



L. V A L T

MIS ON
KVANTIMEHAANIKKA

A-17346

EESTI NSV POLIITILISTE JA TEADUSALASTE
TEADMISTE LEVITAMISE ÜHING

L. VALT

MIS ON
KVANTMEHAANIKA

Nr. 292

00882

I. KVANTTEOORIA TEKKIMINE JA TA ESIMESED EDUSAMMUD

1. Klassikalise füüsika maailma- pilt

Möödunud sajandi kaheksakümnendatel aastatel kujunes füüsika arengus oma-pärane olukord. Näis, et kõik suured avastused on tehtud ning füüsika on saamas niisamasuguseks «lõpetatud» teaduseks nagu näiteks elementaarne geomeetria. Tõepoolest, Newtoni klassikaline mehaanika koos Maxwelli elektromagnetiliste nähtuste teooriaga suutis rahuldavalt seletada kõiki tol ajal tuntud nähtusi. Oldi arvamusel, et ees seisab ainult olemasolevate teooriate rakendamine uutel konkreetsetel juhtudel ja mõnede, üsna väikeste teoreetiliste raskuste kõrvaldamine. «Kas on jäänud veel midagi uurida?» küsis G. R. Kirchhoff, üks tollaegseid väljapaistvamaid füüsikuid. Tundus, et füüsika grandioosne ehitus on valmis ning on jäänud vaid viimistlustööd, mis ei paku kuigi palju teadlase loomingulisele vaimule. Ilmekalt väljendas tollaegset olukorda inglise füüsik W. Thomson, öeldes, et füüsika selges taevas on ainult kaks väikest tumedat pilve (s. t. kaks nähtust, mille seletamine ei ole seni rahuldavalt õnnestunud): Michelsoni katse negatiivne tulemus ja seaduspärasus, mis määrab energia jaotumise hõõguvate kehade poolt kiiratava valguse spektris. Muidugi võis loota, et ka need raskused varem või hiljem ületatakse.

Tegelikkus näitas hoopis vastupidist. Kui jätkata Thomsoni võrdlust, siis võib ütelda, et need kaks pilvekest hakkasid kiiresti paisuma ning katsid varsti kogu taeva. Need klassikalise füüsika raskused said lähtepunktiks kahele uuele teooriale, mis muutsid põhjalikult seniseid ettekujutusi materia omadustest ja struktuurist, viisid ebatavalisele progressile füüsikas, kutsusid esile uute tehnika-

harude tekkimise. Nende teooriate valguses rikastusid oluliselt ka meie teadmised maailmas valitsevatest üldistest seaduspärasustest. Leidis kinnitust fakt, et ainsaks tõeliselt teaduslikuks filosoofiaks, mis õigesti peegeldab maailma muutumise ja arengu üldisi seaduspärasusi, on Marxi ja Engelsi poolt loodud dialektiline materialism.

Missugused on siis need uued suunad füüsikas?

Michelsoni katse negatiivne tulemus, mis viis loobumisele ettekujutustest maailmaetri kui erilise keskkonna olemasolust, milles toimub valguse levimine ja teised elektromagnetilised protsessid, sai lähtepunktiks relatiivsusteooriale, mille lõi A. Einstein 1905. aastal. Soojuskiirguse seaduste otsimine viis aga kvantide teooriale. Selle teooria arengust ning uudest, mida ta tõi meie teadmistesse materia ehituse ja liikumise seaduspärasuste kohta, räägimegi käesolevas brošüüris.

2. Uued — rida avastusi, mis lõppkokkuvõttes viisid klassikalise füüsika maailmapildi kokkuvarisemisele. Esimene nendest oli uut liiki kiirguse avastamine saksa füüsiku W. Röntgeni poolt (1895). Hiljem selgus, et tegemist on väga väikese lainepikkusega elektromagnetilise kiirgusega. Aasta pärast Röntgeni avastust leidis prantsuse teadlane H. A. Becquerel, et uraani soolad on allikaks kiirtele, mis analoogiliselt röntgenikiirtele läbivad valgusele läbiipaistmatuid kehi. Selle probleemi edasine uurimine Marie Sklodowska-Curie ja Pierre Curie poolt viis uute keemiliste elementide — polooniumi ja radiumi — avastamisele. Selgus midagi ebaharilikku — nende elementide aatomid lagunesid ilma igasuguse nähtava põhjuseta, muundudes teiste elementide aatomiteks. Selgus, et seda lagunemiskiirust ehk teiste sõnadega radioaktiivset protsessi ei mõjuta välised tingimused, nagu rõhk, temperatuur jne.¹ Radioaktiivsuse avastamine kõigutas tugevasti klassikalise füüsika alusmüüre — oli ju seni kujutletud aatomit kui midagi täiesti jagamatut. Kui aga aatomid võivad jaguneda, siis peab neil olema ka mingi sisemine struktuur. Tekkis küsimus, mis on siis nendeks vähimateks osadeks, millest koosnevad seni jagamatuteks peetud aato-

¹ Hiljuti avastati, et radioaktiivsete aatomite tuumade lagunemise kiirus sõltub veidi ka sellest, missuguse keemilise ühendi koostisse aatom kuulub.

mid? Sajandivahetusel avastatigi üks sellistest osake-
See oli negatiivset elektrilist laengut kandev osake —
elektron. Sellest ajast alates tekkis kujutus elektrivoolust
kui vähimate «elektriaatomite» — elektronide — liikumi-
sest. Elektrihulgad ei saa olla meelevaldse suurusega, vaid
nad peavad olema vähima «laenguportsjoni» — elekt-
roni — laengu täiskordsed. Pidevalt muutuva, mis tahes
suurusega laengu asemele tuli katkeliselt, «annuste»
kaupa muutuv suurus. Selline seisukoht oli vastuvõtmatu
klassikalisele füüsikale, mis opereeris pidevalt muutuvate
suurustega. Varsti näeme aga, et see katkevus, diskreetsus
avaldub veel teisteski materia omadustes.

Elektroni liikumise seaduspärasuste uurimine löi
uue mõra vanadesse ettekujutustesse. Selgus nimelt, et
elektroni mass sõltub sellest, missuguse kiirusega ta lii-
gub! See oli täiesti seletamatu nähtus klassikalise füü-
sika seisukohalt, samal ajal aga vaieldamatu eksperimen-
taalne fakt. Tekkinud olukorra võis lahendada ainult
seni igavesteks peetud füüsikaliste põhiseisukohtade
revideerimine. Uute eksperimentide kaudu avanes inimese
ees aatomisene maailm — üliväikeste mõõtmete ja mas-
side ning suurte kiiruste valdkond, mis hiljem sai mikro-
maailma nime. Paljud füüsika mõisted ja seadused, mis
tulenesid meid ümbritseva makromaailma nähtuste uuri-
misest, ei olnud mikromaailmas rakendatavad. Aatomi-
sisesed protsessid ning mikroobjektid (näiteks elektron,
mille mass on ligikaudu 10^{-27} g) ei ole meile vahetult
tajutatavad. See andis mõnede füüsikutele alust väita,
nagu mikromaailma, aatomeid ja elektrone objektiivselt ei
eksisteeriks. Paljude makromaailma seaduste mitteraken-
datavust mikrovaldkonnas püüti tõlgendada kui igasuguse
seaduspärasuse puudumist. Tekkis nn. «füüsikaline» idea-
lism eesotsas Machi ja Ostwaldiga. Elektroni massi muu-
tumist kiiruse muutumisel püüti tõlgendada kui materia
tekkimist ja kadumist. Kui aga materia pole midagi jää-
vat, siis on ka materialism ümber lükatud, arutlesid «füü-
sikalised» idealistid. Kodanlus püüdis uute avastuste tõttu
tekinud raskusi kasutada poliitilise reaktsiooni huvides:
kui looduses puuduvad seaduspärasused, miks peaksid
need siis olema ühiskonnas? Kui juba loodusnähtusi ei
saa seletada materialismi seisukohalt, siis osutub ümber-
lükatuks ka materialistlik ajalookäsitlus, mis on töölis-
klassi võitluse teoreetiliseks aluseks.

Väljapääsu füüsikas tekkinud ummikust näitas V. I. Lenin oma töös «Materialism ja empiriokrititsism», kus ta juurteni paljastas reaktioonäride katsed kasutada teaduse arengu raskusi oma klassihuvides. Ta avas «füüsikalise» idealismi tunnetusteoreetilised ja sotsiaalsed alused. Lenin näitas, et uued avastused ei tähenda mitte materia kadumist, vaid nende piiride kadumist, milleni me tundsiime materiat seni, ja et osa füüsikuid libastus idealismi dialektika mittetundmise pärast. Uued avastused aga on seletatavad ainult lähtudes dialektilis-materialistlikelt filosoofilistelt positsioonidelt. Nagu näeme kvantteooria arengu käsitlemisel, leidis see Lenini seisukoht edaspidi täielikku kinnitust.

3. **Musta kiirguse** Igapäevase elu kogemustest on teada, et **mõistatus** hõõguvad kehad kiirgavad valgust. Kui keha temperatuur on madal, siis kiirgusspekter sisaldab peaaegu ainult niisuguse lainepikkusega kiiri, millele inimsilm ei reageeri. See on nähtamatu, infrapunane kiirgus. Alates temperatuurist $+500^{\circ}\text{C}$ hakkab keha kiirgama ka nähtavat valgust. Keha temperatuurist oleneb see, misugusele lainepikkuste piirkonnale langeb maksimum kiiratud energiast. Temperatuuri tõustes energia maksimum nihkub suurematelt lainepikkustelt (punased kiired) väiksematele (sinised ja violetid kiired). Seejuures kasvab ka kiiratud üldine energiahulk, mis on võrdeline absoluutse temperatuuri neljanda astmega (Stefan-Boltzmanni seadus). Selle seaduse tuletasid füüsikud rakendades termodünaamilisi printsiipe kiirgusprotsessidele. Seadus kehtib nn. absoluutselt musta keha kiirguse kohta. Absoluutselt mustaks nimetatakse keha, mis neelab kogu temale langeva valguse, seda üldse mitte tagasi peegeldades; kiirgust, mida selline keha annab, nimetatakse mustaks kiirguseks. Kehi, mis täpselt rahuldaksid nimetatud nõuet, pole olemas, küll aga leidub kehi, mis on omadustelt lähedased absoluutselt mustale kehale (nõega kaetud plaat). Teaduslikes uurimustes kasutatakse absoluutselt musta mudelina õõnsat keha, millel on väike ava. Selline ava neelab kogu temale langeva kiirguse (täpsemalt, kiirgus neeldub paljukordsel peegeldumisel keha õõnsuses; välja pääseb vaid tühine osa avale langevast kiirgusest). Kuumutades sellist keha, saame tema avast kiirgust, mis ühtib

spektraalselt koostiselt absoluutselt musta keha kiirgusega. (Lähedane absoluutselt mustale kehale on näiteks avatud keldriaken eemalt vaadatuna. Kui akna mõõtmed on väikesed, siis sisenev valgus neeldub peaaegu täielikult seintes ning aknaava paistab väljast vaatajale mustana).

Kuna osutus võimalikuks taandada reaalsete kehade kiirgusseadusi absoluutselt musta keha kiirgusseadustele, siis pakkus viimaste uurimine füüsikutele suurt huvi. Vajadus selliste uurimuste järele oli tingitud praktika nõuetest. Sajandivahetusel arenes hoogsalt valgustustehnika ja töötati välja ka vastav teooria. Katsest oli hästi teada energia jaotus absoluutselt musta keha spektris lainepikkuste järgi erinevatel temperatuuridel. Nüüd oli sama tulemus vaja saada teoreetilisel teel. Ja siin tekkiski suur raskus. Füüsikute poolt tuletatud valemid kehtisid vaid suhteliselt pikkade lainete puhul (spektri infrapunane ja nähtav osa), ei sobinud aga üldse katseandmete seletamiseks spektri ultravioletses osas. See lahkumine sai «ultravioletse katastroofi» nime. Tõsi küll, saadi ka valem, mis andis hea kooskõla katsega spektri lühilainelises osas, kuid ... pikalainelises osas polnud temaga midagi peale hakata. Kui aga teoreetilistest valemitest püüti arvutada keha poolt kiiratavat koguenergiat, siis saadi absurdne tulemus: energia peaks olema lõpmata suur!

Ekspimentaatorid täpsustasid katsetulemusi, teoreetikud kontrollisid arvutusi. Mõlematel näis olevat õigus ...

«Musta kiirguse mõistatuse» lahendas 1900. aastal saksa füüsik M. Planck. Ta jõudis järeldusele, et kiirgusjaotuse õige valemi saamiseks tuleb oluliselt muuta neid seisukohti, mis moodustasid füüsika vundamendi. Planck oletas, et aatom võib kiirata ja neelata valgust ainult kindlate annustena, et kiiratavad energiahulgad ei või olla mis tahes suurusega, vaid peavad olema täiskordsed mingist vähimast suurusest $h\nu$:

$$E = nh\nu,$$

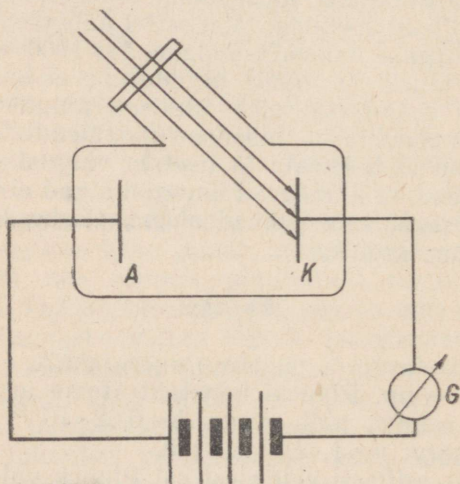
kus E on kiiratav (või neelatud) energiahulk, ν on kiirguse sagedus h — nn. Plancki konstant (tema arvuline väärtus, nagu selgus, pidi olema $h = 6,62 \cdot 10^{-27}$ erg.sek), n aga on täisarv: $n = 1, 2, 3 \dots$ jne.

