

Ivan Bedalov

*(Filozofski fakultet, Zagreb,
diplomski studij filozofije)*

e-mail: ibedalov@yahoo.com

Razlozi za kvantnu teoriju

Razlozi za kvantnu teoriju

Ivan Bedalov

Sažetak

Cilj je rada u najosnovnijim crtama ponuditi objašnjenje glavnih otkrića koja su dovela do nastanka kvantne teorije kakvom su je iznijeli Niels Bohr i Werner Heisenberg. Već je nakon prvih eksperimenata sa svjetlošću bila načeta tema o dvojnog, valno-čestičnom svojstvu zračenja, bitna za razvoj kvantne fizike. Rad se u nastavku bavi razvojem fizike pod utjecajem važnih fizičara poput J. J. Thomsona, Ernesta Rutheforda, Maxa Plancka i Alberta Einsteina kao bi ponudio uvid u paradoksalnost i očividnu nepomirljivost suvremenih otkrića na području tadašnje fizike. Kao glavne protagoniste u rješavanju nastalih problema pamtimo Erwina Schrödingera, Louisa de Broglia te Nielsa Bohra i Wernera Heisenberga. Od spomenutih posljednja su dvojica posebno dragocjena za filozofski interes zbog vlastitih teorijskih osvrti na rezultate eksperimenata tadašnje fizike radi čega je velik dio rada posvećen njihovom tumačenju istih. Ono se konsenzusno naziva Kopenhagenskim tumačenjem kvantne fizike, a zadnji dio rada nastoji dati prikaz njegovih osnovnih principa.

Ključne riječi: zračenje, atom, val, čestica, kvant, Kopenhagensko tumačenje kvantne teorije, princip komplementarnosti, princip neodređenosti

*Autorski
tekstovi*

1. Uvod

U kući svoga prijatelja Waltera, odličnoga čelista, sastajao se Werner Heisenberg s još jednim mladim gudačem kako bi pokušali odsvirati Schubertov trio u B-duru. Prilikom jednoga od takvih sastanaka, tada još mladi Werner Heisenberg biva upitan zašto se nije umjesto studija fizike odlučio za onaj muzike kada već tako lijepo svira klavir. Uspoređujući razvoj glazbe za koji je osjećao da je u vrijeme njegove

mladosti ušao u neku vrstu slabe “eksperimentalne faze, u kojoj teorijska razmatranja igraju veću ulogu nego pouzdana svest o napredovanju po unapred određenoj putanji”, razvoj u prirodnim znanostima, a posebice u fizici, činio mu se posve drugačiji. “Tamo je nastavljanje ocrtanim putem samo po sebi istaklo probleme u kojima se dovode u pitanje osnovni stavovi filozofije, struktura prostora i vremena i važenje principa kauzaliteta. Tu se, verujem, otvara još jedna nepregledna nova zemlja, i verovatno će više generacija fizičara imati pune ruke posla dok se ne nađu konačni odgovori. A meni se upravo čini veoma primamljivim da i ja donekle učestvujem u tome”, tvrdi Heisenberg (Hajzenberg 1972: 47-48).

Heisenbergov odgovor može dobro poslužiti za prikaz tadašnjeg općeg raspoloženja koje je vladalo među fizičarima. Razvoj atomistike doveo je do preispitivanja cjelokupnih temelja na kojima je moderna znanost počivala. Nedugo nakon što je Einstein iznio svoju posebnu teoriju relativnosti, novi eksperimenti provedeni u svrhu otkrivanja strukture atoma natjerat će istraživače koji su spremni “sudjelovati” da još jednom stave pod sumnju sve što su dotad znali ili su mislili da znaju o prirodi. U gore navedenom odgovoru Heisenberg je iznio mišljenje da je razvoj prirodnih znanosti u pitanje doveo osnovne stavove filozofije i najvažnije pojmove klasične fizike kao što su prostor, vrijeme i uzročnost. Da bismo razumjeli kako je do toga došlo, potrebno je prikazati povijesni tijek rasprava koje datiraju još od vremena Newtona. U ovome radu nastojat će se sažeto, ali što dosljednije prikazati taj povijesni tijek, kako bi se istaknula ključna otkrića koja su dovela do razvoja kvantne teorije. Stoga ćemo krenuti od 17. stoljeća kada su pitanja o pravoj naravi svjetlosti – poput pitanja je li svjetlost val ili roj čestica – izgledala besmisleno, no bila postavljena itekako s razlogom.

