

Saksa vaatenurk kvantmehaanika arengule

Stefan Groote

Füüsika Instituut, Tartu Ülikool,

Tähe 4, 51010 Tartu, Estonia ja

Institut für Physik der Johannes-Gutenberg-Universität,

Staudinger Weg 7, 55099 Mainz, Germany

Tartu, 30ndal oktoobril 2009.a.

Sisukord

Kokkuvõte

Jälgin ettekandes, kuidas 1921.a. ja 1927.a. Solvey konverentside vahel kulges teadlaste mõttevahetus Kesk-Euroopas, eriti Saksamaal, mis lõpuks viis kvantmehaanika tekkimisele. Eriti väärivad seejuures tähelepanu keskused nagu München, Göttingen ja Kopenhaagen ja inimesed nagu Heisenberg, Pauli ja Schrödinger.

1 Sissejuhatus

Kvantmehaanika on täna teoreetilise füüsika tähtis, võib-olla isegi tähtsaim osa. Paljud tudengid, kes tänapäeval teoreetilise füüsika loenguid kuulavad, enam kahjuks ei tea, et olid samas noored füüsikud, kes selle kvantmehaanika välja töötasid – noored mehed 20 ja 25 aasta vahel. Suur osa sellest, mida peetakse tänapäeval „normaalseks“, oli 90 aastat tagasi kõike muud kui normaalne. Ei olnud ainult tehnilised küsimused, mis olid lahitud, vaid kvantmehaanika täiskontsept ei olnud sel ajal arenenud. Aga noor innukus laotus laiali, ja mõne aasta jooksul oli kõik selge. Tahan ettekandes kujutada arenduse ajalugu.

On põnev, ajaliselt distantsilt seda arengut jälgida, mis toimus Kesk-Euroopas, eriti Saksamaal. Sakslasena olen ma hea meelega ülesande võtnud sellest arengust rääkida. Aga nagu kvantmehaanikas ikka, kehtib ka siin ajaloos Heisenbergi määramatuse printsiip: ei ole võimalik samal ajal paika ja impulssi määrata. See tähendab siin, et ei ole mõtet, päris ühele instituudile või ühele isikule keskenduda. Kui keskendun ainult ühele instituudile, siis ei ole arusaadav, miks tööühma keskpunkt muutus. Kui keskendun ainult ühele teadlasele, siis ei ole arusaadav, kuidas ta teistega seostus. Sellepärast püüan mõlemaid silmas pidada, aga ühe inimese perspektiivist, nimelt Werner Heisenbergi omast.

Heidame pilgu alguses konverentsile, mis määrab kuidagi arengu alguse. 1921. aastal kohtusid Euroopa kuulsad füüsikud Brüsselis Solvay konverentsil. Enamus neist oli juba vananenud, nii et oli oodata, et noor põlvkond võtaks varsti juhtimise üle. Aga kus võiks see tekkida? Kesk-Euroopas olid tekkinud keskuses, mis noori füüsikuid ligi tõmbasid – nii Cambridge'is, Pariisis ja Kopenhaagenis kui ka mõnedes kohtades Saksamaal, näiteks Berliinis, Göttingenis ja Münchenis. Kust oli värskeid tuuli oodata?

2 Müncheni „kool“

Alustame oma teed Müncheni Ludwig-Maximilian-Ülikoolist. 1906.a. oli Arnold Sommerfeld seal hakanud endale teoreetilise füüsika töörühma üles ehitama. Sommerfeld oli Göttingenis matemaatiku Felix Kleini juures õppinud ja oli vahepeal Clausthalis ja Aachenis olnud, enne kui ta Münchenisse sattus. On imetlusväärne ja küll Sommerfeldi suurim teene, et ta andekaid noori füüsikud Münchenisse tõmbas ja neid toetas. Võib-olla võime põhjuseks pidada, et Sommerfeldil oli „dialoogne tööviis“. Sellepärast oli ta oma töökaaslastega pidevas mõttevahetuses. Sommerfeld oli tehnik. Kui Nils Bohr Kopenhaagenis oma kahte kvantpostulaati sõnastas, võttis Sommerfeld noore taani kolleegi mõtte üles ja arendas nn „Bohr–Sommerfeldi“ aatomimudeli, mida me kõik kvantteooria algoengutest teame.