Lähtudes sellisest eeldusest sai Planck valemi, mis oli täpselt kooskõlas katseandmetega. Tekkis omapärane olu-

kord: enamik füüsikuid tunnistas küll Plancki valemit, kuid mitte hüpoteesi kiirgusenergia mittepidevast, «annuselisest» iseloomust. Kuid, nagu ütleb vene vanasõna, ei saa laulust sõnu välja visata, nii ei saadud teistel eeldustel kiirguse iseloomu kohta õiget valemit tuletada. Ettekujutus energiakvantidest («annustest») juurdus suurte raskustega, sest see näis olevat karjuvas vastuolus kogu senise füüsikaga, eriti valguse lainetusteooriaga. Viimane oli leidnud kinnitust katsetes, kus toimub valguslainete liitumine ja saadakse interferentspilt. Interferentsinähtusi läheb korda seletada ainult siis, kui valgust käsitletakse lainetusnähtusena. Seetõttu arvas enamik füüsikuid, et varem või hiljem kõrvaldatakse «ebarahuldav» kvantide hüpotees, säilitades seejuures Plancki valemi. Tegelikkus näitas vastupidist. 5 aastat hiljem, 1905. aastal, sai see hüpotees uut tuge suure füüsiku A. Einsteini töös, kus ta esitas fotoefekti teooria.

4. Fotoefekt 1888. aastal avastas Moskva ülikooli professor A. G. Stoletov nähtuse, mida ta nimetas «aktino-elektriliseks» ja mis tänapäeval kannab fotoefekti nime. Nähtus seisneb järgmises:

Õhust tühjaks pumbatud nõusse paigutatud kahe pingestatud metallelektroodi *A* ja *K* vahel (vt. joon. 1) tekib



Joon. 1.

vool, kui valgustada elektroodi K , mis on ühendatud patarei negatiivse poolusega. Voolu ahelas mõõdab galvanomeeter G . Plaadi A valgustamisel voolu ei teki. Siit järeldub, et valguse toimel eralduvad negatiivse poolusega ühendatud elektroodist (katoodist) laetud osakesed, mis liiguvad positiivsele elektroodile A (anoodile) ja sulevad nii vooluahela. On selge, et need osakesed peavad olema negatiivse laenguga. Sellised osakesed — elektronid — olid 1905. aastal juba üsna hästi tuntud.

Fotoefekti võis kvalitatiivselt seletada järgmiselt: valguslaine langemisel katoodile satuvad elektronid sundvõnkumistesse, mille amplituud on seda suurem, mida intensiivsem on valgus (viimane järeldub otseselt lainetusteooriast). Küllalt suure amplituudi, s. t. valguse suure intensiivsuse korral elektron «rebib» end katoodilt lahti ja liigub siis muidugi positiivselt laetud anoodile. Valguse lainepikkusel ei peaks klassikalise teooria järgi olema mingit tähtsust. Fotoefekti seaduspärasuste lähem uurimine näitab aga, et selline pilt ei vasta tegelikkusele. Selgus nimelt, et mitte igasuguse lainepikkusega valgus ei tekita fotoefekti, s. t. elektronide lahtirebimist katoodilt. Nähtus ilmneb vaid siis, kui katoodile langeva valguse lainepikkus λ on väiksem teatavast piirist λ_0 , mis omakorda on katoodi materjalist. (Oletame, et valgustatakse ühevärvilise e. monokromaatses, s. t. sama lainepikkusega valgusega.) Kui $\lambda > \lambda_0$ ehk vastavalt sagedus $\nu < \nu_0$, siis isegi väga intensiivne valgus ei suuda katoodilt lahti rebida ühtki fotoelektroni. Ja vastupidi, kui $\lambda \leq \lambda_0$, ehk vastavalt $\nu \geq \nu_0$, tekib fotoefekt ka väga nõrga valguse toimel. Alles siis, kui nimetatud tingimus on täidetud, suureneb eralduvate fotoelektronide arv valguse intensiivsuse kasvades.

Kõik katsed seletada seda fotoefekti omapära valguse lainelisest loomusest lähtudes, ebaõnnestusid. Einstein andis nähtuse teooria, süvendades Plancki kvantide hüpoteesi. Planck arvas, et katkendlik iseloom on omane ainult valguse kiirgumis- ja neeldumisprotsessile, valguse levimine aga toimub ikkagi pideva elektromagnetilise lainena. Küsimusele, kas ka valguse levimine toimub üksikute «annuste», kvantide näol, vastas Planck naljatooniliselt: «Kui õlut võetakse vaadist pooleliitrisest kannuga, ega see siis tähenda, et ta vaadis on pooleliitriste annustena.» Einstein aga omistas üksikutele kvantidele täiesti

iseseisva tähenduse. Kuna suurematele sagedustele vastavad suurema energiaga kvandid vastavalt seosele $E=h\nu$, siis on selge, et fotoefekti tekitamiseks on vajalikud teatava «kaliibriga» kvandid. Tähendab, tuleb oletada, et kvandid eksisteerivad kogu aeg ja valguse levimine on üksikute osakeste — kvantide — vool. (Hiljem hakati valguse kvante nimetama ka footoniteks.)

Einstein andis fotoefekti kirjeldamiseks võrrandi

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Siin $h\nu$ on langeva valguskvandi energia, millest osa kulub elektroni katoodist väljapaiskamiseks (nn. väljumistöö A), osa aga muundub elektroni kineetiliseks energiaks $\frac{mv^2}{2}$ (m — elektroni mass, v — kiirus pärast katoodist väljumist). On selge, et kui $h\nu = A$, siis $v = 0$, s. t. sel juhul kvandi energiast piisab parajasti selleks, et elektron välja lüüa, kui aga $h\nu < A$, siis fotoefekti üldse ei saa tekkida, olenemata valguse intensiivsusest, s. t. langevate kvantide arvust.

Fotoefekti olemus oli nii küll selgitatud, kuid tundus, et see polnud teaduses samm edasi, vaid süvendas veelgi tekkinud ummikut. Ettekujutus valguse osakestest, Newtoni valgusteooria taaselustamine, tundus füüsikutele täiesti vastuvõtmatuna. Oli ju teada arvukalt nähtusi, mis olid mitte ainult hästi uuritud, vaid leidsid ka laialt rakendust praktikas ja tõestasid vastuvaidlematult, et valgus — see on lainetusnähtus. Selgus, et kõik valgusnähtused võis jagada kolme gruppi — ühed, mida sai seletada ainult sel teel, et valgust käsitleti kui lainetusprotsessi, teised, mis seletusid ainult siis, kui valgust käsitleda osakeste vooluna (s. t. kvanthüpoteesi alusel), ja lõpuks kolmandad, mis seletusid nii ühel kui ka teisel viisil. Kuid «terve mõistus» nõudis ühest vastust — kas see või teine? Lainetus või osakeste vool? Elementaarne loogika ei luba üksteist välistavate väidete samaaegset tõesust. Lained täidavad ruumi pidevalt, osakesed aga tähendavad valguse «teralist» struktuuri.

Einstein muidugi nägi neid raskusi, kuid ta nägi ka kaugemale. Toome siin Einsteini mõtteavalduse, mis kujukalt näitab, et see geniaalne füüsik oli mitte ainult materialist, vaid ka väljapaistev dialektik (varem püüdsid

mõned autorid tembeldada Einsteini üksikute tema väljenduste meelevaldse tõlgenduste põhjal idealistiks-metafüüsikuks): «Aga miks «kas — või?» (Vastates küsimusele, kas valgus on ikkagi osakeste vool või lainetusprotsess. L. V.) Aga miks mitte nii — kui? Valgus — nii lained kui osakesed samaaegselt. Katkev ja pidev korruga. Loodus armastab vastuolu — vastuolu, mis paikneb seejuures asjade tuumas. Tulevik näitab, kas see konkreetne vastuolu valguse struktuuris ei ole lähtepunktiks uutele, suurimatele sündmustele füüsikas...»

Tulevik kinnitas Einsteini sügavat ettenägelikkust. Valgusele on tõelisuses omased kaks vastuolulist külge. Need on omavahel dialektilises ühtsuses. Siin pole tegemist loogilise vastuolu või veaga, mis tuleks kõrvaldada, et jõuda välja valguse «tõelisele» (s. t. kas kvant- või lainelisele) olemusele. Vastuolu pole siin mitte ainult meie mõtlemises või arusaamistes, vaid ennekõike tegelikkuses. Metafüüsiline filosoofia, mis käsitleb mõtlemist üksteist absoluutselt välistavates vastandites, osutub siin võimetuks. Kuid tõeliselt teaduslikku filosoofiat, dialektilist materialismi füüsikud tol ajal veel ei tundnud. See raskendas uute avastuste sisulist mõistmist, pidurdas füüsika arengut, tõukas osa füüsikuid idealismi libedale pinnale.

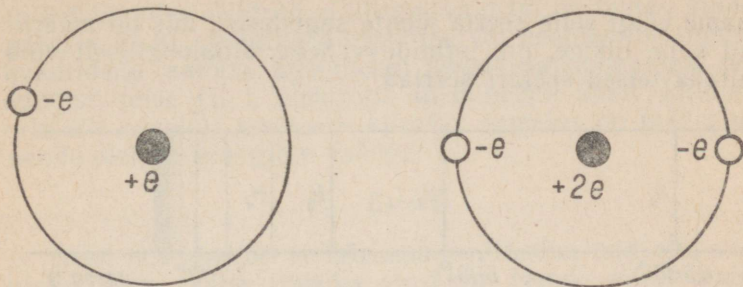
Tehti palju katseid kooskõlastada kvanthüpoteesi klassikalise mehaanikaga. Selles suunas töötas ka Planck ise. Ta kirjutas: «... ma olen alati seisnud selle eest, et võimalikult tihedamini siduda kvanthüpoteesi klassikalise dünaamikaga, rikkudes viimase piire ainult siis, kui katsetelised faktid ei jäta mingit teist väljapääsu.» Planck tõi ühes oma loengus järgmise analoogia seose $E = hv$ tõlgendamiseks: kujutlegem õunapuud, millel õunavarte pikkus l kahaneb võrdeliselt kõrguse (H) ruuduga maapinnast. Sel juhul õuna kui pendli omavõnkesagedus vastavalt pendli võnkeseadusele on

$$v \sim \frac{1}{\sqrt{l}} \sim H.$$

Kui nüüd puud raputada teatava sagedusega, siis õunad vastaval kõrgusel satuvad resonantsi ja langevad alla. Nende kineetiline energia maapinnale jõudes on võrdeline kõrgusega, seega ka sagedusega: $E \sim v$. Kuid sellele analoogiale ei vasta midagi tegelikkuses. «Katselised faktid ei jätnud teist väljapääsu» peale loobumise senistest kujutlustest.

5. Aatomi ehituse Pärast elektronide avastamist oli selge, et probleem. Bohri nad kuuluvad aatomi koostisse, kuid aatokvantteooria mi struktuuri kohta saadi esimesed andmed alles 1911. aastal inglise füüsiku E. Rutherfordi tööde tulemusena. Rutherford kasutas oma katsetes radioaktiivsel lagunemisel eralduvaid nn. alfaosakesi, millel on positiivne laeng (alfaosakesed on identsed heeliumi aatomi tuumadega). Ta juhtis alfaosakeste kimbu õhukele metall-lehele ning uuris, millises suunas nad pärast lehekese läbimist lendavad. Osakeste registreerimiseks kasutas ta luminesceerivat ekraani, millele langedes osake tekitab väikese valgussähvutuse. Pimeduses on selline sähvutus juba palja silmaga märgatav. Selgus, et küllalt õhukese plaadi läbib enamik alfaosakesi sirgjooneliselt, väiksem osa neist kaldub teatava nurga all kõrvale, kuna üksikud osakesed põrkuvad peaaegu täiesti tagasi. Elektronid ei saa alfaosakesi oluliselt kõrvale kallutada, kuna nad on viimastest umbes 7000 korda kergemad. Selleks et alfaosakest tagasi «põrgatada», peab aatomis olema positiivselt laetud osake, mille mass on sama suurusjärku. Katse näitas, et tagasipõrkumine on võrdlemisi haruldane nähtus. Seega tuleb arvata, et positiivne laeng on aatomis koondunud üsna väikesesse ruumalasse. Muidu ei saaks alfaosake läbida lehekest (mille paksuse ulatuses paikneb ikkagi tuhandeid aatomeid) ilma tunduva kõrvalekaldumiseta. Kuna aatomid tervikuna on elektriliselt neutraalsed, siis oli nende katsete põhjal täiesti loogiline püstitada järgmine aatomimudel: aatom koosneb positiivselt laetud tuumast, mille mõõtmed on palju (umbes 10 000 korda) väiksemad aatomi enda mõõtmetest; tuuma ümber paiknevad elektronid. Kuna nad ei «lange» elektrostaatilise tõmbejõu toimele tuuma peale, siis tuli oletada, et elektronid tiirlevad ümber tuuma nii, et tekkiv kesktõukejõud selle tasakaalustab. Rutherfordi mudeli kohaselt on aatomi ehitus analoogiline päikesesüsteemi ehitusega; erinevus on selles, et gravitatsioonijõu asemel on siin elektrostaatiline tõmbejõud.

Nii koosneb vesiniku aatom tuumast laenguga $+e$ (e on elektroni laengu arvuline väärtus; $e=4,8 \cdot 10^{-10}$ LÜ) ja tema ümber tiirlevast elektronist laenguga $-e$, heeliumi aatomi tuuma ümber peaks tiirlema 2 elektroni jne. (vt. joon. 2).



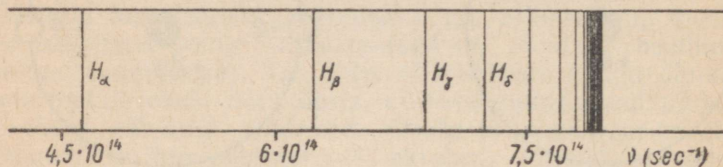
Joon. 2.