2. Svjetlost: dualni aspekt i zračenje

2.1. Svjetlost: val ili čestica

U 17.-om i 18.-om stoljeću najveći je autoritet za pitanja koja su se ticala znanosti bio Isaac Newton. On je zastupao tezu da se svjetlost sastoji od sitnih čestica, takozvanih korpuskula. Barem tri argumenta

išla su u prilog njegovoj tezi. Prvi je da se svjetlost širi pravocrtno: ako npr. pustimo zraku svjetlosti preko oštrog ruba, dobit ćemo i oštro porubljenu crtu svjetlosti. Iz svakodnevnog iskustva znamo da se valovi ogibaju oko rubova, što automatski isključuje u spomenutom slučaju opis svjetlosti pomoću valova. Drugi je razlog taj da se svjetlosne zrake prelamaju pri prolazanju kroz prepreku koja razdvaja gušću supstancu od rjeđe i to je razlog zašto se npr. slamka doima većom u vodi. Ta se pojava mogla dobro opisati teorijom prema kojoj se korpuskule kreću brže u “optički gušćoj” sredini (Gribin: 23). Konačno, treći argument zvuči pomalo banalno a radi se o tome da se odbijanje zrake svjetlosti od ogledala dalo usporediti s načinom na koji se loptica odbija od zida.

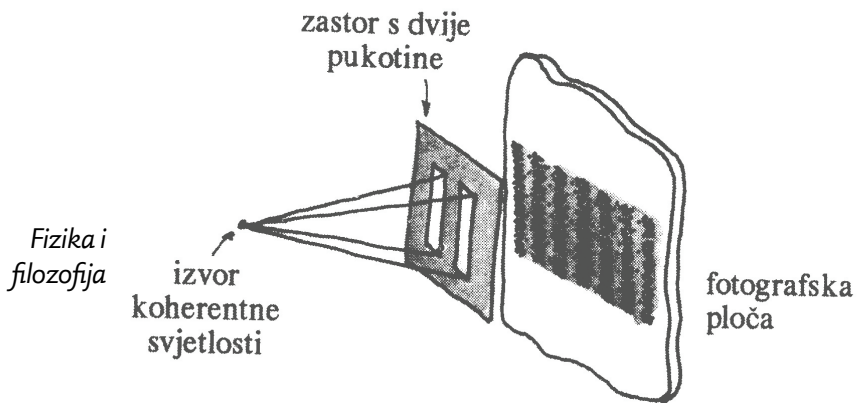
*Autorski
tekstovi*

Suparnik korpuskularnoj tezi bio je Christian Huygens, nizozemski fizičar koji je svjetlosne zrake uspoređivao s kretanjem zvučnih valova. Prema Huygensu, cijeli svemir prožet je nevidljivom tvari – eterom. Slično kao što se valovi stvaraju trzanjem žice, pri čemu zrak titra oko žice, tako je i svjetlost svojevrsno titranje etera. Kada bi na nekom mjestu pobudili eter na titranje, od istog bi se mjesta tada širio val u koncentričnim krugovima. Osim Huygensa, valnu teoriju svjetlosti jedino su Leonard Euler i Benjamin Franklin shvaćali ozbiljno dok ona postaje šire prihvaćenom tek nakon eksperimenata Thomasa Younga i Augustina Fresnela.

Youngova je zasluga u tome što je dokazao da se svjetlost može ogibati i interferirati – dva svojstva potpuno neobjašnjiva korpuskularnom teorijom. Young je otkrio da se svjetlost ogiba jedino oko pukotine koja je jednaka ili manja valnoj duljini vala svjetlosti. Proputimo li zraku svjetlosti kroz zastor s jednom takvom pukotinom, ona će sama izgledati kao samostalan izvor svjetlosti šireći zrake u koncentričnim krugovima. Kada bismo postavili još jedan zastor, ovdje ga puta s dvije pukotine, zrake koje bi prolazile kroz njega međusobno bi se križale i tako interferirale konstruktivno i destruktivno¹, pri čemu bi na detektorskom zaslonu kojim mjerimo rezultate stvarale tamne i svijetle pruge (vidi sliku 1 i 2). Augustin Fresnel izveo je eksperimente