Werner Heisenberg tuli 1920.a. Münchenisse. Matemaatika jaoks oli ta juba „rikutud“ matemaatiku Ferdinand Lindemanni sõnade järgi, kes ta tagasi lükkas. Nii tuli Heisenberg Sommerfeldi loengusse, ja Sommerfeld seadis teda juba algsemestril probleemi ette, mida ta võis iseseisvalt lahendada. Ta andis talle Zeemani efekti eksperimentaalväärtused, ja üks-kaks nädalat hiljem oli Heisenberg juba termide skeemi välja töötanud. Sommerfeld oli šokis – eriti sellepärast, et Heisenberg nõudis poolnumbreid. „See on võimatu!“ hüüdis ta, ja alles pika arutelu järel nõustus ta, et poolikud kvantnumbrid on tõenäoliselt õiged.

Peale loengut kohtusid huvilised tudengid instituudi seminarisaalis. Heisenberg kirjutab oma memuaarides, et *„ilmselt tulid just need, kes olid teaduslikult huvitatud ja kes tahtsid iseseisavalt töötada, et hiljem võib-olla oma doktoritööd teha. Kui tulin instituuti, oli seal ehk viis-kuus inimest kohal, kes lugesid õpikuid, ja puldis istus assistent. Alguses oli selleks Gregor Wentzel. Wolfgang Pauli oli nagu abiassistent. Me istusime siis seminarisaalis, ja kui kellelgi oli küsimus, siis sai ta assistendi juurde minna ja küsida. Nii algas arutelu Pauliga.“*

Nagu Heisenberg imetledes mainis, oli Wolfgang Pauli *„matemaatiliste ja matemaatiliste-füüsikaliste meetodite täieliku valdajana“* Münchenisse tulnud, ja nad said sõpradeks.

Heisenberg tuli alati uute küsimustega, ja Pauli parandas. „*Sa oled lollpea*“ ja sarnaselt ütles ta, aga Heisenberg ei olnud solvunud ja võttis sõbra kriitikat kui abi.

Sommerfeldi tudengite vaimseks koduks jäi seminarisaal. „*Oli nagu turuplats, kus uute arengute vaatenurki vahetati. Tekkis mulje, et midagi erutavat ja huvitavat oli teel,*“ mäletas Heisenberg. „*Tuli keegi ja ütles: ‘Olete juba Physikalische Zeitschrifti viimast väljaannet lugenud? Seal kirjutati, et ...’*“. Tihti, kui keegi midagi uut teadis, näiteks Nils Bohrilt Kopenhaagenist, siis seisid kõik ümber tahvli. Pauli käes küsiti, mida ta sellest arvas. Ta seletas tahvilil, aga teised katkestasid, ja nii läks edasi. Nii püüdsid tudengid endale arvamust kujundada. Sommerfeld seevastu oli nagu vana husaarikolonel, eelarvamusega.

3 Bohri Suvefestival

Wolfgang Pauli kaitses oma doktoritöö 1921.a. *summa cum laudega* ja läks minema. Alguses oli ta Göttingenis, siis Hamburgis. Mõttevahetus Heisenbergiga aga ei katkenud. Nad kohtusid mitu korda aastas ja olid elavas kirjavahetuses. 1922.a. oli võimalik kohtuda nn „Bohri Suvefestivalil“, ühes loengute sarjas, mida Niels Bohr Göttingenis pidas. Füüsikud tulid kaugelt: Hamburgist tulid Wilhelm Lenz ja Wolfgang Pauli, Kopenhagenist Oskar Klein ja Wilhelm Oseen, ja Münchenist Arnold Sommerfeld ja muidugi Werner Heisenberg.

Heisenberg kirjeldab oma esimest muljet, mis Niels Bohr talle jättis: „*Täis nooruslikku pinget, aga siiski pisut häbelik, pea natuke küljele kallutatud, seisis Taani füüsik auditooriumis, millesse laiali avatud akende kaudu Göttingeni suve täisvalgus voolas, valgel poodiumil. Ta laused tulid natuke takistatult ja vaikselt, aga iga hoolikalt valitud sõna taga oli tunda mõtete pikk ahel, mis kadus kusagil minu jaoks väga äratava filosoofilise suhtumise tagapõhjal.*“ Ettekannetele järgnesid eredad arutelud, ja üks kord julges Heisenberg esitada Bohrile vastuväite. Heisenberg võitles vahvalt, ja teised imestasid. Peale selle kutsus Bohr teda jalutuskäigule Göttingeni metsasallu. Arutelu, mis nad seal pidasid, otsustas Heisenbergi tuleviku. Heisenberg sai aru, et Bohr suhtus oma teooriasse palju kriitilisemalt kui

näiteks Sommerfeld. Bohri jaoks ei tulnud seose teadmine mitte oletuste matemaatilisest analüüsist, vaid intensiivsest tegevusest fenomeniga, mis võimaldas Bohril, seost rohkem vaistlikult tunda kui tuletada.