Nüüd oli vaja rakendada sellisele aatomimudelile mehaanika ja elektriõpetuse seadusi ning püüda selgitada teisi nähtusi, mis on seotud aatomi ehitusega, ennekõike muidugi optiliste kiirgus- ja neeldumisspektrite struktuuri. Spektroskoopilised uurimised näitavad, et isoleeritud aatomite (s. t. üheaatomilise gaasi või metalli auru) kiirgusspekter koosneb üksikutest joontest, sisaldab ainult üksikuid teatavaid lainepikkusi. Need lainepikkused (või vastavalt sagedused) on muutumatud ja iseloomulikud antud gaasile või aurule. See tõsiasi oli juba ammu saanud aluseks spektraalanalüüsile — elementide kindlaks-tegemisele nende iseloomulike spektrite järgi. Spektrite seaduspärasuste võrdlemine Rutherfordi aatomimudeliga pidi avama aatomi ehituse saladuse. «Spektrijooned moodustavad redeli, mida mööda me laskume aatomi sügavusse,» ütles selle kohta nimekas saksa füüsik A. Sommerfeld. Spektrijoonte paigutuses täheldati kindlaid seaduspärasusi, mis võimaldas spektri jagada üksikuteks joonte rühmadeks — seeriateks. Kõik spektrijooned seerias saab arvutada ühe valemi abil. Joonisel 3 on näidatud üks vesiniku spektri seeriatest, nn. Balmeri seeria, mis paikneb spektri nähtavas osas. Selle seeria joonte H_α , H_β jne. sagedused on määratud valemiga

$$v = Rc \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right),$$

kus R on nn. Rydbergi konstant (arvuliselt $R = 109\,677,7 \frac{1}{\text{cm}}$), c aga on valguse kiirus. Andes n -le täisarvulisi väärtusi alates kolmest (s. t. $n=3, 4, 5 \dots$),

saame kõigi selle seeria joonte sagedused, mis on määratud kahe liikme, nn. termide vahega. Analooiliselt võib esitada teised spektri seeriad.



Joon. 3.

Ülesanne seisib selles, et seletada katseliselt määratud spektraalseeriaid Rutherfordi aatomimudeli abil. Siin aga selgus, et klassikaline mehaanika ja elektrodünaamika ei tule sellega toime. Vastavalt klassikalise elektrodünaamika seadustele peab iga kiirendusega liikuv elektron kiirgama elektromagnetilisi laineid, s. t. valgust. Elektron, mis tiirleb aatomi tuuma ümber, liigub muidugi kiirendusega (ühtlasel ringjoonelisel liikumisel, nagu teada, avaldub kiirendus trajektoori kõverdumises). Kiirgamisel peaks elektron kaotama pidevalt energiat, mis tähendaks tema lähenemist tuumale mööda spiraali. Kuna seejuures muutub elektroni tiirlemisperiood, siis, vastavalt klassikalistele kujutlustele, peab muutuma ka kiiratav sagedus. Klassikalise teooria järgi peaks elektron langema ühe sajamiljondiku sekundi vältel tuumale. Niisiis, vastavalt selle teooria ennustustele 1) kiirgusspekter peaks olema pidev, s. t. sisaldama kõiki võimalikke lainepikkusi ja 2) aatom peaks olema ebastabiilne. Mõlemad järeldused on faktidega niisuguses vastuolus, mille kõrvaldamiseks klassikaline teooria ei anna vähimatki lootust. Rutherfordi aatomimudel põhineb aga vaieldamatutel eksperimentaalsetel andmetel ning järeldub nendest võrdlemisi ühesel viisil. Vastuolu lahendamiseks esitas taani füüsik N. Bohr 1913. aastal kompromisslahendusena aatomi kvantteooria. Ta formuleeris kaks täiendavat tingimust, mis olid vastuolus klassikalise füüsikaga, kuid võimaldasid selgitada spektrites ilmnevaid seaduspärasusi. Need nn. Bohri postulaadid on järgmised: 1) aatom eksisteerib ilma kiirgamata teatud statsionaarses seisundis kui tahes kaua. See tähendab, et on võimalikud niisugused elektroni orbiidid ümber tuuma,

millel liikudes elektron ei kiirga, vaid tal on teatav kindel energia E ; 2) valguse kiirgamine või neeldumine toimub kvantidena aatomi üleminekul ühest statsionaarsest seisundist teise (s. t. elektroni üleminekul ühelt kindlalt orbiidilt teisele); seejuures kiiratud sagedus on määratud nende olekute energiatega:

$$E_1 - E_2 = h\nu.$$

Need postulaadid ei tulenenud millestki, nad olid vastuolus kogu senise füüsika alustega. Nende sissetoomise ainsaks õigustuseks oli see, et nad võimaldasid seletada eksperimentaalseid fakte, tegelikkust, kuid viimane on muidugi argument, mille ees taanduvad kõik teised. Pealegi leidis statsionaarsete seisundite olemasolu otsekohe katselise kinnituse (nn. Frank-Hertzi katses).

Klassikalise teooria rakendamine Rutherfordi aatomimudelile koos Bohri postulaatidega andis teooria ja katse vahel vesinikuspektri selgitamisel sellise hea ja detailse kooskõla, mis ei saanud kuidagi olla juhuslik. Nii näiteks Bohri teoriast arvutatud Rydbergi konstandi väärtus ühtib väga täpselt katsest leitudga. Teooria edasine täpsustamine võimaldas selgitada vesiniku spektris niivõrd peeni detaile, et teooria õigsuses ei tekkinud enam mingit kahtlust. Kuid tal olid ikkagi oma nõrgad küljed. Esiteks jäi täiesti arusaamatuks Bohri postulaatide päritolu; need ei tulenenud millestki, vaid toodi teoriasse kunstlikult. See tõttu oli teooria sisemiselt vastuoluline. Kui vesiniku spektri selgitamisel Bohri teooria edu oli suur, siis juba Mendelejevi tabelis järgmise elemendi — heeliumi — spektri selgitamisel sattus Bohri teooria katsega vastuollu. See teooria ei olnud arendatud küllalt järjekindlalt. W. Braggi naljatoonilise ütluse järgi tuli selles teorias esmaspäeviti, kolmapäeviti ja reedeti rakendada klassikalisi, ülejäänud nädalapäevil aga kvant-seaduspärasusi. Jätkusid niisuguse teooria otsingud, mis põhjendaks loogiliselt kvantpostulaate ja annaks täpsemaid tulemusi aatomisiseste nähtuste selgitamisel. See õnnestus kümme-kond aastat hiljem — ajavahemikul 1924—1926 loodi kvantmehaanika.

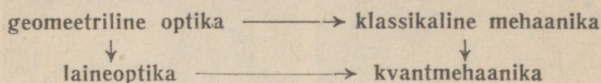
II. KVANTMEHAANIKA

1. Materia laineline loomus

Füüsika edasise arengu käigus leidis Einsteini kujutlus valguse kvantide (footonite) kui reaalsete osakeste olemasolust uut kinnitust nn. Comptoni efekti avastamisega 1923. aastal. Seda oli võimalik seletada ainult kui footoni «kokkupõrget» elektroniga. Eksperimentaalselt leitud faktide mõjul juurdus füüsikute teadvuses ikka enam idee mittepidevalt, katkevalt muutuvatest füüsikalistest suurustest. See kujutlus oli ka Bohri teooria aluseks. Kuid Bohri kvanttingimused statsionaarsete orbiitide valikuks kõikvõimalike teiste orbiitide hulgast jäid ikkagi loogiliselt põhjendamatuks. Esimese suure sammu nende põhjendamisel tegi 1923.—1924. aastal prantsuse füüsik L. V. de Broglie. See oli tänapäeva kvantteooria algus. Kuna kvantmehaanika matemaatiline aparatuur on võrdlemisi keeruline, siis piirdume ainult uute ideede kirjeldamisega.

Kui valgusel, mida varem peeti tüüpiliseks lainetusnähtuseks (interferentsinähtuste tõttu) on samaaegselt ka korpuskulaarne, osakeseline iseloom, kas siis ka liikuvatel osakestel (näiteks elektronidel) pole lainelisi omadusi? See idee näis esialgu väga võõrana (peaks siis ju iga keha, näit. lennuki, auto, inimese liikumisega kaasnema teatav lainel). Nüüd oldi aga vastuväidetega kitsim — viimaste aastakümnete kogemused olid veennud füüsikuid selles, et looduse tunnetamine võib viia vägagi ootamatute tulemustele. Arendades oma ideid, tugines de Broglie juba ammu teadaolevale analoogiale valguse levimise ja kehade liikumise vahel. Valguskiirte levimise seaduspärasusi saab matemaatiliselt formuleerida analoogiliselt kehade mehaanilise liikumise seadustega, kusjuures geomeetrilise optika valguskiire analoogiks on liikuva keha trajektoor. Ettekujutus valguskiirtest on rakendatav siis, kui valguslainete pikkus on väga väike, võrreldes avade, ekraanide jms. mõõtmetega. Neil juhtudel pole valguse lainelist iseloomu vaja arvestada. Kui aga tõkkes valguse levimise teel on sama suurusjärku lainepikkusega, siis tekivad difraktsiooninähtused — valgus «paindub» tõkete taha. Sel juhul tuleb arvestada valguse lainelist iseloomu. De Broglie arendas edasi seda analoogiat — ta lõi mehaanika, mis on samasuguses vahekorras laineoptikaga nagu tavaline mehaanika geomeetrilise optikaga.

Saadud mehaanika oligi mikroobjektide liikumist määrav kvantmehaanika. See on neljandaks liikmeks järgmises vastavuses:



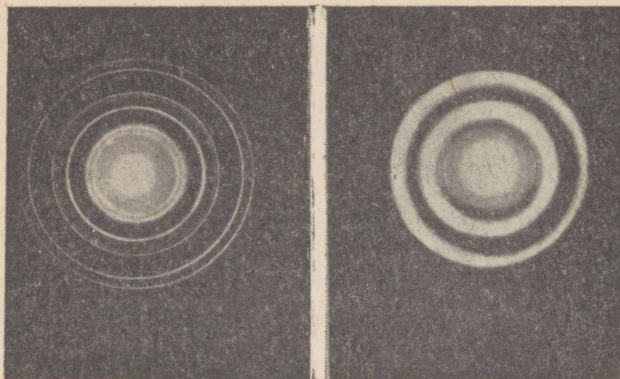
Siin vertikaalsed nooled näitavad vastavust kiirte või trajektooride ja lainelise pildi vahel, horisontaalsed aga vastavust lainete ja osakeste vahel. Vastavalt de Broglie' poolt saadud tulemustele peab liikuva kehaga alati kaasnema laine, mille pikkus λ avaldub järgmiselt:

$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

kus h on Plancki konstant, m keha mass ja v — kiirus. Makroskoopiliste kehade liikumisel vastav lainepikkus on väga väike. Kujutleme näiteks püssikuuli massiga 10 g, mis lendab kiirusega 662 m/sek, siis temaga kaasneva nn. «materია laine» pikkus on

$$\lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-27}}{10 \cdot 662 \cdot 10^4} = 10^{-32} \text{ cm!}$$

See on enam kui miljard miljardit korda väiksem kõige lühemate tuntud elektromagnetiliste lainete pikkusest. Seepärast muidugi lainelised omadused ei tule suurtel, makroskoopilistel kehadel kunagi ilmsiks, nende liikumine toimub mööda trajektoore, mille analoogiaks optikas on valguskiired. Teine lugu on elektroniga — tema väga väikese (ligikaudu 10^{-27} g) massi tõttu on vastav lainepikkus väikese energia korral sama suurusjärku nagu röntgenkiirgusel. Nii näiteks on kerge veenduda, et elektronil energiaga 10 eV on lainepikkus ligikaudu $3 \cdot 10^{-8}$ cm. Sellise lainepikkusega röntgenikiirte difraktsiooni sai tekitada kristallide abil. Nüüd kerkis ülesanne kontrollida de Broglie' hüpoteesi, püüdes saavutada difraktsioonpilti elektronide abil. Vastava katse teostasid 1927. aastal Davisson ja Germer. Nad juhtisid ühesuguse kiirusega liikuvate elektronide kimbu nikli monokristallile. Galvanomeetri abil määrati erinevate nurkade all hajutatud elektronide hulk. Ilmnes, et teatavates suundades tekivad teravad maksimumid (samasugused, nagu



Joon. 4.

vastava lainepikkusega röntgenikiirte hajutamisel). Sellise katse põhjal arvatud lainepikkus osutus just niisuguseks, nagu ennustas de Broglie' valem. Aasta hiljem sai Thomson difraktsioonpildi elektronide läbiminekul õhukesest metall-lehest, mis samuti täielikult kinnitas uut teooriat. Joonisel 4 näeme difraktsioonpilti, mis on saadud elektronide abil (vasakul); samas on difraktsioonpilt, mille annab analoogilistes tingimustes valgus (paremal). Hiljem näidati, et difraktsiooni saab tekitada ka kasutades teisi elementaarosakesi (prootoneid, neutroneid) ja koguni terveid aatomeid või molekule. Seega selgus, et lainelised omadused on kõigil kehadel; vahetult ilmnevad nad aga küllalt väikeste objektide korral. De Broglie' valem on rakendatav nii elektronidele kui ka valguse kvantidele. Seose

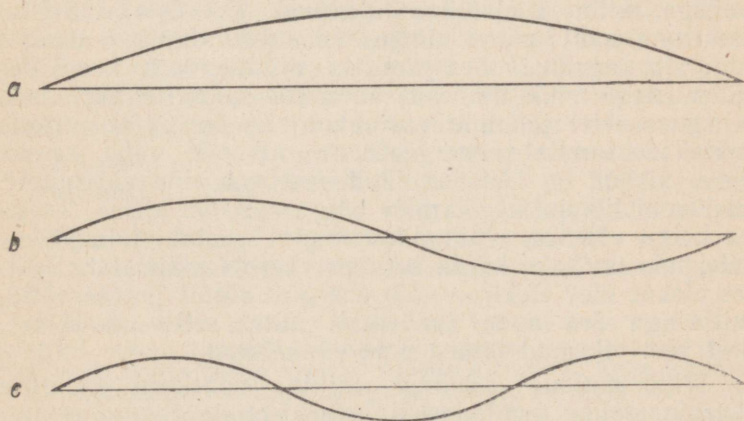
$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

nimetajas seisab liikuva keha liikumishulk (impulss), mis võrdub massi ja kiiruse korrutisega $p = mv$. Nagu näitab teooria ja tõestavad näiteks vene füüsiku P. N. Lebedevi katsed valguse rõhu mõõtmiseks, tuleb footonile omistada impulss $p = \frac{hv}{c}$, kus v on valguse kui elektromagnetilise võnkumise sagedus ja c valguse kiirus. Seega lainepikkus

$$\lambda = \frac{c}{v} = \frac{h}{p}$$

Seni pole me aga leidnud vastust küsimusele, kuidas valgusel võivad ilmnedä kõik tüüpilised lainetusnähtuse omadused, samal ajal ta aga võib käituda ka nii, nagu ta koosneks üksikutest osakestest. Elektronide difraktsiooni nähtusest järeldub, et niisamasugune paradoks ilmneb ka osakeste korral. Samuti pole esialgu näha, kuidas de Broglie' teooria aitaks põhjendada Bohri postulaate. Ent vaadagem, missugused järeldused tulenevad edasi lainelisest pildist.