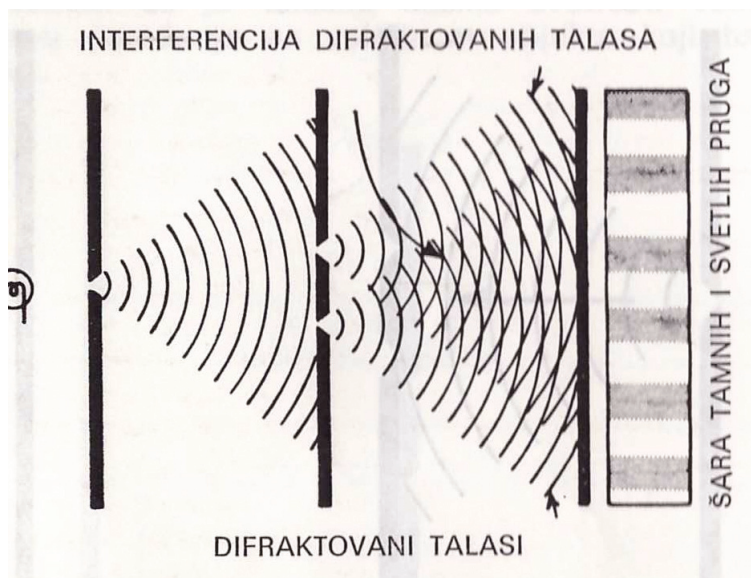
¹ Konstruktivnom interferencijom označavamo pojavu kada se dva vala susretnu sa svojim brjegovima, prilikom čega se dobiva brjieg koji je jednak zbroju dvaju brjegova.

Ako se susretnu brjieg jednog i dol drugog vala, valovi se poništavaju i tada govorimo o destruktivnoj interferenciji.



Slika 1

Difrakcija svjetlosti kroz zastor s dvije pukotine. Svijetle i tamne pruge na fotografskoj ploči rezultat su interferiranja valova svjetlosti



Slika 2

Shematski prikaz difrakcije svjetlosti kroz zastor s dvije pukotine

kojima je dao valno objašnjenje gotovo svih aspekata ponašanja svjetlosti i tako dodatno potvrdio vjerovanje da je svjetlost valno gibanje.

Valna teorija svjetlosti odnosi konačnu pobjedu radom Jamesa Clarka Maxwella koji je ustanovio da je svjetlost gibanje elektromagnetskih valova čija brzina iznosi približno 300 tisuća m/s. Razdoblje Maxwellovih otkrića možemo nazvati trijumfom klasične fizike nakon kojega se činilo kao da više nije mnogo toga preostalo za otkrivanje u fizici. Kao što John Gribbin tvrdi u svojoj knjizi, krajem 19. stoljeća samo je genij ili budala mogla pomisliti da se svjetlost sastoji od malenih čestica, što je upravo Albert Einstein učinio (Gribin: 32). No, Einsteinu takvo otkriće nije palo s neba. Usporedno s valnom teorijom svjetlosti razvijala se i atomistička teorija.

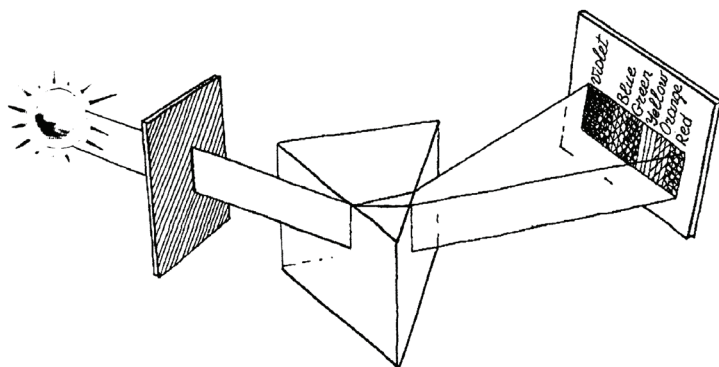
*Autorski
tekstovi*

Prije negoli se osvrnemo na razvoj ideje atomistike, potrebno je dati prikaz razvoja spektralne analize tj. analize emisijskog spektra zračenja koje posjeduje svako tijelo u prirodi. Spomenuti razvoj pokazat će se ključnim za provjeru točnosti modela atoma koji su bili predlagani na početku 20. stoljeća.

