad Indoneesias

Rahvusvaheline rakendusfüüsikaolümpiaad toimus 23.–26. mail Indoneesias Bandungis. Osalesid ka Indoneesia, Bangladesh, Malaisia, Tai, Vietnami, Filipiinide ja Peruu võistkonnad. Võrreldes teiste olümpiaadidega oli see mõõduvõtt ebatavaline: kahetunnise teooriavooru järel tuli etteantud teemal koostada esitlus ja kanda see žüriile ette. Teooriavor koosnes peamiselt mehaanikaülesannetest, sestap tundsid laiemate füüsikateadmistega võistlejad puudust ülesannetest eri teemadel, nagu elekter ja optika. Esitluste teemad olid „Maa magnetväli“, „Vaikse ookeani tulerõngas“ ja „Taastuvenergia“.

Eestlastel osalesid sellel olümpiaadil esimest korda, kuid tulemused olid suurepärased. Auhindu jagati iga esitlusteema kohta eraldi, „Tulerõnga“ arvestuses võitis Mihkel Rannut (Tallinna reaalkool) ja „Taastuvenergia“ arvestuses August Jakobson (Nõo reaalgümnaasium). Ralf Robert Paabo (Hugo Treffneri gümnaasium) ja Saskia Põldmaa (Tallinna reaalkool) said kuldmedalid „Maa magnetvälja“ teemal. Violeta Jürgens ja Mattias Jõgi (mõlemad Hugo Treffneri gümnaasiumist) pälvisid hõbemedalid. Kõik Eesti õpilased olid 11. klassist. Edu võistlusel tagas peale füüsikateadmiste hea inglise keele ning esitlemise oskus. Kohaliku žürii liikmed olid eestlaste teadmistest nii vaimustatud, et soovisid neid lausa endale õpilasteks.

Vabal ajal avastasid eestlased Bandungi linna koos kohalike võistlejatega, kes oskasid anda nõu parimate huviväärsuste kohta. Kõige põnevamaks osutus tänavatoit, mida müüdi iga nurga peal. Eksootilised road olid näiteks pannkookid Oreo küpsiste ja juustuga, lehma aju, riisisupp ja kilekotis müüdav mahl. Korralikult täitis kõhtu Nasi Goreng ehk praetud riis. Positiivselt üllatasid odavad hinnad: suur taldrikutäis praetud riisi maksis mõnes kohas vaid ühe euro. Võrreldes Euroopaga oli liiklus Indoneesias kaootiline, sest põhiliselt sõidetakse mootorratastega, mille juhid ei jälgi radu. Elamurajoonides oli rahulikum jalutada,



Eestlaste delegatsioon rakendusfüüsikaolümpiaadil (vasakult): võistlejad August Jakobson, Mattias Jõgi, Mihkel Rannut, Saskia Põldmaa, Violeta Jürgens, kohalikud giidid (tumedas riietuses), Ralf Robert Paabo ja juhendaja Eero Uustalu

kõikjal tervitasid meid lapsed, kes tahtsid jalgpalli mängida. Pallimängus sai Eesti võistkond lastelt korralikult pähe. Nõnda jäi mulje, et Bandungi slumide vahel on peidus nii mõnigi tulevane Ronaldo või Messi.

Euroopa füüsikaolümpiaad Gruusias

Tänavuse olümpiaadihooaja kõige prestiižsem võistlus oli Euroopa füüsikaolümpiaad (EuPhO). Gruusias Khuthais oli osalisriike 54 ehk rohkem kui Iraanis peetud rahvusvahelisel füüsikaolümpiaadil. Esimest korda olid sellel olümpiaadil näiteks USA, Kanada, Jaapani ja Taani võistkond. Kahel päeval lahendati praktilisi ja teoreetilisi ülesandeid. Kõige keerulisem oli seekord praktiline ülesanne, kus pidi looma elektriskeemi piesoeefkti uurimiseks. Suurim punktisumma selle ülesande eest oli 20; parimatel õnnestus saada 13 punkti, eestlased said keskmiselt 7 punkti.