Mingis piiratud ruumi osas toimuval lainetusprotsessil on huvitav iseärasus. Nimelt pole sel juhul võimalikud kõik mõeldavad lainepikkused, vaid ainult üksikud — sellised, et piirkonda, kus lainetus toimub, mahuks täisarv poollainepikkusi. Näiteks võib olla otstest kinnitatud keele võnkumine (vt. joon. 5). Sellisel keelel tekivad nn. seisvad lained. Kuna keele otsad on kinnitatud, siis otstes võnkumine puudub — seal peab alati olema laine sõlm. Üks võimalikest võnkumistest on selline, et kummaski otsas on sõlm ja keskel pais (*a*). Sellisel võnkumisel on lainepikkus võrdne võnkumise keele kahekordse pikkusega; tekib nn. põhitoon. Peale põhitooni on võimalikud veel ülemtoonid, mille korral keelel tekib peale otstes olevate veel üks või mitu sõlmpunkti (*b*, *c*). Sel juhul mahub keelel $1, \frac{3}{2}$ jne. täislainet, kuid võimalikud lainepikkused on keele pikkusega ette määratud ($\frac{1}{2}, \frac{2}{2}, \frac{3}{2}$ jne.



Joon. 5.

keele pikkust). Sama olukord on mis tahes lainete korral. Näiteks vannis on võimalik tekitada lainet, mille pikkus võrdub vanni kahekordse pikkusega. Kui mingil hetkel ühes vanni otsas veepind kerkib, siis teises ta langeb. Kui sel juhul teha perioodilisi liigutusi sagedusega, mis vastab sellise lainetuse sagedusele, võib laine amplituud sedavõrd kasvada, et vesi paiskub üle vanni otste.

Kui ka elektroni liikumisega on seotud lainetusprotsess, siis peab sel juhul avalduma midagi analoogilist eespool toodud näidetega. Kujutlegem, et elektron liigub kinnises «karbis» kahe seina vahel, «põrkudes» kogu aeg ilma energiakadudeta seintelt tagasi. Sellises «karbis» on võimalikud ainult teatavad kindlad lainepikkused. Vastavalt valemile $\lambda = \frac{h}{mv}$ on võimalikud ainult sellised kiirused, millele vastavad poollainepikkused mahuvad «karpi» täisarv kordi. Võimalikud lained on samasugused nagu joonisel 4. Kuna aga elektroni kiirus määrab tema kineetilise energia (mitte väga suurte kiiruste korral $E = \frac{mv^2}{2}$), siis selgub, et ka elektroni energial on sellises «karbis» ainult teatavad võimalikud väärtused, mis moodustavad nn. energeetilised nivood. Elektroni energia (vastavalt kiirus) saab muutuda ainult selliste annuste kaupa, et «karpi» mahuks üks poollaine rohkem või vähem. Seejuures elektron kiirgab või neelab kvandi, mille energia $h\nu$ on määratud nende energianivoode vahega, mille vahel toimus üleminek: $E_1 - E_2 = h\nu$. Sellise elektroni poolt antav kiirgus sisaldab ainult teatavaid kindlaid sagedusi. See järeldus oli täielikult kooskõlas tulemustega, mis ilmsid aatomite spektrite uurimisel. Kiirgusspektri joontele vastavaid sagedusi võis esitada teatavate kindlate energeetiliste nivood vahe kaudu. Need nivood on iseloomulikud uuritava aine aatomitele. Elektroni liikumisel «karbis» kõige väiksem kiirus (seega ka kõige väiksem võimalik energia) vastab lainepikkusele, mis on kaks korda suurem «karbi» pikkusest. Sellises olekus olev elektron võib energiat ainult juurde võtta, mitte aga ära anda (vähemalt mitte selles «karbis»), sest veel pikemad lained pole võimalikud.

Tekib muidugi küsimus, milline vahekord on meie «karbimudelil» tegelikkusega. Elektronide liikumine toimub ikkagi aatomis, mis ei ole kinnine «karp». Kuid

siin on siiski palju ühist. Elektronide liikumine aatomis toimub tiirlemisena ümber tuuma. Bohri postulaadid «tegid» sellise aatomimudeli stabiilseks ja võimaldasid selgitada vesiniku aatomi kiirgusspektri struktuuri, kuid need postulaadid vajasid ise põhjendamist. Selle põhjenduse saame elektroni lainelisi omadusi arvestades. Võimalikeks osutuvad ainult sellised elektronide orbiidid ümber tuuma, millele mahub täisarv poollainepikkusil Teiste sõnadega, Bohri statsionaarsed orbiidid on need, millel on võimalik suletud seisva elektronilaine tekkimine (analoogiliselt elektroni liikumisele «karbis»). Energia kiirgamine ja neeldumine toimub elektroni «üleüppamisel» ühelt orbiidilt teisele. Nii nagu «karbis», on ka aatomis olemas kõige madalam energeetiline nivoo, millel viibiva elektroni energia on kõige väiksem.¹ Sellist nivood nimetatakse põhiniivooks. Veel madalamale nivoole, s. t. tuumale lähemale langemine pole võimalik elektroni laineliste omaduste tõttu. Siit selgub, miks elektroni energia aatomis ei saa väheneda sedavõrd, et elektron langeks tuumale. Seega seletab laineline pilt niihästi aatomi stabiilsuse kui ka statsionaarsete orbiitide olemuse. Varustatuna uute kujutlustega võisid füüsikud asuda selgitama erinevate aatomite ehituse seaduspärasusi. Nüüd oli võimalik väljuda Bohri kvantteooria kitsastest raamidest. Selleks oli aga vaja matemaatilisi meetodeid, sellist matemaatilist «aparatuuri», mis valemite ja arvutuseeskirjade vormis kajastaks kujutlust elektroni lainelisest loomusest. Käesoleva brošüüri ülesandeks on tutvustada kvantmehaanikat lugejale, kel pole suurt matemaatilist ettevalmistust. Seepärast piirdume selle «aparatuuri» üldise kirjeldamisega ning analüüsime peamiselt järeldusi, mis sellest tulenevad.

2. Laine- mehaanika

De Broglie' ideid edasi arendades leidis saksa füüsik E. Schrödinger 1926. aastal võrrandi, mis võimaldas kirjeldada mikro-süsteeme (aatomeid, molekule), arvestades seejuures elektronide lainelisi omadusi. Schrödingeri võrrandi koos-

¹ Aatomis oleva elektroni koguenergia koosneb tema kineetilisest energiast, mis on määratud liikumise kiirusega, ja potentsiaalsest energiast, mille suurus oleneb elektroni kaugusest tuumast. Kuna tegemist on tõmbejõudude potentsiaalse energiaga, siis see on negatiivne. Elektron võib aatomi koosseisus püsida ainult seni, kuni tema koguenergia on negatiivne, s. t. potentsiaalne energia ületab kineetilise.

tamisel konkreetse probleemi lahendamiseks (näiteks vesiniku aatomi energiatasemetel leidmiseks) lähtutakse vastava süsteemi üldisest struktuurist. Schrödingeri võrrand on diferentsiaalvõrrand. Tal on lahendid olemas ainult teatavatel kindlatel energiaväärtustel, mis vesiniku-aatomi probleemi korral määravad «lubatud orbiidid». Seega ei osutu Bohri postulaadid Schrödingeri võrrandi kasutamise korral vajalikuks, nad sisalduvad selles n.ö. automaatselt. Schrödingeri võrrandit on võimalik koostada ja ligikaudu lahendada ka keerulisemate aatomite ning isegi molekulide korral, kus Bohri teooriaga ei olnud midagi peale hakata. Schrödingeri võrrandi lahendiks on teatav funktsioon, mis kannab lainefunktsiooni nime. See kajastab mikroosakese vastuolulist, lainelis-korpuskulaarset iseloomu. Lainefunktsiooni arvuline väärtus on erinevates ruumpunktides isesugune. Seejuures füüsikaliselt määrab lainefunktsiooni ruut elektroni viibimise tõenäosuse vastavas ruumiosas.

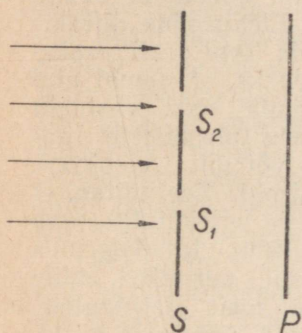
De Broglie' — Schrödingeri loodud suunda kvantteoorias hakati nimetama lainemehaanikaks. Schrödinger püüdis lahendada laine — osakese vastuolu laine kasuks. Ta püüdis osakest käsitleda kui lainetust, mis on koondunud väikesse ruumi ossa ja liigub kui üks teryik. See käsitlus osutus siiski ebarahuldavaks, sest selline «lainepakk» peaks vastavalt teooriale kiiresti lagunema, elektron aga, nagu katse näitab, on püsiv osake. Kuid ta pole siiski osakene vanas, klassikalises mõttes.

Veidi enne Schrödingeri töid andis mikroosakeste liikumise probleemi lahenduse teine saksa füüsik W. Heisenberg. Ta lähtus vahetult Bohri postulaatidest, püüdes anda neile uute mehaanika seaduste kuju. Mikroosakeste kvantiseloomu arvestamiseks tuli Heisenbergil mehaanilistele suurustele (koordinaat, impulss, energia jt.) seada vastavusse erilised matemaatilised suurused — operaatorid. See viis uutele tulemustele, kuna operaatorite omadused on erinevad arvude omadustest, mille abil seni füüsikalisi suurusi väljendati. Varsti selgus, et Heisenbergi mehaanika on sisuliselt samaväärne Schrödingeri lainemehaanikaga. Paari aasta jooksul (kuni 1928. aastani) toimus kvantmehaanika ühinenud suundade tormiline areng ning lahendati palju üksikprobleeme. Nii näiteks oli spektroskoopilistest uurimistest teada, et aatomites ja molekulides pole võimalikud üleminekud mis

tahes statsionaarsete energianivoode vahel — spektrijooni on palju vähem kui võimalikke energianivoode kombinatsioone. Nende vaatluste alusel olid formuleeritud nn. valikureeglid, mis võimaldasid näidata, missugused on «lubatud» üleminekud ja missugused «keelatud». Nüüd selgus, et need reeglid järelduvad lainefunktsiooni omadustest.

3. Osakesed ja Eespool nägime, et eksperimendid tõestasid valguse kahesuguste — laineliste ja korpuskulaarsete — omaduste samaaegset eksisteerimist. Elektronide difraktsioon tõestab aga, et elektronil, mida seni peeti osakeseks, väga väikeseks füüsikaliseks kehaks, on samal ajal lainelised omadused. Katsed lahendada seda vastuolu lainelise pildi kasuks ei viinud õigetele tulemustele. Igasuguses katses ilmneb alati kas üks või mitu elektroni, mitte kunagi aga näiteks poolt elektroni. See näitab, et elektron on ikkagi teatud tervik. Meie ettekujutus seab talle sel alusel vastavusse osakese, keha. Inimkogemus baseerub aga täielikult selliste kehade uurimisel, mille omadused on vahetult kättesaadavad meie aistingutele. Selliste kehade mõõtmed aga ületavad vähemalt miljooneid kordi aatomite mõõtmeid. Lähtudes dialektilise materialismi õpetusest kvantitatiivsete muutuste üleminekust kvalitatiivseteks võib aatomite ja elementaarosakeste maailmas oodata uusi seaduspärasusi. Meie igapäevase elu kogemustest tulenevad mõisted ja kujutlused ei pruugi seal enam rakendatavad olla. Tõepoolest, eksperimendi ja teooria areng näitavadki, et elementaarosakatel, näiteks elektronil, on selliseid omadusi, mille kirjeldamiseks ei ole olemas piltlikke, igapäevasest elust pärinevaid mõisteid ja võrdkujusid. Esimene ebatavaline tulemus, millega meil kvantmehaanikas tuleb kokku puutuda, on see, et tema ennustused on tõenäosuslikud, statistilised. Nii näiteks difraktsioonikatse korral ei ole võimalik ennustada, missugusesse ekraani punkti langeb teatud konkreetne elektron, küll saab aga näidata, kuidas jaotub ekraanil suur hulk elektrone. Muidugi, ka igapäevases elus tuleb mõnikord teha tõenäosuslikke ennustusi. Näiteks hea laskur ei või täpselt ette näidata kohta märklehel, mida tabab järgmine kuul, kuid suure hulga laskude korral võib kindlalt ennustada, et tabamisi märklaua keskosas on tunduvalt enam kui selle äärtel. Sel

juhul tõenäosuslik ennustus tuleneb sellest, et täpsed kuuli kõrvalekaldumise põhjused pole teada. Hoopis teine on aga olukord elektronide korral. Siin ennustuse tõenäosuslik iseloom ei tulene mitte ebapiisavast protsessi detailide teadmisest, vaid mikroosakeste endi loomusest. Et seda selgitada, vaatleme lähemalt üht difraktsioonikatset, mille tulemus on esimesel pilgul lausa üllatav. Olgu meil ekraan S kahe piluga S_1 ja S_2 (vt.



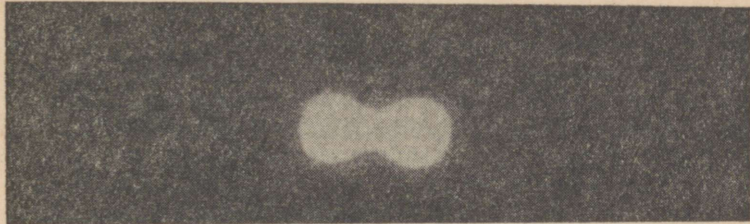
Joon. 6.

joon. 6) ja selle taga fotoplaat P , mis fikseerib tekkiva difraktsioonipildi. Langegu ekraanile S kimp ühesuguse kiirusega elektrone. Elektron, läbides pilu, langeb plaadile, tekitades seal musta täpikese. Küllalt suur hulk elektrone annab difraktsioonipildi, mille järgi on näha, kuhu langes elektrone rohkem ja kuhu vähem. Difraktsioonipildi tekkimist saaks kvalitatiivselt seletada ka sel juhul, kui elektroni vaadelda tavalise klassikalise osakesena. Kuid sellel käsitlusel lööb otsekohe jalad alt katse

väike muutmine. Nimelt võiks algul sulgeda ava S_1 ja lasta elektrone ainult läbi ava S_2 . Paistab, et nende elektronide seisukohalt, mis läbivad S_2 , on päris ükskõik, kas S_1 on lahti või mitte. Lastes osa elektrone ühes katse läbi ühe, teise osa läbi teise pilu, peaksime saama samasuguse pildi, nagu lastes neid läbi mõlema pilu korraga, sest elektron kui osake peaks ikkagi minema läbi ühest pilust; sel juhul teise lahti- või kinniõlemine ei tohiks tema liikumisele kuidagi mõjuda. Missugused on aga sellise katse tulemused tegelikult, seda näeme joonisel 7. Ülemine foto on saadud, lastes osa elektrone läbi ühe, osa läbi teise pilu. Alumine foto on saadud mõlemate pilude üheaegsel lahtiõlekul.¹

Tulemus on tõepoolest hämmastav! Plaadil on kohti, kuhu elektrone satub nii S_1 kui ka S_2 kaudu, kui kord on avatud üks, kord teine. Kuid samasse kohta ei satu

¹ Samasugused tulemused annab valgus. Elektronlainetele vastavad siin valguslained, elektronidele — footonid.