2.2. Svjetlost i zračenje

Newtona držimo odgovornim za otkrivanje Sunčeva spektra. Godine 1664., propuštajući zrake Sunčeve svjetlosti kroz prizmu, Newton je uočio dugine boje na zidu iza prizme te tako dokazao da je bijela svjetlost superpozicija svih boja vidljivih ljudskom oku. U skladu s valnom teorijom Thomas Young je izračunao da svakoj boji u spektru duge odgovara jedna valna duljina Sunčeve svjetlosti, dok zahvaljujući Maxwellovim radovima danas možemo reći da je svjetlost elektromagnetsko zračenje valnih duljina između $7 \times 10^{-7} \text{m}$ i $4 \times 10^{-7} \text{m}$. Zračenje koje je manje ili veće od navedenih granica zovemo infracrvenim odnosno ultraljubičastim zračenjem. Kad bismo prikazali sve valne duljine koje Sunce zrači, prikazali bismo Sunčev spektar (vidi sliku 3).

U gornjem odlomku neprimjetno smo prešli s isijavanja svjetlosti na fenomen zračenja. Svjetlost i zračenje isto su tj. svjetlost je samo naziv za onu vrstu zračenja koje je vidljivo ljudskom oku. Zračenje je svojstvo svih tijela i mijenja se s promjenom njihove temperature, a ako neko tijelo zrači, onda zračenje mora biti na neki način povezano s



Slika 3

Spektar Sunčeve svjetlosti dobiva se tako da zrake svjetlosti propustimo kroz prizmu. Na zidu tada dobivamo dugine boje.

elementima od kojih se to tijelo sastoji. Za primjer ćemo uzeti željezo. Ako pretpostavimo (što je u vrijeme spektralne analize još uvijek bila pretpostavka) da se željezo sastoji od atoma, zagrijavanjem željeza povećat će se i njegova toplina koju objašnjavamo povećanjem gibanja tj. kinetičke energije čestica od kojih se sastoji. Užareno tijelo zrači toplinu koju možemo osjetiti čak i ako samo približimo ruku takvome tijelu, što dovodi do zaključka da čak i atomi od kojih se tijelo sastoji moraju na neki način emitirati neku vrstu zračenja. Istraživači su bili suočeni s novom pojavom – zračenjem – koje do tada nije imalo ništa zajedničko s atomističkom hipotezom (vidi: Ponomarjov: 11-15; 23-27).

Prve korake prema opisu zračenja najmanjih čestica možemo zahvaliti Williamu Hydeu Wollostonu, Josephu von Fraunhoferu i Williamu Swanu. Prvu dvojicu držimo zaslužnima za otkriće čudne pojave u Sunčevu spektru. Naime, njih su dvojica otkrili postojanje tamnih linija u Sunčevu spektru, raspoređenih bez vidljive pravilnosti. Fraunhofer je izdvojio najjasniju (dvostruku) liniju u spektru i označio je kao D-liniju. Kasnije je ustanovio da se u spektru plamena alkoholnog plamenika pojavljuje jednaka linija na istome mjestu, samo što je ovaj put blistavo žuta. Posljednji od istraživača otkrio je da se blistavo žuta D-linija pojavljuje samo kad u plamenu alkoholnog plamenika ima nešto

metala natrija.² “Kao i mnogi prije njega, Swan nije shvatio značenje svog otkrića, pa tako nije izrekao odlučne riječi ‘Ta linija pripada natriju’ ” (Ponomarjov: 24).