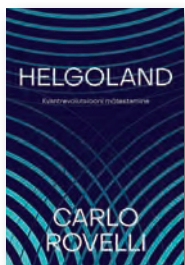
Teooriaülesanded olid samuti tavapära raskematel teemadel, nagu relatiivsusteooria ja laineoptika. Pärast võistluspäevi võis tulemusi vaidlustada; EuPhO-l teevad seda õpilased ise. Apelleerimine kestis terve päeva ja oli mõne õpilase medali jaoks määrava tähtsusega. Näiteks ühel osalejal, kes oli algul saanud 15 punkti, õnnestus lõpuks pälvida 29 punkti ehk peaaegu kaks korda parem tulemus.

Eesti õpilastest said hõbemedali Kaarel Toomet (Nõo reaalgümnaasiumi 10. klass), Saskia Põldmaa, Ralf Robert Paabo ja Siim Saarse (Pärnu Koidula gümnaasiumi 11. klass) ning pronksmedali Mihkel Rannut. Kaarilil ja Saskial jäi kuldmedalist puudu kõigest pool punkti. Kuna olümpiaadile oli eelnenud põhjalik teooriatreeninglaager Orissaares ja praktiliste ülesannete laager Tallinnas, olid meie võistlejate ootused suuremad. EuPhO üldvõit läks taas Rumee-niasse, esikoha võitis Rares-Felix Tudose 43 punktiga 50-st.

Khuthaisi linn asus võistlust korraldava ülikooli linnakust mitme kilomeetri kaugusel, kuid pärast olümpiaadi sai sinna vabal ajal sõita bussiga.

Osalus Euroopa füüsikaolümpiaadil toetas Eesti Energia ning ettevalmistust olümpiaadiks haridus- ja teadusministeerium. Indoneesiasse rakendusfüüsika olümpiaadile minekut koordineeris Eesti füüsika selts koostöös Tartu ülikooli teaduskooli ja Tallinna tehnikaülikooliga ning toetasid Õlane, Hanza Mechanics, Fontes, Energex, Graanul Invest, CAFA Tech, Normat, Riho Taba, Margus Linna-mäe, reaalkooli hoolekandeselts ning Tartu linn. •

Ralf Robert Paabo, Hugo Treffneri gümnaasiumi 12. klassi õpilane, Eesti esindaja rahvusvahelisel rakendusfüüsikaolümpiaadil ja Euroopa füüsikaolümpiaadil



Carlo Rovelli
HELGOLAND. KVANTREVOLUTSIOONI
MÕTESTAMINE
Tõlkinud Vahur Lokk
Toimetanud Enn Kasak
160 lk
Kirjastus Postimees, 2024

1925. aasta juunis põgenes heinaallergia all kannatav 23-aastane Werner Heisenberg Helgolandile – puudeta, tuulest räsitud saarele Põhjameres. Just seal tabas teda taipamine, milles seisneb kvantmehaanika võtmeküsimus. Tänu sellele on meil nüüd hulk tehnoloogiaimesid ja tuumaenergia, kuid teooria ise on endiselt segadust tekitav, mõistatuslik ja tuliste arutelude objekt.

„Helgoland“ on lugu kvantfüüsikast ja selle säravatest noortest rajajatest, kellest said ühed kuulsamad Nobeli auhinna võitjad. Meisterlik jutuvestja ja teadlane Carlo Rovelli kirjeldab võistlevaid tõlgendusi ja pakub oma teooria, mille järgi koosneb maailm põhiliselt suhetest ja sündmustest, mitte püsivatest osistest. „Helgoland“ muudab arusaama universumist ja meie kohast selles.

Raamatu toimetaja, teadusfilosoof Enn Kasak: „Maailm tundub olevat vahel kiuslik või lausa kuri, sealsamas võib ta olla tulvil ilu, lootust ja igatsust. Mõnigi arvab, et füüsika sõidab sellest kõigest traktoriga üle ja õpetab igeriku äti häälega, kuidas „asjad tegelikult on“.

„Helgoland“ lööb teadmiste turuplatsilt minema nii arvamusteroohke pealiskihki kui ka sügavalt juurdunud arusaamad. Selgub, et kui tahame saada mõttekaid vastuseid, siis polegi ilmne, mis-moodi tuleks maailma kohta küsida. Rovelli räägib arusaadavalt ja kaasakiskuvalt, haarates füüsika teekonnal endaga kaasa rohkes kultuuriloolises kastmes pehmentatud filosoofiat. Ilmneb, et küsimuse „Mis on päriselt olemas?“ asemel tuleb hoopis pärida: „Mis toimub?“



Richard P. Feynman
KUUS KERGETAT LUGEMIST
Tõlkinud Toomas Rosin
Toimetanud Siiri Omblor
184 lk
Ilmamaa, 2014

USA füüsik Richard Feynman (1918–1988) oli veel enne seda, kui Nobeli auhind 1961. aastal tema nime laia üldsuse ette tõi, teadlaskogukonna hulgas rohkem kui kuulus, lausa legendaarne. Feynman oli California tehnikainstituudi õppejõud, kes pidas seal töötatud aja jooksul ametlikult kokku kolmkümmend neli loengukursust.