Heisenberg oli võlutud Bohrist ja tema füüsikast, aga mitte ainult Heisenberg. Füüsikud kohtusid konverentsiõhtudel tihti omavahel. Bohr avas nendele uue vaimse maailma. Bohri ettekanded jätsid nendele mulje, et nad äkki kvantteooria pärisseoseid mõistsid.

Heisenberg läks varsti Göttingeni tagasi, sest Sommerfeld reisis pooleks aastaks Wisconsinisse külalisprofessoriks, ja ta korraldas Heisenbergi jaoks kolleegi Max Borni juures stuudiumi. Nii läks Heisenberg talvel 1922/23 kuulusse Georg-August-Ülikooli.

4 Göttingeni matemaatika kindluses

Göttingeni Ülikooli peeti alates Carl Friedrich Gaußi ajast matemaatika kindluseks. Borni kutsuti alles aasta varem sinna, et „*siin oma rahvas 'kvantiseerida', et Teile natuke konkurentsi teha*“, nagu ta Sommerfeldile kirjutas. Born ei olnud kolonel, vaid „peen musikaalne vaim“, nagu sõbrad ütlesid. Ta korraldas seminari, teemaks Bohri teooria, ja kuna ainult kaheksa füüsikut ja matemaatikut osalesid, toimus see tihti Borni korteris, ja proua Born toetas koogi ja puuviljadega. Born pidas Heisenbergi „vähemalt nii andekaks nagu Paulit“.

Heisenberg oli nüüd viiendal semestril, aga ta pälvis teadlaste ringkonnas juba nime. Pakkumine tuli Hamburgist, aga läks jälle luhta. Siis sai Born aru, et Heisenberg oli tema jaoks õige juveel, ja ta kirjutas Sommerfeldile ja palus Heisenbergiga lahkelt rääkida, et too Borni juures habiliteeriks. Sommerfeld oli rahutu. Tema meistertudengil polnud siiani mitte ühtegi eksamit sooritatud, ja nüüd räägiti juba habilitatsioonist. Heisenberg kinnitas, et tal oli plaanis Sommerfeldi juures doktorieksamit teha ja tuli suvel 1923 Müncheni instituuti tagasi. Pärast (mitte väga õnnestunud) eksamit läks ta oktoobris 1923 Göttingeni Borni juurde.

Teoreetilise füüsika assistent oli Göttingenis Friedrich Hund, aga Heisenbergi peeti stipendiaadina siiski ka assistendiks. Tugeva matemaatika haru kõrval, mida eelkõige Felix Klein ja David Hilbert esindasid ja mille poole ka Born kaldus, oli eksperimentaalfüüsik James Franck väärtuslik täiendus. Born, kes teda tudengiajast tundis, paigutas teda füüsikalise intuitsiooni suhtes samale astmele nagu Michael Faraday'd. Koostöös Borniga püüdis Heisenberg *„leida üleminekut ainult sümbolsest kasutatav ja sellepärast ainult kvalitatiivselt õigest mudelmehaanikast õigesse kvantmehaanikasse.“* Alguses aga valmistas ta oma habilitatsiooni käsikirja mõne kuu jooksul Zeemani efekti teemal, ja Born võttis töö vastu. Semestri järel läks ta nädalapikkusele matkale, mis kinnitas tema armastust Saksamaa vastu, ja selle peale oli ta stuudiumil Kopenhaagenis. Sellega oli õpperänd lõpetatud.

5 Loodusteadlase poeesia

Heisenberg oli tundnud, et „kvantmõistusest“ haarati Kopenhaagenis teistmoodi kinni kui Münchenis. Münchenis võeti Bohri õpetus mingis varases arenguseisundis üle. Alus oli Bohr-Sommerfeldi aatommudel oma kvanttingimuste ja -keeldudega. Bohr aga oli vahepeal veendunud, et ainult kindlameelse ärapöörumisega näitlikest kujutlustest oleks võimalik lahendusse jõuda. Jäi täiesti lahti, kus muutusi pidi tegema. Nurjus Bohri katse Leibnizi energiasäilimise printsiipi ohverdada, et aatomis toimuvatest ja inimvaimule nii kummalistena paistvatest sündmustest aru saada. Varasuvel 1925.a. paistis, et kõik püüdlused sattusid ummikusse. Pauli kirjutas: *„Füüsika on praegu jälle väga untsus. Minu jaoks vähemalt on see raske, ja ma sooviksin, et ma oleks filmikoomik või midagi sarnast ja ei olnuks midagi füüsikast kuulnud. Nüüd loodan ma siiski, et Bohr päästab meid uue ideega. Ma palun temaltki seda tungivalt.“* Vastus aga ei tulnud Bohrilt, vaid hoopis Heisenbergilt.