Joon. 7.

elektrone siis, kui on avatud mõlemad! Toome analoogia: kuul võib sattuda märklauda kahel viisil, nii otsetabamuse kui rikošeti teel. Mõlema võimaluse samaaegsel esinemisel on tabamusi üldiselt rohkem. Siin aga on tulemus, vähemalt ekraani teatava osa kohta, otse vastupidine.

Aga võib-olla mõjustavad erinevaid avasid läbivad elektronid üksteist nii (mõjuvad ju nende vahel tõuke-tingid!), et tekib uus, erinev difraktsioonpilt? Et seda asjaolu selgitada, korraldasid nõukogude õpetlased Biberman, Suškin ja Fabrikant kirjeldatud katse, kasutades väga nõrku elektronkimpe. Nad lasksid elektrone ekraanile S n.-ö. ühekaupa. Elektroni lennuaeg läbi katseriista oli neil 30 000 korda lühem kui keskmine vaheaeg kahe elektroni «stardimomendi» vahel. Esialgse katse korral võib analoogiaks olla suusatajate ühisstart lühikestele distantssile; sel juhul muidugi üks suusataja segab teist. Bibermani jt. katses jõuab «suusataja», s. t. elektron enne «finišisse» kui järgmisele antakse «lähe». Seega igasugune vastastikune mõjustus üksteise segamise näol langeb ära. Katse tulemus aga on samasugune nagu algulgi. Katse kestus on muidugi suurem.

Kui elektron oleks osake klassikalises mõttes, siis

muidugi selle pilu lahti- või kinni olek, millest ta läbi ei lähe, ei saa tema edasist liikumist kuidagi mõjutada. Kvantmehaanika seaduste tõenäosuslikku iseloomu ei saa seletada kui tõenäosuslike seaduste rakendamise tulemust klassikalise osakese liikumise kohta. Tõsi küll, on püütud seda teha, lähtudes ettekujutusest, et elektron liigub mingit väga korrapäratut teed mööda, läbides korduvalt enne fotoplaadile jõudmist mõlemad avad. Kuid selline seletus on ebaloomulik ja, nagu selgub, mitmeti vastuvõetamatu. Võib küll kujutleda, et elektroniga seotud lainest osa läbib ühe, osa teise pilu. Kuid ekraanil (või mis tahes teises katses elektroni registreerivas seadmes) ilmneb elektron kui üks tervik, ja seda kahtlemata alati. Sel juhul nõuab meie mõistus ikkagi vastust küsimusele, kummast pilust elektron läbi läks. Varsti aga näeme, et sellele küsimusele ei saa vastata, kuid mitte sellepärast, et ebatäiuslikud katseseadmed ei võimalda anda õiget vastust, vaid seetõttu, et see näiliselt loomulik küsimus on püstitatud ebakorrektselt. Difraktsioonkatse ootamatu tulemus saab selgituse nn. määramatuse printsiibis, mis järeldub kvantmehaanika matemaatilisest aparaadist ning peegeldab neid iseärasusi, mis on omased mikroobjektidele. Selgub, et mikroosakese korral pole võimalik üheaegselt mis tahes täpsusega määrata teatavate füüsikaliste suuruste paare. Kui makroskoopilise keha kiiruse (ja seega ka impulsi) ning asukoha saab mingil ajahetkel põhimõtteliselt kui tahes suure täpsusega kindlaks teha, siis mikroosakeste korral on siin olemas piir. See piir on niisuguse iseloomuga, et kui me määrame ühe suuruse (näiteks asukoha) kindlaks suure täpsusega, siis kiiruse (ja impulsi) saame ainult üsna väikese täpsusega. Kui aga määraksime ühe nendest suurustest täiesti täpselt, siis teise kohta pole võimalik üldse midagi ütelda, see on siis täiesti määramatu. Matemaatiliselt on seosel järgmine kuju:

$$\Delta x \cdot \Delta v_x \approx \frac{h}{m},$$

kus Δx on elektroni asukoha määramise ebatäpsus, Δv_x aga tema kiiruse määramise ebatäpsus. Suurus h on Plancki konstant, m — elektroni mass. Määrates koordinaadi x täpselt, saame $\Delta x = 0$, siis aga $\Delta v_x \rightarrow \infty$,

s. t. kiirus on täiesti määratu. Selgitame seda olukorda mõttelise katse abil. Kui me eespool kirjeldatud (vt. joon. 6) interferentsikatses tahaksime kindlaks teha, misugust pilu läbis teatav konkreetne elektron, siis tuleks teostada «vaatlus» mikroskoobi abil. Praktiliselt on see küll võimatu, aga ikkagi saab näidata põhimõtteliselt, kuidas seda peaks tegema. Selleks tuleks meil elektroni «valgustada» väga lühikese lainepikkusega elektromagnetilise kiirgusega. Lainepikkus peab olema samas suurusjärgus vaadeldava objektiga (või väiksem), kuna vastasel korral pole võimalik midagi «näha» difraktsiooni tõttu. Objektid, mille mõõtmed on väiksemad kasutatava valguse lainepikkusest, ei ole laine teel tõkkeks ega saa seepärast anda ka mingit kujutist (analoogiliselt ei ole näiteks suhteliselt suure pikkusega helilainetele tõkkeks puud või põõsad). Väga väikesele lainepikkusele vastavad aga suure energiaga valguskvandid (footonid). Elektronilt «peegeldunud» footoni lennusuund võimaldab küll määrata elektroni asukohta, kuid põrkel footoniga muutub elektroni kiirus ja seda enam, mida suurema energiaga ta on, (s. t. mida lühemale lainepikkusele ta vastab). Kiirus jääb seega määratuks. Kui me niisugusel viisil määraksime kindlaks, millise pilu läbib elektron, siis me samal ajal muudaksime niivõrd tema liikumise kiiruse suurust ja suunda, et difraktsioonpilt häviks. Difraktsioonpildi saamiseks on oluline, et me ei püüaks määrata elektroni asukohta, ei allutaks teda välistele mõjustustele. Kuid ilma selleta pole võimalik määrata, kumma pilu läbis elektron.

Olukorra lähem analüüs näitab, et tegemist pole mitte ajutise praktilise raskusega, vaid objektiivse looduseadusega, mis ei võimalda määrata üheaegselt elektroni asukohta ja kiirust. See on niisama võimatu kui ehitada *perpetuum mobile*'t. Eespool toodust võib jääda niisugune mulje, et kindel asukoht ja kiirus on elektronil igal ajamomendil ikkagi olemas, neid ei saa ainult kuidagi kindlaks teha segavate kvantefektide tõttu. Sellise järelduse tegid tõepoolest paljud füüsikud ja filosoofid, jõudes sel teel agnostitsismi. Paistis, et kvantmehaanika on astunud pimedusejüngrite teenistusse, kes väidavad, et inimene on võimetu tunnetama looduse seaduspärasusi, mille «autori» on jumal. Selline järeldus tuleneb nende autorite vääratest filosoofilistest seisukohtadest ning tugineb kvant-

mehaanika meelevaldsele tõlgendamisele. Asi on selles, et hetkeline kiirus ja asukoht on suurused, mis kirjeldavad makroskoopiliste kehade liikumist, mikroosakeste korral nad pole aga rakendatavad. Mikroosakeste füüsikalise oleku määrab lainefunktsioon. Hetkelist kiirust ja asukohta ei saa mikroosakese puhul määrata seepärast, et neid pole mõlemaid üheaegselt olemas. Kõik katsed, mis on mõeldud nende suuruste üheaegseks määramiseks, on juba ette nurjumisele määratud, sest nad esitavad loodusele absurdse küsimuse. Elektron ei ole osakene klassikalises mõttes, seepärast ei saa teda ka täpselt kirjeldada klassikalise mehaanika mõistete abil. Selline mõttekäik on mõnevõrra võõrastav ja räägib vastu inimese vahetule kogemusele. Kuid ärgem unustagem, et meie kogemus pärineb kvalitatiivselt teisest valdkonnast, makroskoopiliste kehade valdkonnast. Ei tule arvata, et mikroosakeste valdkonnas on ainus erinevus väiksemates mõõtetes, seadused aga on samad. «Kui loodus,» kirjutas nimekas prantsuse füüsik P. Langevin, «ei anna meile täpset vastust elektroni kohta, mida samastatakse klassikalise mehaanika osakesega, kas pole siis liiga suur enesekindlus otsekohe väita, et looduses pole determinismi?» See Langevini küsimus on suunatud nende vastu, kes püüdsid kvantmehaanika tõenäosuslikku iseloomu tõlgendada kui seaduspärasuse puudumist üldse.

4. Klassikaline ja Kuna mikroosakestel ei ole üheaegselt kvantmehaanika. olemas täpselt fikseeritud asukohta ega kiirust, siis ei saa nende liikumise korral Trajektoor rääkida ka kindlast liikumisteest, trajektoorigi. See nähtus ka eespool kirjeldatud difraktsioonikatsetest. Ühe elektroni abil pole võimalik saada mingit difraktsioonipilti. Iga fotoplaadile langev elektron tekitab seal ühe musta täpi ja on vaja väga palju täppe selleks, et saada korrapärase heledate ja tumedate ribade vaheldumist — difraktsioonipilti. Samal ajal oleks difraktsioonipildi tekkimine võimatu, kui ühe ja sama elektroni läbimineku ei mõjutaks mõlemad avad (seda tõestab otseselt Bibermani jt. katse). Elektroni trajektoori pole difraktsioonikatses lihtsalt olemas, samuti nagu pole olemas valguskiiri valguse difraktsiooni korral. Ei tule arvata, nagu oleks trajektoor siiski olemas, kuid me pole lihtsalt suutelised seda jälgima meie käsutuses olevate tehniliste vahendite ebatäiuslikkuse või teadmiste kün-

dimatuse tõttu. Trajektoori puudumine ei tähenda aga hoopiski seda, et elektronide liikumises ei ole mingit seaduspärasust. Vastupidi, kui difraktsioonikatse teostada teataval kindlal viisil, saame alati ühesuguse difraktsioonipildi. Seega seaduspärasus on kahtlemata olemas, kuid see on statistiline seaduspärasus, mis tuleb ilmsiks suures katsete seerias (iga elektroni läbimineku võib difraktsioonikatse korral vaadelda sõltumatu, omaette eksperimendina). Difraktsioonikatsel ilmnev seaduspärane punktide jaotus ekraanil on analoogiline tabamuste jaotumisele märklehel vastavalt hajumise seadusele. Erinevus on aga selles, et kuulid lendavad mööda kindlat trajektoori ja annavad sellise tabamuste jaotuse, mille maksimum on keskel, kuna äärte poole tabamuste arv järjest väheneb. Elektronid seevastu annavad keerukama, mitme maksimumiga «tabamuste» pildi, mis vastab nende lainelisele loomusele. Kuulide hajumine tekib nende lennu algtingimuste väikesest erinevusest ning seda saab vähendada hoolikama sihtimise teel. Elektronide (ja valguse) hajumist difraktsiooniseadmes kindla elektronide kiiruse (valgusel vastavalt lainepikkuse) korral ei ole kuidagi võimalik vähendada.

Mõningatel juhtudel on trajektoori mõiste elektroni liikumisel siiski rakendatav, kuid me näitame kohe, et see pole sugugi vastuolus eespool öelduga. Nn. Wilsoni kambris jääb elektroni läbimineku järele udujälj, mis tähistab tema liikumise teed. Olgu selle udujälje läbimõõt 0,01 cm. Sellise täpsusega on siis määratud elektroni asukoht, s. t. $\Delta x = 0,01$ cm. Trajektoorist on mõtet rääkida sel juhul, kui kiiruse määramatus on palju väiksem kui kiirus ise, s. t. $\Delta v_x \ll v$. Olgu elektroni energia 100 elektronvolti (eV).

$$1 \text{ eV} = \frac{4,8 \cdot 10^{-10}}{300} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ ergi.}$$

Kiiruse x -komponendi määramatus on vastavalt seosele $\Delta x \cdot \Delta v_x \approx \frac{h}{m}$ selline:

$$\Delta v_x = \frac{h}{m \Delta x} = \frac{6,6 \cdot 10^{-27}}{9,1 \cdot 10^{-28} \cdot 10^{-2}} = 7,2 \cdot 10^2 \frac{\text{cm}}{\text{sek.}}$$

Elektroni kiirus ise aga on vastavalt seosele $E = \frac{mv^2}{2}$

selline:

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{12} \cdot 100}{9,1 \cdot 10^{-28}}} = 6 \cdot 10^8 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}.$$

Kuna kiirus on oma määramatusest 10^6 korda suurem, siis muidugi on trajektoori mõiste täiesti rakendatav. Asi on selles, et me antud juhul piirdusime elektroni asukohta määramisel väikese täpsusega (see katse rohkem ei võimalda). Elektroni täpne asukoht kambris tekkiva udujoone sees jääb ikkagi määramata. Olukorda võiks näiteks võrrelda metrootunnelis ühest jaamast teise lendava kärbsuga. Kui kärbes jõuab teise jaama, siis teame, et ta on küll läbinud tunneli, aga millist teed mööda täpselt, see jääb selgusetu. Kuna koordinaadi väärtus (elektroni asukoht) jääb täpselt fikseerimata, siis ka kiiruse määramatus on suhteliselt väike, s. t. sellises lähenduses võib elektroni vaadelda kui klassikalist osakest. Kuid igakord see pole nii. Vastavalt klassikalistele (Bohri teooria) ettekujutustele on elektroni kiirus aatomis suurusjärgus $10^8 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$, aatomi mõõtmed aga 10^{-8} cm.