Raamatu „Kuu kergemat lugemist“ koostamise mõte tulenes soovist tuua võimalikult laia publiku ette tuumakas, kuid mitte liiga keeruline füüsikaraamat. See sobib füüsika algõpikuks laiemale lugejaskonnale ja ka Feynmani kui inimese tutvustamiseks. „Kuu kergemat lugemist“ on välja nopitud teosest „Feynmani füüsikaloengud“, mille esimene väljaanne ilmus 1963. aastal.

Lugeja veendub, et Feynman oskab uue nurga alt valgustada ka argiseid teemasid, nagu jõud ja liikumine. Põhimõisteid selgitab ta näidetega igapäevaelust ja ajaloost. Füüsika seostub selles esituses kogu aeg teiste teadustega, kuid alati on selge, missugune teadus on kõige aluseks.



50 AASTAT TAGASI

HORISONT 12/1974, LK 19

Horisont esitleb piltuudisel Serpuhovi kiirendiil tehtavates katsetes kasutatud mullikambrit: „Elementaarosakeste registreerimiseks on ehitatud mitmesuguseid seadmeid. Üks neist on 1952. aastal D. Glaseri leiutatud mullikamber. See täidetakse ülekuumenenud ja rõhu all oleva vesiniku, propaani või mõne muu veeldatud ainega. Kambrist läbilenduv elementaarosake tekitab oma teel ioone, mis rõhu vähendamisel ja vedeliku järsul keemahakkamisel kambris on keemiskeskmeks. Sealt eraldunud gaasimullid muudavadki ioniseeriva osakese trajektoori nähtavaks“.



40 AASTAT TAGASI

HORISONT 12/1984, LK 27

Nalja rubriigist „Kentsakaid kilde“:

„Pärast relatiivsusteooria põhimõtete avaldamist küsiti Einsteinilt sageli selgitusi uue õpetuse kohta. Et professorit polnud kerge tabada, siis tülitati tema sekretäri. Lõpuks palus viimane õpetasel asja endale selgeks teha. Einstein polnud võrdlustega kitsi: „Kui te istute kaks tundi ilusa tüdrukuga, siis tundub, nagu oleksite temaga veetnud vaid minuti. Kui aga tööpoolest istute minutiks kuumale pliidile, siis näib see aeg teile tunnipikkusena. See ongi relatiivsus!“



30 AASTAT TAGASI

HORISONT 8/1994, LK 26

Mehaanikateadlane Jüri Engelbrecht fantaseerib intervjuus, kelle ta valiks ajaloost endale vestluskaaslaseks: „Üks huvitav isik möödanikust on Henri Poincaré, mittelineaarse dünaamika vaimne isa, kes ennustas juba sajandivahetusel ühte tänast paradigmat – determineerituse kadu. Aga huvitav oleks vestelda hoopis teises ajaskaalas mõne mehaanikateadlasega, tagasihoidlikult öeldes 5000 aastat ette rutates“.



20 AASTAT TAGASI

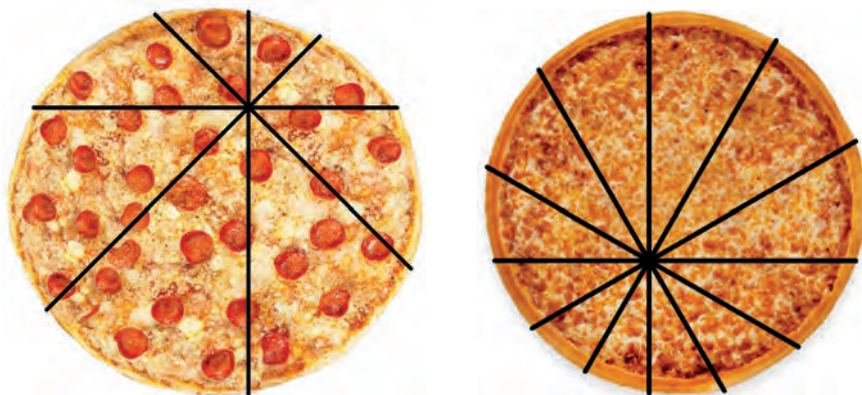
HORISONT 6/2004, LK 2

Rein Veskimäe kirjutab toimetuse veerus kvarkidest:

„Millegi koostisosadeks lahutamise idee on igivana. Praeguseks on jõutud kvarkide tasemele. Seni teatakse, et nad on olemas. Seda kinnitab ka tunnustus tänavuse Nobeli füüsikapreemia näol selle laureaatidele. Ent seniajani pole kvarke vabalt liikumas kohatud, ei universumis ega aine „peenetamisel“ kiirendites“.

Hooletu pitsalõikaja

Ül 1. Magister Magda ja lektor Leena ostsid pitsakohvikust pitsa. Tudeng Tuuli, kes oma õppejõude pitsakohvikus teenindama sattus, lõi pitsa nelja lõikega kaheksaks tükiks, kusjuures iga tüki tipunurk oli täpselt 45 kraadi. Ainuke häda oli selles, et kaheksa tüki ühine kokkupuutepunkt ei sattunud üldsegi mitte pitsa keskele, vaid hoopis mingisse muusse punkti pitsa peal (vaata ka vasakpoolset joonist). Kui magister Magda ja lektor Leena kaebasid pitsabaari juhtkonnale, et hooletu töötaja tõttu ei saa nad nüüd seda pitsat enam täpselt pooleks jagada, siis väitis Tuuli, et ka selliste tükide korral on täiesti võimalik jagada pitsa täpselt pooleks ilma pitsalõike tükeldamata. Millised tükid peaks valima Magda, millised aga Leena, et nad mõlemad saaksid täpselt ühepalju pitsat? Põhjenda, miks sobiva jaotusviisi puhul on tükide pindalade summad võrdsed.



Ül 2. Kui Magda ja Leena järgmine kord samasse pitsakohvikusse läksid, siis võtsid nad kaasa ka dotsent Doora. Nüüd lõi kas tudeng Tuuli ümmarguse pitsa kuue sirge lõikega 12 tükiks, kusjuures iga lõike tipunurgaks oli 30 kraadi. Ka seekord ei sattunud lõikepunkt pitsa keskele, vaid hoopis mingisse muusse punkti pitsa peal (näiteks nii, nagu parempoolisel joonisel).

Kuidas peavad Magda, Leena ja Doora need tükid kolmekesi omavahel ära jagama nii, et igaüks neist saaks ühepalju pitsat? Põhjenda, miks tükide sellise valikuviisi korral on Magdale, Leenale ja Doorale jäävate pitsalõikude pindalade summad võrdsed.

Viienda voo vastus:

Kasutame Pythagorase teoreemi täisnurksete kolmnurkade AEO ning AEP hüpotenuuside AO ja AP jaoks.

$$AO^2 = AE^2 + EO^2 \text{ ehk } (a - x)^2 = \frac{a^2}{4} + x^2. \text{ Siit } x = \frac{3}{8}a.$$

$$AP^2 = AE^2 + EP^2 \text{ ehk } (a + y)^2 = \frac{a^2}{4} + (a - y)^2. \text{ Siit } y = \frac{1}{16}a.$$

Kolmnurga ABR küljele BR rakendame koosinusteoreemi:

$$BR^2 = AR^2 + AB^2 - 2AR \cdot AB \cos(\angle RAB) \text{ ehk:}$$

$$(a + z)^2 = (a - z)^2 + a^2 - 2(a - z)a \frac{z}{a - z}.$$

$$\text{Peale lihtsustamist saame } 6az = a^2. \text{ Siit } z = \frac{1}{6}a.$$

Vastuste ärasaatmise tähtaeg on 15. jaanuar 2025.

Lahendused saata aadressil
MTÜ Loodusajakiri (ajakiri Horisont),
Rävala pst 10, 15042 Tallinn või
tonu@mathema.ee.

Vooru võitja

Vooru võitja saab kingituseks raamatu sarjast „Looduse raamatukogu“, aasta-raamatu „Lehed ja tähed“ või loodus-häälte CD-plaadi.
Sarjas ilmunud raamatutega ja CD-plaatidega saab tutvuda veebilehel www.loodusajakiri.ee ja eelistustest teada anda toimetuse telefonil 610 4105 või meiliaadressil loodusajakiri@loodusajakiri.ee.