„Põhimõte on, et igasuguste suuruste arvutamiseks nagu energia, tihedus jm tohivad ilmuda ainult kontrollitavate suuruste vahel kehtivad seosed.“ See oli positivismi filosoofia meenutamine. Aga vastuolus Machi positivismiga oli see ka praktiline, sest Einsteini edukas positivistlik printsiip kajas veel füüsika maailmas, et „absoluutse seisuga mõistetele ei vas-

ta mingid omadused või nähtused.“ Mõiste kaudu loomist nimetatakse loodusteadlase poeesiaks. Heisenberg oli vastuvõtlik Einsteini relatiivsusteooria poeesiale, ja tema kahtlus pöördus „elektroni lennujoonte“ vastu aatomis.

Heisenberg: „*Klassikalises teorias piisab liikumise Fourieri rea teadmisesest, et kõike arvutada, mitte ainult dipolmomenti. . . . On nüüd mõistlik oletada, et kõik on kvantteooria üleminekutõenäosuste ehk vastavate amplituudidega antud. Saab sellepärast üritada, võrrandeid kvantteoreetiliselt teisiti tõlgendada, ja niisugune tõlgendamine järeldub vältimatult.*“ Nende poolt otsitud füüsika oli teatavasti midagi muud kui klassikaline füüsika. Kvantteoreetiline füüsika ilmus nagu uus maa, mis oli mereväina taga juba uduselt nähtav. Väin oli mõnes paigas lai, mõnes paigas aga ka kitsas. Heisenberg leidis täpselt koha, kus kaugus oli kõige väiksem, ehitas silla ja astus uuele maale.

Nagu kosmonaudil uuel taevakehal, oli liikumine keeruline. Füüsikalises mõttes tähendas see, et aatomi probleem oli veel liiga raske. Uusi ideid pidi katsetama lihtsamal kujutisel, näiteks harmoonilise ostsillaatori puhul. Kuna harmooniline ostsillaator ei luba üleminekuid, pöördus ta anharmonilisele ostsillaatori poole, millega juba Max Born ja tema tudeng Pascual Jordan oli tegutsenud. Võib-olla oli õnnelik kokkusattumus, et just sel hetkel piinas Heisenbergi heinapalavik, nii et ta võttis kümme päeva puhkust ja sõitis Helgolandile saarele Põhjameres.

6 Uusaja koit

„*Helgolandil saarel oli hetk, kus mulle tuli äkiline selginemine, kui ma aru sain, et energia on ajaliselt konstantne. Oli päris hilisöö. Ma arvutasin suure vaevaga välja, ja nii oligi. Siis ronisin kaljule, ootasin päikesetõusu ära ja olin õnnelik.*“ Heisenberg ei maganud väga erutuse pärast neil päevil, ja tagasisõidul Göttingeni külastas ta Paulit Hamburgis. Pauli oli skeptiline, aga ta julgustas oma sõpra. Ja kui Heisenberg Bornile oma arvutust näitas, oli ta huvitatud, aga tundis natuke hämmastust – eriti sellepärast, et elektroni lennujoone mõiste oli täiesti eemaldatud. Sellest hoolimata saatis ta artikli Zeitschrift für Physikile.

Sel ajal, kui Paul Ehrenfest oli kutsunud Heisenbergi Hollandisse ja Ralph Fowler Cambridge'i, süvenesid Born ja Jordan Heisenbergi töö matemaatilistesse järeldustesse, ja Born tundis mõtiskledes oma väsimust. Äkki aga tabas teda nagu valguskiir, kui ta ära tundis, et Heisenberg tegustes ebateadlikult maatriksi kordamisega – Borni lemmikteemaga. Ainult mõne päeva jooksul leidsid Born ja Jordan lahendava võrrandi

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i},$$

mille kaudu matemaatiline skeem sai läbipaistvaks. Nii tekkisid need kaks publikatsiooni „Zur Quantenmechanik I“ (Born ja Jordan) ja „Zur Quantenmechanik II“ (Born, Heisenberg ja Jordan), viimane on tuntud ka nime „Kolmemehetöö“ all. Heisenberg aga ei olnud päris õnnelik, kuidas Born tema teooria matemaatilisse kujusse pakkis. Talle ei olnud oluline, et uus matemaatiline arvutusviis oli loodud, vaid hoopis uus füüsika. Ka Franck rõhutas, et ta ei saanud nendest maatriksitest aru.