Ključni eksperiment koji je doveo u vezu osnovne elemente i spektralnu analizu bio je onaj dvojice profesora iz Heidelberga, Gustava Roberta Kirchoffa i Roberta Williama Bunsena 1859. godine. Oni su propuštanjem Sunčeve svjetlosti kroz plamen alkoholnog plamenika također uočili tamnu D-liniju, no kad se prekinuo dotok svjetlosti pregradom, plamenik bi na istome mjestu “projicirao” svijetlu D-liniju. Propustimo li ponovo Sunčevu svjetlost, D-linija ponovno postaje tamna. Dvojica istraživača učinila su još jedan sličan eksperiment u kojem su Sunčevu svjetlost zamijenili zračenjem što ga emitira vruće tijelo. Poznato je da je spektar užarenog tijela kontinuiran i ne pokazuje tamne linije,³ no prolazeći kroz plamen alkoholnog plamenika spektar je također sadržavao tamnu D-liniju. To je dovelo do zaključka da *plamen uvijek apsorbira svjetlost koju i sam emitira*. Posljedice spomenutih eksperimenata bile su ogromne. Kako su istraživači bili gotovo sigurni da je uzrok tamnoj ili svijetloj crti prisutnost natrija, zaključak je bio očigledan: na Suncu mora biti natrija. Ali ne samo to, spektralna analiza dovela je do zaključka da svaki element mora imati svoj linijski spektar tj. strogo određen niz linija čija se valna duljina nikada ne mijenja; (vidi slika 4) zatim da se te linije mogu iskoristiti za analizu sastava tvari ne samo na Zemlji nego i na zvijezdama te da se Sunce sastoji od vrela jezgre i razmjerno hladnije fotosfere koju čine užareni plinovi (vidi: Ponomarjov: 26).

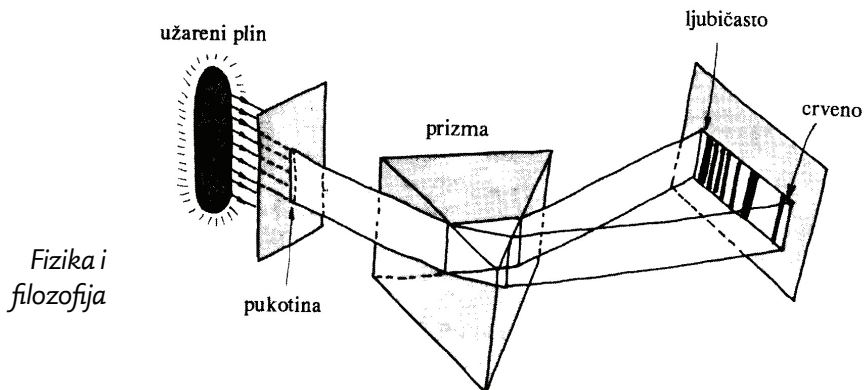
Ivan Supek u knjizi *Povijest fizike* opisuje situaciju nastalu u fizici nakon otkrića spektralne analize:

“Temeljni je zakon cijele spektralne analize da atomi kemijskih elemenata emitiraju svjetlost karakterističnih frekvencija. Tu osnovnu crtu našli smo kod titranja napetih žica ili membrana. Da se provede Huygensova valna teorija svjetlosti, moraju se atomi shvatiti kao mali titra-

² Metala natrija ima u kuhinjskoj soli, a tragovi soli gotovo se uvijek mogu naći u raznim tvarima, pa i u plamenu alkoholnog plamenika (vidi: Ponomarjov: 24)

³ Linijski spektar razlikuje se od kontinuiranog spektra. “Kontinuirani (ili termalni) spektar uključuje sve valne duljine, stvaraju ga vruća

tijela, ali ne ovisi o prirodi tih tijela. Linijski je spektar skup oštih linija, a nastaje zagrijavanjem plinova i para (kada su međuatomske interakcije slabe). Najvažnija je značajka tih nizova što su jedinstveni za svaki element.” (Ponomarjov: 26)



Slika 4.

Linijski spektar dobiven propuštanjem zračenja nastalog zagrijavanjem plina kroz prizmu. Dokazano je da su pojedinačne linije rezultat pobuđenih kemijskih elementa te da svaki element emitira određene linije

jni sustavi koji pobuđuju valove etera. Kao što se širi zvuk od zatitrane žice, tako se i od pobuđenih atoma širi svjetlost. Iskustvo pokazuje da atomi pri emisiji, kao i pri apsorpciji, mogu titrati samo s nekoliko karakterističnih frekvencija. Atom svakog kemijskog elementa nalazi na instrument koji je udešen na određeni niz tonova. Shvatiti glazbu atoma – bit će od sad glavno nastojanje fizike.” (Supek, 1990: 23)

Pokazalo se da linijski spektri ne ovise o vrsti kemijskog spoja kojim su atomi vezani, iz čega je slijedilo objašnjenje da uzroke tih spektara treba tražiti na razini atomskih hipoteza. Tek je 1874. godine, zahvaljujući engleskom astrofizičaru Normanu Lockyeru, shvaćeno da spektar karakterizira pojedini atom; a ako je atom odgovoran za linijski spektar, onda on mora imati strukturu!