Oletame, et tahame määrata elektroni asukohta aatomis üsna tagasihoidliku täpsusega, nimelt 10% aatomi läbimõõdust. Siis $\Delta x = 10^{-9}$ cm. Kiiruse määramatus tuleb sel juhul

$$\Delta v_x = \frac{h}{m \Delta x} = \frac{6,6 \cdot 10^{-27}}{9 \cdot 10^{-28} \cdot 10^{-9}} = 6 \cdot 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{sek}}.$$

Kiiruse määramatus tuleb kiirusest endast 60 korda suurem! See tähendab, et tuleb loobuda kujutlusest elektroni «orbiidist», s. t. joonest, mida mööda ta liigub ümber aatomi tuuma. Ei ole mõtet ütelda, et mingil hetkel elektron on tuumast «vasemal» või «paremal» — tema asukoht pole määratud sellise täpsusega. Elektron on aatomis «laili määratud» ümber tuuma ning on võimalik vaid määrata, missugune on tema tõenäosus, et ta asetseb ühes või teises punktis (nagu eespool rääkisime, on see tõenäosus määratud lainefunktsiooni ruuduga). Kui aga püüaksime elektroni asukohta määrata vaatluste teel kujuteldava «mikroskoobiga», millest oli juttu eespool, siis tuleks kasutada väikese lainepikkusega «valgust», s. t. suure energiaga kvante. Kvant, mis põrkub tagasi elektronilt ja võimaldab määrata tema asu-

kohta, annab ühtlasi elektronile sellise «hoobi», et see lendab aatomist välja.

Kuna sellised klassikalise mehaanika mõisted, nagu trajektoor, koordinaat, kiirus (või impulss) jne., on teatavatel juhtudel rakendatavad ka mikroosakeste liikumise kirjeldamiseks, siis on selge, et kvantmehaanika ei lükka ümber klassikalise mehaanika seadusi, vaid sisaldab need teatava piirjuhuna. Määramatuse printsiibid matemaatilisest üleskirjutusest on näha, et kui mingi protsessi käsitlemisel võib Plancki konstandi h lugeda võrdseks nulliga (ta ongi ju väga väike: $6,6 \cdot 10^{-27}$ erg. sek.), siis koordinaat ja impulss on määratavad kui tahes täpselt. Kvantmehaanika tulemused ühtivad siis nendega, mida annab klassikaline mehaanika. Isegi vähimate tolmutükubemete liikumise käsitlemisel võib rahulikult kasutada klassikalist mehaanikat; kvantefektid tulevad ilmsiks alles aatomite maailmas. Arvestagem, et isegi vähimas tolmutükubemes kaaluga 10^{-6} G on ikkagi veel üle miljon miljardi aatomi! Pole siis imestada, et nähtuste vallas, mis on kvantitatiivselt kaugel vahetult meie meeltele kättesaadavatest, kehtivad teistsugused seaduspärasused ja vahekorrad. Need tunduvad meile harjumatuena, «tervele mõistusele» vastukäivatena, kuna meie vahetus praktilises kogemuses ei ole midagi sellist, mida saaks neile otseselt vastavusse seada. Mis puutub aga nn. «tervesse mõistusse», siis see pole sisuliselt midagi muud kui inimese piiratud kogemus, millele ta tahtmatult püüab omistada universaalse tähenduse.

Rõhutame veel, et difraktsioonikatses mingit elektroni «tõelist, kuid meile mitte teadaolevat» trajektoori ei ole olemas. Määramatuse printsiip ei näita mitte seda, millise v e a g a võib mõõta samaaegselt elektroni (või mõne muu mikroosakese) koordinaati ja impulssi. Ta näitab seda, kuivõrd vastavad suurused üldse omavad vaadeldaval juhul täpset mõtet. Termin «määramatus» rõhutab seda, et jutt pole mitte juhuslikest mõõtmisvigadest ega mõõteriistade ebatäiuslikkusest, vaid sellest, et osakese koordinaati ja kiirust (või vastavalt impulssi) pole mõlemaid korraga olemas.

5. Aatomi kvant-
mehaaniline pilt.
Elektroni spin

Bohri teoorias iseloomustati aatomi koostisse kuuluva elektroni energiaseisundit kvantarvude abil. Nn. peakvantarv n vastas elektroni «lubatud» orbiidi järjekorra-

numbrile. Selgus aga, et peale ringikujuliste orbiitide on võimalikud veel mitmesugused elliptilised orbiidid, mis vastavad samale peakvantarvule. Vesiniku aatomi korral on elektroni energia nimetatud elliptilistel orbiitidel samasugune nagu ringorbiidilgi, mis vastab samale n väärtusele. Võimalikud elliptilised orbiidid on määratud kõrvalkvantarvuga l . Keerulisemate aatomite korral (näiteks naatriumi aatom) oleneb elektroni energia ka l väärtusest, mistõttu naatriumi spektris ilmneb vesiniku spektri ühe joone asemel terve joonte süsteem. See vastab üleminekutele antud põhiorbiidilt (mis on määratud peakvantarvuga n) erinevate l väärtuste korral. Välises magnetiväljas võivad orbiitide tasandid paikneda ainult teatavate «lubatud» nurkade all magnetivälja suuna suhtes (ruumiline kvantimine). See tingis veel kolmanda, magnetilise kvantarvu m sissetoomise, mis nummerdab võimalikke elektroni orbiidi asendeid välise välja suhtes. Magnetivälja puududes elektroni energia ei olene m väärtusest — sel juhul öeldakse, et elektroni seisund on kõdunud kvantarvu m suhtes. Kaasaja kvantmehaanikas, nagu eespool nägime, tuleb loobuda kujutlusest kindlastest orbiitidest, kuid kvantarvude mõiste säilib. Kvantarvud iseloomustavad elektroni energeetilisi seisundeid.

Kvantarvude mõiste tuli füüsikasse seoses spektrijoonte klassifitseerimisega. Spektrite uurimise tulemusena selgitati välja, missuguste elektroni seisundite vahel üleminekud on «lubatud» ja missuguste vahel «keelatud». Leitud «valikureglid» (s. t. reeglid, mis võimaldasid välja valida iga antud elektroni seisundi jaoks teised seisundid, millesse üleminek on võimalik) jäid aga Bohri kvantteoorias seletamatuteks. Tänapäeva kvantmehaanikas selgub, et paljude seisundite vahel ülemineku tõenäosus on 0, s. t. vastavaid üleminekuid üldse ei ole. Need ongi «keelatud» üleminekud; neile vastavad jooned spektris puuduvad. (Märgime, et välise mõjustuste, näiteks tugeva elektrivälja toimel võivad mõned tavaliselt keelatud üleminekud siiski toimuda.) Mida suuremaks osutub mingi ülemineku tõenäosus, seda intensiivsem on vastav joon kiirgusspektris.

Schrödingeri võrrandi lahendamisel leitakse laine-funktsiooni väärtus mis tahes kohas aatomis. Aatomi statsionaarse seisundi puhul selle funktsiooni arvuliste väärtuste jaotus ruumis on ajaliselt püsiv. Selle funktsi-

ooni (täpsemalt, tema absoluutväärtuse ruudu) poolt on määratud «elektronpilve» tihedus vastavas punktis. Elektronile täpsest asukohast aatomis ei ole mõtet rääkida. Elektronile võib kujutleda tuuma ümber «laiali määratuna», kusjuures teatavates piirkondades (mis vastavad Bohri teooria orbiitidele) on tema viibimise tõenäosus suurem. Igale erinevale elektronseisundile (kvantarvude n, l, m kolmikule) vastab erinev elektronpilve tiheduse jaotus. Küllalt kaugel tuumast, kuhu aatomi koostisse kuuluv elektron enam ei satu, on lainefunktsiooni väärtus võrdne nulliga.

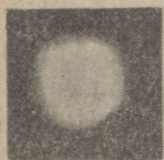
Selline lainefunktsiooni tõlgendus võimaldab luua teatava ettekujutuse kvantmehaanika aatomimudelil. Selgub, et elektronpilv aatomi statsionaarse seisundi korral omab sümmeetriatelje, nendes seisundites aga, kus $l=0$, on ta keraümmeetriline, s. t. pilve tihedus sõltub ainult kaugusest tuumast, olles sama kõigis suundades. Aatomi olekute tähistamiseks on kasutusel järgmine sümbolika. Kõigepealt kirjutatakse arv, mis näitab peakvantarvu väärtust. Kvantarvu l väärtustele $0, 1, 2, 3$ seatakse vastavusse tähed s, p, d, f . Seega näiteks $3d$ tähendaks seisundit, milles $n=3, l=2$. Elektronpilve kuju on veel magnetilisest kvantarvust m . Joonisel 8 näeme, millisena paistaks elektronpilv vesiniku aatomi tuuma ümber erinevates seisundites, kui seda oleks võimalik näha. (Kujutised on saadud eriliste pöörlevate mehaaniliste mudelite pildistamise teel, mille liikumine imiteerib lainefunktsiooni ruumilist jaotumist.)

Edaspidistel katsetel selgus, et elektroni oleku kirjeldamiseks ei piisa kolmest kvantarvust. Selgus, et elektronil on teatav mehaaniline ja magnetiline moment, mis ei ole seotud tema liikumisega ümber tuuma. Seda hakati nimetama spiniks ingliskeelse sõna «to spin» järgi, mis tähendab «pöörlema». Algul kujutleti nimelt, et elektron on laetud kera, mis pöörleb oma telje ümber ja samal ajal tiirleb ümber tuuma analoogiliselt planeedi liikumisele ümber päikese. See analoogia pole aga kaugeleulatuv. Nimelt võis spin omada ainult kaks erinevat väärtust: $+\frac{1}{2}$ või $-\frac{1}{2}$ (ühikutes $\frac{h}{2\pi}$), olles seega rangelt

kvantiseloomuga. Nagu selgus, mängib elektroni spin suurt osa aatomi elektronkatete struktuuri ja molekuli tekkimise selgitamisel. Aatomi ehituse selgitamise alu-

seks sai nn. Pauli printsiip (Šveitsi füüsiku W. Pauli nime järgi), mille kohaselt aatomi koostisse ei saa kuuluda kaks ühesuguses seisundis olevat elektroni. See tähendab, et kui kahel elektronil aatomis on samad kvantarvud n , l ja m , siis spinid peavad olema neil vastasmärgilised. Kolmandat elektroni sama kvantarvude kolmiku väärtusega ei saa aatomeis aga üldse olla. Lähtudes sellest printsiibist, saadi teoreetiliselt põhjendada elementide paiknemist Mendelejevi tabelis. Selgusid ka sügavamad põhjused, mis määravad elementide keemilisi omadusi. «Sallimatus omasuguste naabrite suhtes», mis avaldub Pauli printsiibis, ei tähenda aga seda, nagu oleks igale elektronile omane mingi individuaalsus. Tegelikult on hoopis vastupidi — mis tahes kaks vaba elektroni on täiesti eristamatud, ühesugused. Einstein märkis selle kohta naljatades, et pole võimalik värvida üht elektroni rohelisteks ja teist punaseks. Näiteks võib kaks elektroni küll mõtteliselt ära nummerdada, aga niipea kui need elektronid satuvad vastastikku mõjustusse (näiteks mööduvad teineteisest lähedalt), ei ole meil hiljem enam mingit võimalust näidata, kumb neist on nr. 1 ja kumb nr. 2. Lugeja teeb võib-olla ettepaneku määrata kummagi elektroni spini märk enne «kokkupõrget», et pärast selle järgi elektrone eristada. Kuid see ei vii sihile, sest vastastikuses mõjustuses võivad elektronid palju kordi vahetada oma spini. Selline vahetus mängib üsna tähtsat osa keemiliste ühendite tekkimises, tekitades nn. vahetusjõude, mis seovad elektrone ja seega ka aatomeid omavahel. Näitlikku pilti vahetusjõududest on raske luua, sest «igapäevane» (klassikaline) mehaanika midagi selletolist ei tunne.

Kui mitmeelektroniliste aatomite kohta on vaja teha mingeid konkreetseid arvutusi, siis kerkivad suured matemaatilised raskused. Vesiniku aatomi korral on asi lihtne, kuna siis on tegemist ainult kahe vastastikuses mõjustuses oleva kehaga. Sel juhul saab anda täpse vastuse nende kehade liikumise iseloomu kohta ja vastav kvantmehaanika võrrand — Schrödingeri võrrand — on täpselt lahenduv. Kolme vastastikuses mõjustuses oleva keha liikumise probleem on juba väga keeruline ja lahendub täpselt vaid erijuhtudel. Kvantmehaanikas vastab sellele elektroni energeetilise seisundi määramine heeliumi aatomis (mis koosneb tuumast ja kahest elektro-



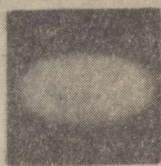
1s m=0



2p m=1



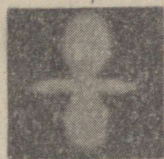
2p m=0



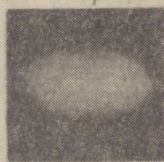
3d m=2



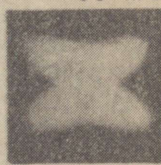
3d m=1



3d m=0



4f m=3



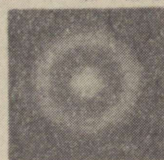
4f m=2



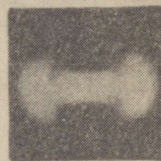
4f m=1



4f m=0



2s m=0



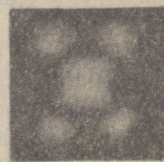
3p m=1



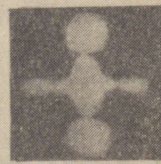
3p m=0



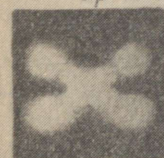
4d m=2



4d m=1



4d m=0



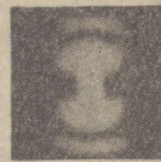
5f m=2



5f m=1



5f m=0



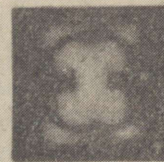
4p m=1



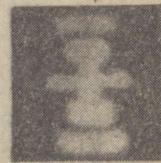
3s m=0



5d m=0



5d m=1



6f m=1

nist). Kuidas aga talitada näiteks uraani aatomi korral, kus peale tuuma on 92 üksteisega vastastikuses mõjustuses olevat elektroni? Esimesel pilgul paistab siin olukord üsna lootusetu olevat. Tõepoolest, kui juba heeliumi aatomi korral Schrödingeri võrrandit ei saa täpselt lahendada, mis siis veel uraani aatomist rääkida! Tegelikult ei ole olukord siiski väljapääsmatu. Füüsikud kasutasid ära astronoomide kogemusi. Nimelt on ka planeedi liikumise ettearvutamise korral tegemist samalaadse raskusega: planeetide vastastikune tõmbumine «häirib» nende liikumist. See kujuneb mõnevõrra teistsuguseks, kui ta oleks teiste planeetide puududes. Kuna aga sellised «häirejõud» on tunduvalt väiksemad kui päikese ja vaadeldava planeedi vahel mõjuv jõud, siis saab neid järk-järgult arvestada teatava matemaatilise võttega, mis kannab «häirearvutuse» nime. See meetod osutus viljakaks ka keeruliste aatomite omaduste kvantmehaanilisel arvutamisel. Tänapäeval tuntakse tervet rida meetodeid keerukate aatomite ja ka molekulide kvantmehaaniliseks käsitlemiseks. Ühe viljakama neist on esitanud nõukogude akadeemik V. A. Fok. Isegi lähendusmeetodite kasutamisel osutub aga Schrödingeri võrrandi lahendamine enamikul juhtudel niivõrd töömahukaks ülesandeks, et seda on mõtet teha ainult kiirete elektronarvutusmasinate abil.