7 Kopenhaageni tõlgendus

Oli jälle aeg paika vahetada. 1. mail läks Heisenberg teoreetilise füüsika dotsendina Kopenhaagenisse. Maailmale avatud õhkkonnas kohtus ta sellega, mis oli Göttingeni aatomfüüsika näiv alternatiiv. Austria füüsik Erwin Schrödinger, kes Albert Einsteini ja Max von Laue järel Zürichis õpetas, astus lainemehaanikaga üllatuslikult ette. Schrödingeri jaoks oli aatom võnkuv süsteem, mille jaoks on loendatavalt palju võnkumiskujusid (alg- ja ülemhelid). Veenväl viisil andis Schrödingeri lainevõrrand ilma lisaoletusteta vesinikaatomi spektraaljoonte õigeid väärtusi.

Niels Bohri ja tema Kopenhaageni ringi jaoks, mille juurde nüüd ka Heisenberg kuulus, oli Schrödingeri poolklassikaline tõlgendus suur väljakutse. Mõlemad teooriad, nii Göttingenis arendatud kui Schrödingeri oma, andsid õiged tulemused, aga nad olid ilmselt vastuolus. Üks nendest räägis osakestest, teine lainefunktsioonidest. Sellepärast oli Bohri ringkonna ja Heisenbergi ja Bohri arutelu teema, kuidas matemaatilise struktuuri

taga „füüsikalise tuuma“ paljastada. Arutelud algasid tavaliselt alles õhtul Heisenbergi katuselokoris ja kestsid tihti kuni keskööni. Argumentides poolt või vastu prooviti kõike seniseid ettepanekuid – Schrödingeri, Einsteini ja Borni oma. Sagedasti lõppes arutelu ahastuses kvantteooria arusaamatuse üle. Sellepeale jalutas Heisenberg lähedases pargis ja küsis endalt meeleheitlikult: „Kas on võimalik, et lootus on nii hull?“

Heisenbergi ja Bohri arutelu sattus pinge all. Bohr püüdis, laine- ja osakestepildi duaalsust algpunktiks võtta, Heisenberg aga tahtis, ilma lainemehaanikalt laenamata seda teed edasi minna, mis oli kvantmehaanika ja Diraci teisendusteooria kaudu ette joonistatud. Lõpuks sõitis Bohr Norra suusatama, sel juhul vastupidiselt traditsioonile ilma Heisenbergita. Heisenberg konstateeris hiljem, et nad olid teineteist ilmselt tarkate vastuväidetega häirinud. Samal ajal kirjutasid mõlemad käsikirja, millest nad hiljem aru said, et need olid sarnased. Kuna Heisenberg arendas tuntud määramatuse printsiipi, tegeles Bohr komplementaarsusprintsiibiga. Kui Heisenberg Paulile oma käsikirja saatis, vastas too entusiastlikult: „Uusaja koit! Kvantteorias läheb valgeks!“

Kui Bohr 1927.a. märtsikuu keskel Kopenhaagenisse tagasi tuli, oli Heisenbergi käsikiri valmis. Mõlemad olid nüüd seisukoha saavutanud, nii et jõuti vastastikusele arusaamisele. Oma uue filosoofiaga astus Kopenhaageni ringkond esmaskordselt Como konverentsil septembris 1927.a. avalikkuse ette. „Kopenhaageni tõlgendus“ Bohri komplementaarsuse ja Heisenbergi määramatuse printsiibiga peasammastena mõjutas nüüdsest peale loodusteaduse mõtteviisi. Mõnesid füüsikuid ei veendud, nagu Albert Einstein, Max Planck, Max von Laue, Louis de Broglie ja Erwin Schrödinger, aga tollaegne noor füüsikute põlvkond jagas uut ideed. Nagu Max Planck oma kogemuse järgi on öelnud: „Uus teadustõde harilikult ei löö niiviisi läbi, et vastaseid veendakse, vaid et vaenlased järkjärgult välja surevad.“

Heisenbergist sai varsti Leipzigi professor, „Saksamaa noorim professor“, nagu ajaleht kirjutas. Seal oli tal nüüd võimalik omaenda koolkonda üles ehitada. Enne aga oli kuulus Solvay konverents, kus kõik tegelased kohtusid ja millega meie reis nüüd ka lõpeb (film).