Viienda voo auhinna sai Arvo Jägel

Enigma viienda voo ülesannetes tuli ringide raadiused avaldada ruudu külje a kaudu. See tähendab, et vastusena tuli teele saata ka avaldamise lahenduskäigud ning ei piisanud ainult vastustest. Kuigi ülesanded ei olnud rasked, valmistas veidi probleeme kolmas ülesanne, mille puhul saadeti ka valesid vastuseid.

Kõik ülesanded lahendasid õigesti ja täielikud lahenduskäigud saatsid ära Vladimir Jaanimägi, Arvo Jägel, Aivar Kauge ja Kalle Kulbok. Vooru-auhinna võitis neist seekord Arvo Jägel.

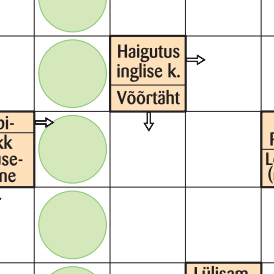
Vaata veebilehelt

Tulemuste tabeli leiate aadressilt
www.loodusajakiri.ee ja Horisondi
Facebooki-seinalt.

Tõnu Tõnso, matemaatik, Tallinna ülikooli lektor

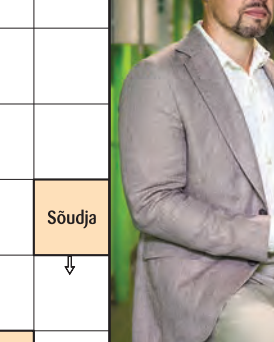
aadressil horisont@horisont.ee või Rävala pst 10, 15042 Tallinn.

KÕIGE KANGEM KRAAM RISTSÕNA-SÕBRALE



LAURI 12138	Riidesort	Osmik		Element nr. 13	Valla- kogu- konna ühisait	Jagu	<i>kuma</i>	Öli-	Imestus- hüüatus	Areng	Mineviku jäänus	Naise- nimi
Jõe- teadus	→	↓	○	↓	↓	↓		↓	↓	↓	↓	↓
Roos- õieline	→	↓	○				Linn Belgias Sade	→				
Tähtis hape	→	↓	○	Haigutus inglise k. Võortäht	→				Nathaniel Vanaaja linnik	→		
<i>kuma</i>		Läbi- Pikk katuse- alune	→	↓		Linn Pr.-maal Leetseljak (murdes)	→					Sõudja
Läti linn	→	↓	○					Peidu- urgas Noot	→			↓
Poorne kivim	→	↓	○		Lüli- samba 1. lüli Mehe- nimi	→		↓			Abtissi abi	
<i>kuma</i>	Ölu rootsi k. Esiots	→	○	Mehe- nimi Kapukas (murdes)	→				Paskal Spordi- aja- kirjanik	→	↓	
Näitleja, eesn.	↓	↓	○	↓			Kes on pildil? Verine haav	→	↓			Jõgi Ve- nemaal
<i>kuma</i>	FLEMING Linn Itaalias	→	○			Küla Põl- va vallas Sakk	→				Kogu- Küla Peipsiää- re vallas	→
Auto- mark	→	↓	○	○	Briti tiitel Sugulane	→			Livu Rebreanu romaan Ülistus	→		Anno Domini Linn Soomes
Element nr. 76	→	↓	○	Ühe- sugused tähed	○	○	○	○	○	○	○	○
Lasti ees- kirjade järgi pai- gutama	→	↓	○					Nõrk sulghäälik Küla Võ- ru vallas	→			OERTER Inglise k. eessõna
Trooja sõja kan- gelane	→				Endine minister	→				Kala Soolane	→	
									↓		Küla Antsla vallas Ungas	→
											Doonau lisajõgi Inglise k. eessõna	→
												Ja muud Ühes. tähed
												Poola kirjanik Liiter
												↓

Loota, et
kiire ja tõhusa
väljapääsu, on
viisakalt öeldes
utopistlik.





Loota, et
kiire ja tõhusa
väljapääsu, on
viisakalt öeldes
utopistlik.



Lahendajate vahel läheb loosi Kuma Ristsõnaraamat nr 18.