3. U potrazi za atomskom strukturom

Iste ideje kao i gore spomenuti Lockyer iznijeli su James Clark Maxwell (1860) i Ludwig Boltzmann (1866). Boltzmann je sigurno odigrao jednu od najznačajnijih uloga u razvoju kvantne fizike iako toga nije bio niti svjestan jer su se njegove ideje počele primjenjivati tek pred kraj njegova života, a on sam za to čak nije ni znao. Naprotiv, Boltzmann je sebi oduzeo život radi usamljenosti u svojim nastojanjima da ponašanje plinova opiše pomoću atomskog koncepta. U njegovo vrijeme mnogi ljudi još nisu bili spremni prihvatiti atomističku ideju. Leonid Ponomarjov u knjizi *Kvantna kocka* tvrdi za Schopenhauera da se izričito protivio spomenutoj ideji i držao da atomi nisu drugo doli “mašta apotekarskih neznalica,” a u sličnim mu se izjavama pridružio i austrijski filozof i fizičar Ernst Mach nazvavši sve atomiste “vjerskom zajednicom” (Ponomarjov: 57). Najveća tragedija leži u tomu što je Boltzmann oduzeo sebi život nekoliko mjeseci nakon što je tada nepoznati teoretičar Albert Einstein, primjenjujući njegove i Maxwellove teze objavio rad kojim je postojanje atoma stavljeno izvan svake sumnje. Einsteinov rad objasnio je zagonetku koja je mučila fizičare još od 1827. godine, a ona je ležala u objašnjenju fenomena kretanja sitnih zrnaca peludi nazvanog “Brownovo gibanje”.

Robert Brown, škotski botaničar, u ljeto je 1827. godine mikroskopom proučavao način na koji se najfinija zrnca biljne peludi gibaju po vodenoj površini. Uočio je da je to gibanje nepravilno i zaključio da se radi o postojanju nekih nevidljivih sila (nazvanih “Brownim gibanjem”). Daljnjim eksperimentalnim provjerama dvojice istraživača, Belgijanca Ignacea Carbonnellea (1880) te Francuza Louisa Georgea Gouya (1888), dalo se zaključiti da je ta pojava neovisna o bilo čemu osim o veličini čestica. Takvim provjerama atomistička je hipoteza dobila brojne pobornike zato što je zaključak koji se mogao izvesti iz rezultata dvojice istraživača bio taj da gibanje ovisi samo o slučajnim udarima sa sićušnim, nevidljivim česticama tekućine. Usprkos tomu konačna potvrda atomske hipoteze dobivena je tek 1905. godine, kada mladi teoretičar Albert Einstein primjenom Boltzmannove statistike dolazi do rješenja. Prema Boltzmannu, plinovi se sastoje od atoma ili molekula koji se mogu zamisliti kao sićušne čvrste sfere koje se sudaraju međusobno i sa zidovima spremnika u kojemu

*Autorski
tekstovi*

su zatvoreni. Iz takvih pretpostavki on je došao do ideje o toplini kao ukupnoj kinetičkoj energiji mikroskopskih čestica, kretanje kojih je uspio opisati putem matematičke deskripcije i tako ustanovio ono što danas zovemo statističkom mehanikom. Einstein je pokazao da se Brownovo gibanje pokorava određenoj statističkoj zakonitosti i da se ono može opisati suglasno statistici koju su Boltzmann i Maxwell koristili da bi opisali način na koji se atomi kreću u plinu ili tekućini. Kao što je već bilo istaknuto, tim je radom postojanje atoma stavljeno izvan svake sumnje.