Vaatamata suurele edule, mida kvantmehaanika saavutas aatomi ehituse selgitamisel, jäi siiski teooriasse kaks nõrka punkti. Esiteks, Schrödingeri võrrand ei arvestanud üldse elektroni spini olemasolu. Spini ignoreerimine oli võimalik seepärast, et aatomis liikuva elektroni energia määramisel on ta väga vähe oluline, spektrijoonetes tema mõju avaldub nõrgalt. See ei tähenda aga, et teda võiks ignoreerida kõigi probleemide korral. Teiseks, kvantmehaanikas ei arvestatud esialgu teise tähtsa füüsikalise teooria — relatiivsusteooria — nõudeid. Relatiivsusteooria näitab, et suure kiirusega toimuvate liikumiste korral (kui kiirused on juba võrreldavad valguse kiirusega $c = 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$) tuleb klassikalise mehaanika seadused asendada uute, relativistlike seadustega. Arvutus näitab, et vesiniku aatomis on elektroni liikumiskiirus umbes 1% valguse kiirusest. Seepärast on nn. relativistlikud efektid väikesed ja Schrödingeri võrrand annab katsega heas kooskõlas olevad tulemused. Raskemate aatomite

korral aga on vaja arvestada relatiivsusteooria nõudeid, kuna sel juhul elektronide kiirused võivad olla palju suuremad. Relatiivsusteooria nõuetele vastava kvantmehaanilise võrrandi leidis 1928. aastal inglise füüsik P. Dirac. See kannabki Diraci võrrandi nime. Sellest tulenesid väikesed parandused Schrödingeri võrrandi abil arvutatud elektroni energianivoodele, mis leidsid ka katseliselt kinnitust. Kuid Diraci võrrandist tulenes veel muid palju huvitavamaid järeldusi. Nimelt selgus, et see võrrand arvestas «automaatselt» elektroni spini, kuigi Dirac seda otseselt ei taotlenud. Matemaatika avas sügava seose aatomisisestes protsessides kahe nähtuste valdkonna vahel, mida seni oli uuritud täiesti lahus teineteisest. Kvantmehaaniline elektroni omadus — spin — osutus seotuks relativistlike nähtustega. Kuid seegi polnud veel kõik. Diraci võrrandist järeldus, et peavad eksisteerima veel positiivse laenguga elektronid. Kuna selliseid 1928. aastal ei tuntud, siis peeti seda järeldust võrrandi puuduseks. Kuid 1932. aastal avastati kosmilises kiirguses osakesed, mille olemasolu ennustas Diraci teooria. See osake sai positroni nime. Tema mass ja laeng on sama suurusega nagu elektronilgi, kuid erinevalt elektronist on ta laeng positiivne. Hiljem ennustati selliste «antiosakeste» olemasolu ka prootoni ja neutroni jaoks. Viimastel aastatel on antiprooton ja antineutron tõepoolest avastatud.¹ Kõigi antiosakeste üldiseks omaduseks on see, et sattudes vastastikku mõjustusse «tavaliste» osakestega, hävivad mõlemad (paarikaupa) ja tekitavad gammakvandid (elektron-positronpaari korral) või mesonid (prootonite ja neutronite ning vastavate antiosakeste puhul). On võimalik ka vastupidine protsess. Kuid niisuguste protsesside kirjeldamine jääb juba väljapoole kvantmehaanikat. Protseesse, kus on tegemist osakeste vastastikuste muundumistega, uurib uus haru kvantteoorias, mis kannab kvant-elektrodünaamika nime.

6. Tänapäeva kvantteooria suundi Mõiste «kvantteooria» on laiem kui mõiste «kvantmehaanika», ta hõlmab rea uusi suundi, mis lähevad väljapoole 1924.—1928. a. loodud kvantmehaanikat. Üks tähtsamaid suundi tänapäeva kvantteoorias ongi kvant-

¹ Neutronil teatavasti puudub laeng. Antineutron erineb neutronist magnetilise momendi märgi poolest.

elektrodünaamika. «Tavaline» kvantmehaanika võimaldab arvutada elektroni ülemineku tõenäosust vaid sel juhul, kui see toimub mingi välise mõjutuse, näit. elektromagnetilise lainetuse toimel. Iseenesest toimuva ülemineku tõenäosuse annab aga kvantelektrodünaamika. See teooria võimaldab käsitleda ka selliseid protsesse, kus toimub osakeste muundumine ja muutub ka nende arv (näiteks elektron-positronpaari vastastikusel hävimisel võib tekkida 3 γ -kvanti). Ta on järjekindlam kvantteooria kui tavaline kvantmehaanika. Asi on nimelt selles, et kvantmehaanikas vaadeldakse küll valguse kiirgumis- ja neeldumisprotsessi hüppelisena, kvantprotsessina, kuid kiiratud valguse levimise käsitlemises tavaliselt «unustatakse» see, et valgusvoog koosneb üksikutest kvantidest, ja räägitakse pidevast elektromagnetilisest väljast. Kvantelektrodünaamika loobub sellisest «kahepaiksusest», käsitledes ka kiirgust rangelt kvandituna. Kvantelektrodünaamikas liituvad ühelt poolt relativistlik kvantmehaanika, teiselt poolt kiirguse kvantteooria. Selle teooria matemaatiline külg on väga keerukas, seepärast räägime ainult nendest tulemustest, millele ta viib. Kõigepealt selgub, et ruumi osas, kus puuduvad elektronid, positronid, fotonid jt. osakesed (nn. vaakuumis), eksisteerivad siiski teatavad minimaalsed väljad. Näiteks võib seal tekkida ja kaduda elektron-positronpaare. Täielikult tühi ruum pole siiski «mittemidagi», ka seal toimuvad teatavad varjatud materiaalsed protsessid. Selliste protsesside olemasolu on tõestatud katseliselt. See toob sisse väga väikesed parandused neile elektroni energianivoodele, mis arvutatakse Diraci võrrandist. Siin on meil tegemist suurepärase näitega sellest, kuidas otsiv inimvaim, rakendades käsikäes praktikat ja teooriat, tungib üha sügavamale materia ehituse saladustesse. Schrödingeri võrrand täpsustas Bohri kvantteooria tulemusi. Diraci teooria täpsustas omakorda viimast, leides ise kinnitust kates. Kvantelektrodünaamika ennustas uusi, veel peenemaid efekte, mis ka tegelikkuses leiti. On see aga teaduse viimane sõna? Ei. Kvantelektrodünaamikas on tänapäeval rida raskusi, millest füüsikud-teoreetikud teravmeelsete matemaatiliste võtetega «hiilivad mööda». Elementaarosakeste sisemise struktuuri selgitamine — see on tänapäeva mikrofüüsika ette kerkiv probleem, selle lahendamine nõuab niihästi uut eksperimentaalset

baasi (võimsaid elementaarosakeste kiirendajaid) kui ka uut, täiuslikumat teooriat, mis ongi juba loomisel. Iga probleemi lahendamine püstitab alati rea uusi.

Teiseks tähtsaks suunaks tänapäeva kvantteoorias on kvantstatistika. See käsitleb seaduspärasusi, mis ilmnevad suures mikroosakeste kollektiivis. Selles mõttes on ta analoogiline gaasi molekulaar-kineetilise teooriaga. On näiteks teada, et metallide hea elektrijuhtivuse põhjuseks on metallis olevad vabad elektronid («elektrongaas»). Selle «gaasi» omadused on aga oluliselt erinevad tavalise gaasi omadustest, tema oleku seadused on teistsugused. Ainult teatavatel tingimustel (väike tiheus, kõrge temperatuur) käitub «elektrongaas» sarnaselt tavalise gaasiga. Elektromagnetilist kiirgust käsitleb kvantstatistika «footongaasina». Statistika mõttes on olemas kaks järsult erinevate omadustega elementaarosakeste liiki. Ühtedel (näiteks elektronidel) on spin ühikutes $\frac{h}{2\pi}$ võrdne $\pm 1/2$. Nende osakeste kohta kehtib Pauli printsiip — kaks elektroni või mingit muud osakest, mille spin pole täisarvuline (olles näiteks $\pm 1/2$; $\pm 3/2$ jne.), ei saa olla samas energeetilises seisundis. Selliste «pooliku» spiniga osakeste kohta kehtib nn. Fermi statistika. Täisarvulise spiniga osakeste kohta (näiteks foton, mille spin on 1) Pauli printsiip ei kehti. Selliseid osakesi võib olla samas energeetilises seisundis mis tahes hulk. Nad alluvad teistsugusele, nn. Bose statistikale.

Edukalt areneb tänapäeval kvantkeemia, mis on õieti kvantmehaanika rakendus molekulide tekke- ja muundumisprotsesside selgitamiseks. Kvantkeemias tekivad samalaadi matemaatilised raskused nagu keeruliste aatomitegi korral. Tuleb arvestada suure arvu osakeste — tuumade ja elektronide — vastastikuseid mõjutusi. Seepärast piirduti varem peamiselt kvalitatiivsete tulemustega. Nii näiteks selgus alles kvantmehaanika valguses aatomitevahelise keemilise sideme loomus. Seoses arvutuste mehhaniseerimisega annab kvantkeemia ikka enam ka täpseid kvantitatiivseid tulemusi. Tähtis koht on kvantmehaanikal ka tänapäeval tormiliselt arenevas pooljuhtide ja üldse tahkete kehade teoorias. Võib arvata, et kvantmehaanika seadused saavad aluseks ka elementaarsete bioloogiliste protsesside väljaselgitami-

sel. On tõestatud, et lihtsanaad elusolendid (mõned viirused) koosnevad ühestainsast hiiglaslikust molekulist. Molekulisised protsessid on aga kvantkeemia uurimisalaks. Ka pärilikkuse mehhanismi väljaselgitamisel võib kvantkeemia mängida teatavat osa, sest sugurakus on pärilikke omadusi edasikandvad materiaalsed struktuurid samuti molekuli suurusjärgus.

III. KVANTMEHAANIKA JA FILOSOOFIA

Suured avastused loodusteaduses on alati olnud tõukejõuks filosoofia arengule. Kuna füüsika on tänapäeval juhtivaks teaduseks elutu looduse seaduste tunnetamisel, siis on selge, et just füüsika edusammud mõjutavad kõige enam neid üldisi kujutlusi meid ümbritsevast maailmast ja tema seaduspärasustest, mis kajastuvad filosoofias. Seos füüsika ja filosoofia vahel on vastastikune. Filosoofia on aluseks füüsika ja teiste täppisteaduste tulemuste tõlgendamisel.

Tänapäeval, nii nagu filosoofia kogu ajaloo vältel, toimub võitlus kahe filosoofilise suuna — materialismi ja idealismi vahel. Nagu kujukalt näitas V. I. Lenin oma raamatus «Materialism ja empiriokrititsism», püüab idealistlik filosoofia, olles reaktsiooniliste klasside huvide teenistuses, igati ära kasutada raskusi, mis tekiavad loodusteaduse arengu käigus. Ka kvantmehaanika pinnal on toimunud terav filosoofiline võitlus. Lääne füüsikud, kes sotsiaalsetest põhjustest tingituna enamikus ei tunne tõeliselt teaduslikku filosoofiat — dialektilist materialismi, on oma praktilises tegevuses stiihilise materialismi pinnal, kuid filosoofiliste probleemide käsitlemisel kalduvad nad pahatihti idealismi. Seda kasutavad ära iga liiki kodanluse apoloogidid. Mõned lääne füüsikud-idealidid sirutavad avameelselt käe koostöök teaduse õelaima vaenlasega — religiooniga. Nii näiteks kirjutas inglise füüsik A. Eddington: «Religioon sai vastuvõetavaks teaduse arengule alates 1927. aastast» (s. t. kvantmehaanika loomisest. L. V.). Kelle tellimust täidavad sellised teadlased, saab selgeks, kui tutvuda eelmise paavsti Pius XII kõnega «Jumala olemasolu tõestused kaasaegse teaduse valguses», millega ta esines 1951. aastal. Vaat missuguseid pretensioone püha isa esitab:

«Maailma loomine, järelikult maailm; looja, järelikult jumal — see on sõna, mida me nõuame tänapäeva teaduselt ja mida ootab temalt meie põlvkond.» Võltsides häbitult tänapäeva füüsika avastuste tõelist sisu, püütakse «ümber lükata» materialismi, ja, nii kentsakas kui see ka pole, rakendada füüsika teooriaid vahetult kodanluse poliitiliste huvide teenistusse. Alguse tegid sellega fašistid. Nii kuulutas nats Willebrand 1935. aastal, et kui «vabaduse printsiip ilmneb aatomi uurimisel (viide määramatuse printsiibile. L. V.), siis see võimaldab luua teaduse, mis on vabastatud universaalsuse müüdist» (loe: materialismist, L.V.) ning seotud «tema loojate vere ja rassiga» (kvantmehaanika loomisel oli silmapaistev osa saksa füüsikutel). Pole midagi öelda — kvantmehaanika kutsutakse põhjendama rassismi!