Eelmise ristsõna vastus „Pea ei saa tööd teha, KUI TEMA ALL EI TÖÖTA KEHA“ viitab tänavuses neljandas Horisondis ilmunud intervjuule professor Kristjan Pordiga.

Loosi tahtel võitis Kuma Ristsõnaraamatu nr 18
ARNE TIMM.

Kõigil lahenduse saatjatel
palume ära märkida ka selles numbris
KÕIGE ENAM MEELDINUD KIRJUTIS!



Arva ära!

- 1** Kvantteooria väljatöötamisel eelnes mitu varasemat teooriat, mis väljusid senise klassikalise füüsika raamidest. Üks selliseid oli 19. sajandi algul katsetega tõestatud teooria, mille järgi on valgusel lainelised omadused. **See teooria oli üks kvantfüüsika eelkäijaid. Kes oli selle teooria teostaja?** Kõrval olev originaalilustratsioon kujutab tema katset.



- 2 Kes on fotol?** Ta on sõnastanud ühe kvantmehaanika olulise printsiibi, mis lihtsustatult väidab seda, et kaks samas aatomis paiknevat elektroni ei saa olla samas kvantolekus, see tähendab, et kui eri elektronide kvantarvud on samad, on nende elektronide spinn vastupidine.

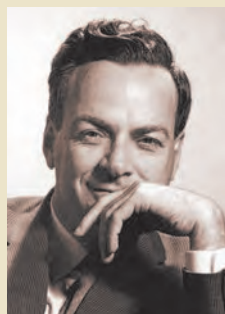


- 3** Kvantfüüsika arengule on palju kaasa aidanud alates aastast 1911 peetud füüsika- ja keemiakonverentsid, kusjuures esimese konverentsi teema oli „Radiatsioon ja kvandid“. Käsitleti probleeme, mis tulenesid kahe käsitluse, klassikalise füüsika ja kvantmehaanika olemasolust. Fotol on 1911. aasta konverentsi osalejad. Konverentsi peetakse tänini ning need on saanud nime Belgia töösturi järgi, kes pani nendele konverentsidele aluse. **Mis nime need konverentsid kannavad?**

FOTOD: WIKIPEDIA



- 5** Oma eluajal sai temast üks tuntumaid teadlasi maailmas. Peale oma töö teoreetilises füüsikas, sealhulgas kvantmehaanikas, on teda tunnustatud ka nanotehnoloogia kontseptsiooni tutvustamise eest. Ta sai laiemale avalikkusele tuntuks 1980. aastatel üht katastroofi uurinud komisjoni liikmena. **Kes on see tuntud teadlane?**

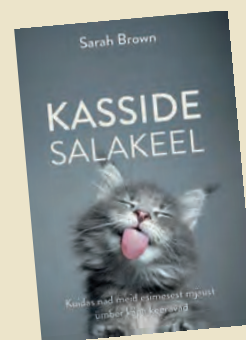


- 4** Selle tuntud kvantteooria arendaja panus oli oluline ka esimese aatomipommi loomisel. Hilisemal eluperioodil propageeris ta aga tuumarelvade kontrollimist ja piiramist, asutades liikumise „Aatomid rahu nimel“. **Kellest on jutt?** Näete tema vappi, mille moto „*Contraria sunt complementa*“ tähendab tõlkes „Vastandid täiendavad üksteist“.

MÄLUSÄRU 5/2024 VASTUSED

1. Ulaanbaatar.
2. Louis Antoine de Bougainville.
3. Diego Velázqueze maal „Las Meninas“ („Õuedaamid“).
4. Pintšetamariin (*Saguinus oedipus*).
5. Lya Mara (sündinud Aleksandra Gudowicz).

● Mälusäru auhinnaraamatu, Sarah Browni „Kasside salakeel“. Kuidas nad meid esimesest määst ümber käpa keeravad“ kirjastuselt ARGO, võitsid TÕNIS SUURNA, HENRY SAAR ja MEELIS REIMETS.



Jevgeni Nurmla, Indrek Salis
mälumängurid



VASTA JA VÕIDA RAAMAT!

Vastanute vahel loosime välja kolm raamatut: Erik Abner, „Eesti kivistised. Algaja fossiiliküti abilise“ kirjastuselt ARGO.

- Koos vastustega andke toimetusele teada ka selle numbriga lemmikkirjutis.