Razvoj ideje atomistike nije tekao nimalo glatko. Kao što se može vidjeti iz gornjeg primjera on nije bio u potpunosti prihvaćen sve do početka 20. stoljeća usprkos obilju podataka koji su potvrđivali da atomi zaista postoje. -, to nije spriječilo istraživanja koja su u svojem programu pretpostavljali postojanje atoma kako bi se ispitala njegova struktura. Presudnim su se pokazala istraživanja s katodnom cijevi⁴ koja su dovela J. J. Thomsona do izračuna električnog naboja e i mase m onoga što se tada nazvalo "atomom elektriciteta". Pokazalo se da je elektron (kako su ga kasnije nazvali) čestica s negativnim nabojem čija je masa gotovo neusporediva s masom atoma. Daljnji razvoj doveo je do otkrića postojanja čestica sličnih elektronima, samo što ove imaju suprotan naboj i veću masu⁵. Tako je Thomson imao dovoljno materijala da prikaže atom, ne kao nedjeljivu česticu, već kao česticu sastavljenu od manjih čestica pozitivnog i negativnog naboja. Thomson je znao da su atomi neutralni i iz toga je zaključio da bi se negativno nabijeni elektroni trebali nalaziti u pozitivno nabijenom prostoru, slično kao što izgleda kolač s grožđicama (usporedimo li grožđice s elektronima) (vidi: Slika 5). Ipak, niti najbolja teorija ne može izdržati pobijanje dobro izvedenog eksperimenta, pogotovo ne onakvog kakav su izveli Rutheford i suradnici. Ernest Ruth-

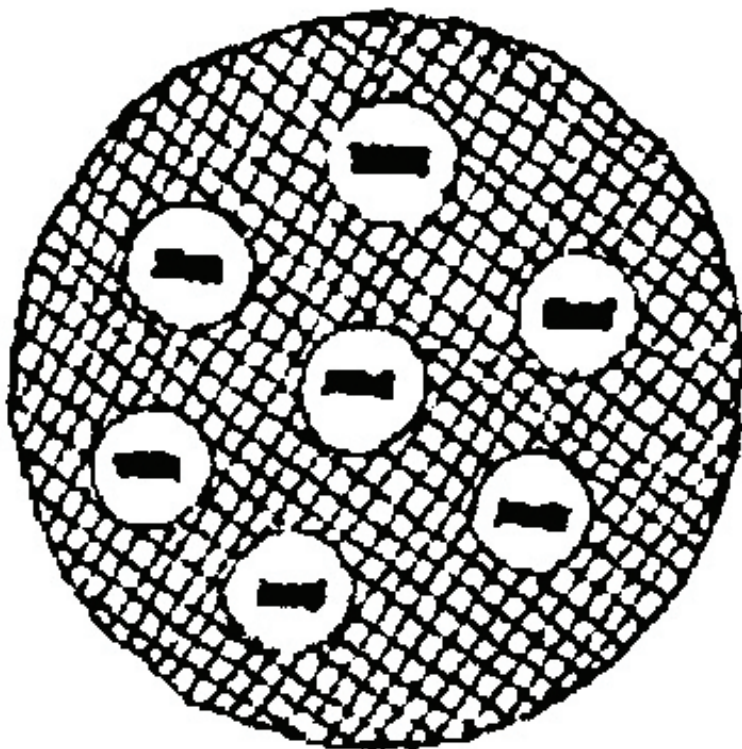
⁴ Tim nazivom označavamo cijev sa žicom u sredini, spojenom na svakom kraju sa suprotnim polovima baterije. Istraživanja s katodnom cijevi dovela su do pronalaska katodnih zraka za koje se pokazalo da imaju negativan naboj. William Crookes ustanovio je da su katodne zrake ili "tvari koja zrači" snop negativno nabijenih čestica manjih od atoma.

⁵ Kasnije se otkrilo da je riječ o protonu.