Prantsuse ajaleht «Monde» (dets. 1949) arendas järgmist «teooriat»: «Kui aatomi käitumine oleks paratamatu iseloomuga, siis oleks loogiline kujutleda endale uut ühiskonda range planeerimise ja arvestuse alusel (s. t. sotsialistlikku ühiskonda. L. V.). Kui see pole aga nii, siis võib öelda, et aatomifüüsika printsiibid väljendavad üldiselt Lääne demokraatia poliitilise korra olemust.» Kommentaare pole siin vaja!

Eespool toodul pole muidugi midagi ühist teadusega. See on vaid näide, kuidas ajaloo areenilt kaduv kodanlus on nõus mistahes šarlataanlusega, kui see aga aitaks kindlustada tema positsioone. Seoses kvantmehaanikaga kerkib aga terve rida tõsisid filosoofilisi, ennekõike tunnetusteoreetilisi probleeme, mille õige lahendamine käib üle jõu dialektilist materialismi mittetundvatele füüsikutele.

Tänapäeva «füüsikaline idealism» on mahhismi uus variant. Kaasaja füüsikute-idealiste kohta on täiel määral kehtiv Lenini tuntud seisukoht: füüsikud libastuvad idealismi dialektika mittetundmise tõttu. Nii juhtus näiteks põhjuslikkuse printsiibi tõlgendamisel kvantmehaanikas. Tõsiasjast, et difraktsioonikatses (näit. tuntud Bibermani jt. katses) elektron satub kord ühte, kord teise kohta fotoplaadil, järeldasid mõned füüsikud, et elektron käitub «nagu tahab» ega allu põhjuslikele seostele. Sel alusel väidavad idealistid, nagu osutuks põhjuslikkuse printsiip ümberlükatuks; kuna aga see on üks materialistliku filosoofia põhiprintsiipe, siis kuulutatakse

ka materialism ümberlükatuks (mitmendat korda küll juba!). Sellise seisukoha vastu on korduvalt välja astunud Lääne füüsikud-materialistid. Einsteini sõnade järgi on indeterminism (seisukoht, mille järgi maailmanähtuste vahel puuduvad põhjuslikud seosed) «põlastusväärne absurdsus»; Langevin nimetas seda «vaimseks liiderlikkuseks». Kvantmehaanikale õige filosoofilise hinnangu andmisel oli aga takistuseks füüsikute-materialistide filosoofilistes seisukohtades ilmunud metafüüsilised jooned, mis avaldusid ka põhjuslikkuse printsiibi ümber tekkinud vaidlustes.

Metafüüsilis-materialistlik determinismi mõiste tugineb Newtoni mehaanikale. Selle rakendamine taevakehade liikumise selgitamisel võimaldas arvutada nende liikumist väga suure täpsusega ette pika aja jaoks. Näiteks osutus võimalikuks ennustada päikese- ja kuuvarjutuse tekkimist iga praktilist huvi pakkuva ajavahemiku peale. See viis materialistlikult häälestatud teadlased mõttele, et mis tahes maailmas toimuvad protsessid on paratamatult ette määratud. Metafüüsiline materialism samastas juhuslikkuse täpse põhjuse mitteteadmisega; selle seisukoha järgi juhuslikkus pole mitte objektiivselt omané loodusnähtustele, vaid ta avaldub siis, kui meie teadmised uuritava nähtuse kohta on veel napid. Täpsem uurimine aga peaks kõrvaldama igasuguse juhuslikkuse. Kui nüüd selgus, et näiteks difraktsioonikatses ei ole võimalik ette öelda, millisesse punkti fotoplaadil elektron satub, siis idealistid tõlgendasid seda kui põhjuslikkuse puudumist. Metafüüsilise materialismi seisukohtadel olevad füüsikud aga, nähes põhjuslikkuse printsiibis üht materialistliku filosoofia põhiprintsiipi, tulid arvamusele, et kvantmehaanika ei kirjelda täiuslikult elementaarosakeste liikumist. Tegelikult, arutlevad nad, peavad eksisteerima mingid seni teadmata põhjused («varjatud parameetrid»), mille väljaselgitamine uue, põhjalikuma teooria poolt võimaldab täpselt näidata koha, kuhu elektron difraktsioonikatse puhul peab suunduma. Sel juhul oleks elektroni liikumise korral jälle rakendatav trajektoori mõiste ning määramatuse printsiip ei oleks mitte põhimõttelise, vaid ainult praktilise iseloomuga. Ta oleks tingitud «varjatud parameetrite» mittetundmisest. Muidugi on õige, et tulevikus luuakse uus teooria, mis peegeldab täpsemini ja õigemalt elementaarosakeste omadusi, kui seda teeb

kvantmehaanika. Kuid teaduse ajalugu näitab, et uus teooria ei ole kunagi vana ümberlukkamine selles mõttes, et varem tuntud seaduspärasused lakkaksid olemast õiged nende nähtuste valdkonnas, mille uurimise varal nad olid välja selgitatud. Kvantmehaanika õigsust tõendab tohutu eksperimentaalne materjal; selle ulatuselt ei suuda temaga võistelda ükski teine füüsikaline teooria. Ei ole alust loota, et edaspidised uurimused viiksid tagasi mehaanilisele maailmapildile ja Newtoni mehaanikale. Determinism metafüüsilise materialismi mõttes ei pea mikromaailma nähtuste kirjeldamisel tõepoolest paika ning katsed seda päästa on viljatud. Metafüüsilise põhjuslikkuse, juhuslikkuse ja paratamatuse käsitluse küündimatus oli aga teada juba ammu enne kvantmehaanika tekkimist, sellest kirjutasid korduvalt Engels ja Lenin.

Dialektilise materialismi seisukohast pole paratamatus ja juhuslikkus mitte absoluutselt vastandlikud kategooriad, vaid nende erinevus on suhteline. Absoluutse, metafüüsiliselt mõistetava determineerituse puudumine mikromaailma nähtuste vallas ei tähenda hoopiski, et seal ei kehti mingid seaduspärasused. Vastupidi. Lainefunktsiooni teadmine võimaldab ette arvutada tõenäosuse selleks, et elektron langeb difraktsioonikatses teatavale kohale fotoplaadil. (Difraktsioonikatse on siin muidugi ainult näiteks; lainefunktsioon võimaldab määrata vastava tõenäosuse mis tahes olukorras). Teooria ja katse kinnitavad veenvalt, et tõenäosus on siin põhimõttelise iseloomuga ja pole mingit võimalust tagasipöördumiseks ühesele determinismile. Põhjuslikkuse printsiip peegeldab antud juhul seda, et paratamatus sisaldab endas juhuslikkuse ning avaldub selle kaudu. See on täielikus vastavuses dialektilise materialismiga. Katsed «varjatud parameetrite» kaudu tagasi pöörduda klassikalisele determinismile tähendavad sisuliselt nende uute ideede eitamist, mida tõi kvantmehaanika. Üheks selliste katsete põhjuseks (Bohmi, Vigier' ja de Broglie' hiljutised tööd) on nimelt juhuslikkuse metafüüsiline, subjektivistlik mõistmine.

Kaldumist idealismi võib täheldada kaasaegse kvantmehaanika loojate Heisenbergi, Bohri ja Diraci töödes. Selgelt avaldub see Bohri poolt formuleeritud nn. täiendatavusprintsiibi tõlgendamises (eriti Heisenbergi töödes). Teatavasti on võimalik mõõta elektroni asukohta ja

kiirust (või impulssi), kuid mitte mõlemaid samaaegselt. Vastavalt sellele on võimalikud kaht liiki mõõteriistad, millest ühed mõõdavad näiteks elektroni asukohta, teised — impulssi. Missugust nendest mõõtmistest konkreetset teostada, oleneb muidugi füüsiku meelevallast. Siit aga püütakse teha järeldus, nagu poleks elektroni reaalselt olemaski, reaalsuse loovat vaid mõõteriist, mõõtmistulemustel aga olevat subjektiivne iseloom, kuna nad sõltuvat sellest, milline üks teist täiendavatest mõõteriistadest katses valiti. Tegelikult ei määra riista valik mõõdetava suuruse väärtust (see on määratud objektiivselt, kuid mitte üheselt, vaid nii, et teatavad väärtused omavad teatava tõenäosuse). Riista valik määrab selle, millist suurust mõõdetakse. Sellest tõsiasiast aga, et iga sugune mõõtmine muudab mikroosakese füüsikalist olekut, teeb Bohr järelduse, et mõõteriista ja mikroosakese vahel toimub põhimõtteliselt «kontrollimatu vastastikune mõjustus». Analüüsides neid vaateid, märgib nõukogude akadeemik Fok õigustatult, et mingit «kontrollimatust» pole tegelikult olemas. Fok näitab, et Bohri vead, erinevalt Heisenbergi omadest (kes seisab üsna järjekindlalt idealismi pinnal) on osalt terminoloogilist laadi. Täiesti õigustamatu on aga Bohri katse anda täiendatavusprintsipiibele mingi universaalse tunnetusprintsipi tähendus. Nimelt püüdis ta allutada sellele printsipiibile kõik loodus- ja ühiskonnateadused. Esinedes 1955. aastal Genfis aatomienergia-alasel konverentsil, väitis Bohr, et «rahvuslik sõltumatus» ja «rahvaste rahulik koosseksisteerimine», samuti «isiklik vabadus» ja «sotsiaalne võrdsus» on näited «teineteist täiendavatest mõistetest» (s. t. mõlemad samaaegselt polevat võimalikud). Tänapäeval võib Bohri ja ka rea teiste väljapaistvate Lääne füüsikute vaadetes tähendada liikumist materialismile, loobumist idealismi viljatutest printsipiidest. See on tingitud ühest küljest füüsika enda arengust: uued avastused on tõlgendatavad ainult materialistliku filosoofia alusel. Lenin märkis tabavalt, et loodusteadus liigub paratamatult materialismi suunas, kuigi pimesi, kobades, vahel isegi tagurpidi. Muidugi avalduvad füüsikute materialistlikes tendentsides ka need sotsiaalsed muutused, mis on toimunud maailmas viimaste aastakümnete vältel.

Tõsised, seni veel lõplikult lahendamata filosoofilised küsimused on seotud lainefunktsiooni sisulise tähenduse

selgitamisega. Kuigi füüsikud oskavad lahendada konkreetseid probleeme, kasutades lainefunktsiooni, ei ole veel lõplikult selge, milline füüsikaline sisu vastab kasutatavale matemaatilisele formalismile. Akadeemik Fok on veenvalt näidanud, et lainefunktsiooni ei saa käsitleda analoogilisena klassikalisele väljafunktsioonile, näiteks sellele, mis määrab elektrivälja tugevuse laengu ümber. Lainefunktsiooni väärtust mingis punktis, erinevalt elektrivälja tugevusest, ei saa kuidagi mõõta. Mõõdetavad suurused on näiteks elektroni asukoht ja impulss. Need suurused on aga mõõdetavad mitteüheselt ja mitte mõlemad korraga. Lainefunktsioon on küll ühene, kuid mitte mõõdetav. Seejuures, kui mõõdetakse kas impulssi või koordinaati, muutub ka lainefunktsioon, kusjuures see muutus pole kooskõlas Schrödingeri võrrandiga. Siin on tegemist keeruka probleemiga, mille lahendamine eeldab füüsikute ja filosoofide loomingulist koostööd. Kvantmehaanikas leiavad edasiarendamist paljud dialektilise materialismi ideed; mis on omakorda üldiseks baasiks füüsika ette kerkivate uute probleemide lahendamisel.

Täiendavat kirjandust:

1. B. M. Kedrov. Dialektiline materialism kaasaegsetest avastustest materia ehituse alal. ENSV PTTLÜ väljaanne nr. 5 (198), Tallinn, 1955.

2. M. E. Omeljanovski. Materialismi ja idealismi võitlus tänapäeva füüsikas. Kogumik «Teadus ja religioon», Tallinn, 1959.

3. H. Oiglane. Elementaariosakeste struktuurist. «Eesti Loodus» nr. 5, 1959.

4. Д. Бом. Причинность и случайность в современной физике, ИИЛ, Москва, 1959.

5. Р. Е. Пайерлс. Законы природы. Физматгиз, 1959.

6. Философские вопросы современной физики. Изд. АН СССР, Москва, 1959.

7. А. Эйнштейн, Л. Инфельд. Эволюция физики. Физматгиз, 1957.

SISUKORD

| | |
|---|----|
| I. Kvantteooria tekkimine ja ta esimesed edusammud | 3 |
| 1. Klassikalise füüsika maailmapilt | 3 |
| 2. Uued avastused — uued raskused. Füüsika kriis | 4 |
| 3. Musta kiirguse mõistatus | 6 |
| 4. Fotoefekt | 8 |
| 5. Aatomi ehituse probleem. Bohri kvantteooria | 12 |
| II. Kvantmehaanika | 16 |
| 1. Materia laineline loomus | 16 |
| 2. Lainemehaanika | 21 |
| 3. Osakesed ja lained. Määramatuse printsiip | 23 |
| 4. Klassikaline ja kvantmehaanika. Trajektoor | 28 |
| 5. Aatomi kvantmehaaniline pilt. Elektroni spin | 31 |
| 6. Tänapäeva kvantteooria suundi | 37 |
| III. Kvantmehaanika ja filosoofia | 40 |
| Täiendavat kirjandust | 45 |

ВАЛЪТ Лембит Оскарович
ЧТО ТАКОЕ КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА
На эстонском языке

Эстонское Государственное Издательство
Таллин, Пярнуское шоссе, 10

Toimetaja A. Saar
Tehniline toimetaja Ü. Laul
Korrektor H. Nassar

Ladumisele antud 9. VIII 1960. Trükkimisele
antud 29. X 1960. Paber 54×84, $\frac{1}{16}$. Trüki-
poognaid 3,0. Formaadile 60×92 kohaldatud
trükipoognaid 2,46. Arvutuspoognaid 2,51.
Trükiarv 3000. MB-06589. Tellimise nr. 8160.
Hans Heidemanni nimeline trükikoda, Tartu,
Ülikooli 17/19. I.

Hind 90 kop. (9 kop.)

90 kop.
1961. a. — 9 kop.

A-17346

Valt, L

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00463733 8