VASTUSEID

ootame 15. jaanuariks 2025 aadressil Rävala pst 10, 15042 Tallinn või horisont@horisont.ee.

NB! Vastuste juurde kirjutage auhinnaloosis osalemiseks kindlasti oma mobiiltelefoni number ja postiaadress.

MÄLUSÄRU
RUBRIIKI TOETAB
KIRJASTUS ARGO.





KUKU

Väärt mõtete lainel

TERAVA SIHIKU LAINEL

E-N KELL 12-13



Timo Tarve

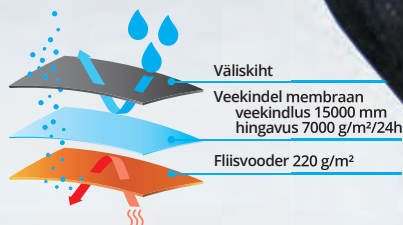
Ainar Ruusaar

TAMREX

VALI ÕIGED kindad!

Veekindel membraan hoiab käed kuivana ja fliisvooder soojendab.

Kerged ja soojad kindad saadaval suurustes 4 – 12!



44-374W

- Pöidla loomulik liikumisvabadus
- 3D lõige
- Touch Screen sõrmeotsad
- A+ klassi sünteetiline nahk
- Kergelt eelpainutatud sõrmed
- Sisse õmmeldud kumm randmel
- Elastsed siilud sõrmede vahel
- Soe fliisvooder
- Veekindel membraan
- Kerge ja elastne kangas käeseljal
- Käekuju järgiv disain



Mugavus

Ülimalt mugavad, lühema lõikega töökindad võivadki kätte ununeda! Käekuju järgiv disain, elastne käeselg, kergelt eelpainutatud sõrmed ja külge õmmeldud pöidlaosa tagavad loomuliku liikumisvabaduse.

Veekindlus

Talvekinnaste veekindlus on oluline lisaboonus. Kvaliteetne vettpidav membraan hoiab niiskuse kätest eemal, kuid tagab hingavuse.

Soojapidavus

Väga sooja ja pehme fliisvoodriga (220 g/m²) kindad on kerged ja õhulised. Sobivad nii tööle kui suusarajale.

Preemiumklassi sünteetiline nahk

Võrreldes tavalise sünteetilise nahaga on seda täiendatud libisemist takistava mustri- ja mis tundub käega katsudes sametiselt pehme. Nendes kinnastes püsivad tööriistad kindlalt käes!

Touch Screen sõrmeotsad

Touch Screen kinnastega saab muretult kasutada erinevaid puutetundlikke ekraane.

VEEKINDLAD

TouchGrip Thermo A+ sünteetilisest nahast veekindlad talvekindlad

12,90 €

EN ISO 21420:2020
EN 388:2016+A1:2008 (2.2.1.1.X)
EN 511:2006 (1.2.1); Kat 2.



WinterGrip soojad HI-Vis talvekindad
4.60 €



DuraSoft Thermo sünteetilisest nahast talvekindad
5.90 €



AquaGrip Winter veekindlad
9.10 €



HexaGrip Thermo HI-Vis talvekindad
9.80 €



Pühlvlinahast talvekindad
13.30 €



A+ LeatherPRO Thermo kitsenahast talvekindad
13.90 €



WinterPRO9000 Veekindlad
25.50 €



WinterPRO Veekindlad
26,40 €



EJENDALS Tegera kitsenahast labakindad
45 €

Hinnad sisaldavad käibemaksu ja kehtivad, kuni kaupa jätkub!

TAMREX OHUTUSE OÜ

TARTU
UUS KAUPUS
Nõlvakaare 4

Tel 654 9900 e-post: tamrex@tamrex.ee www.tamrex.ee

TALLINN Laki 5, Pärnu mnt 139c, Katusepapi 35 • TARTU Teemandi 2, Ringtee 37a, Nõlvakaare 4 • PÄRNU Riia mnt 169a • RAKVERE Laada 22 • JÕHVI Tartu mnt 30 • VÕRU Piiri 2 • VIJANDI Tallinna 86
VALGA Vabaduse 39 • NARVA Ak. Maslovi 1 • HAAPSALU Ehitajate tee 2a • PAIDE Pikk 2 • JÕGEVA Tallinna mnt 7 • TÜRİ Rakvere tee 23 • RAPLA Tallinna mnt 2a • KEILA Keki tee 1 • KURESSAARE Tallinna 80a