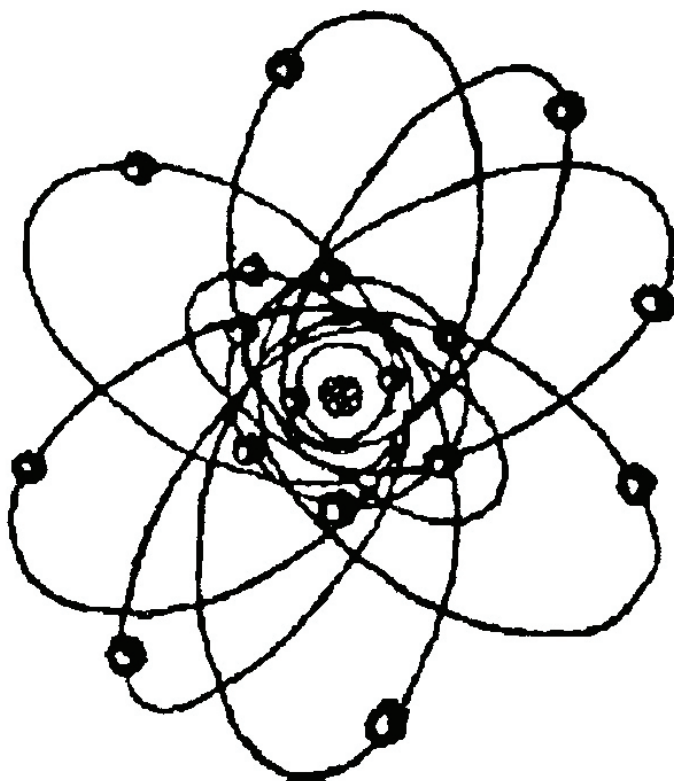
⁶ α - čestice u Ruthefordovo vrijeme bile su poznate kao radioaktivno zračenje koje je emitirao atom radija. No nije bilo poznato odakle to zračenje stiže, kako do njega dolazi, a i dan danas ne može se s točnošću predvidjeti kada će do takvog zračenja doći. Rutheford je u svojim istraživanjima došao do spoznaje da su α - čestice ioni helija koji nastaju raspadom jezgre radija prilikom čega se ona rješava dvaju protona i dvaju neutrona.

eford u svojem je eksperimentu ispaljivao α -čestice⁶ kroz tanak sloj folije i uspoređivao ih s rezultatima ispaljivanja kada folije nije bilo. Rezultati koje je dobio bili su začuđujući. α -čestice su prolaskom kroz foliju skretale sa svoje putanje, a daljnjim napornim radom Ruthefordovih asistenta otkriveno je da se u prosjeku jedna od 8000 α -čestica čak odbije nazad. Kako znamo da α -čestice imaju masu 7000 puta veću od mase elektrona i mogu se kretati brzinom bliskoj brzini svjetlosti one bi trebale prolaziti ravno kroz Thomsonove atome i ne bi nikako mogle skretati a kamoli biti

Autorski tekstovi

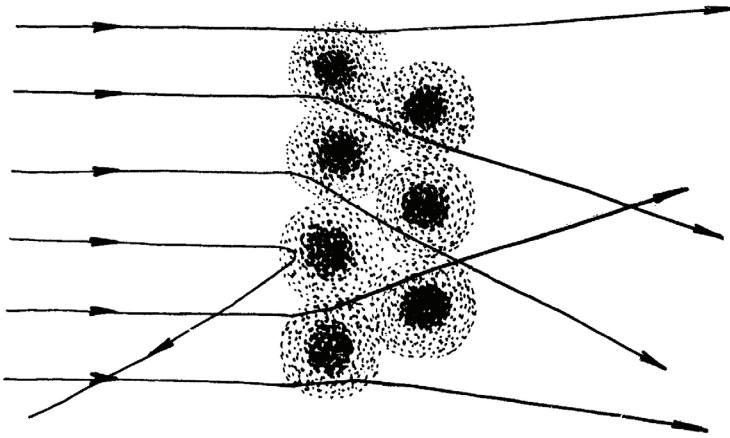


Slika 5
Thomsonov model atoma



Slika 6
Ruthefordov model atoma

odbijene unazad (Slika 7). Rutheford je ustvrdio da jedini način na koji bi se α -čestice mogle odbijati jest slučaj koncentracije pozitivnog naboja atoma u sićušnom središtu. To ga je dovelo (1911. godine) do modela atoma koji nazivamo “planetarnim” zato što podsjeća na Sunčev sustav s planetima oko njega (vidi: Slika 6). U Ruthefordovu atomu cjelokupni pozitivan naboj atoma koncentriran je u malom središtu oko kojega kruže negativno nabijeni elektroni. Kasnije je ustanovljeno da jezgra čini sto tisućiti dio veličine atoma.



*Autorski
tekstovi*

Slika 7

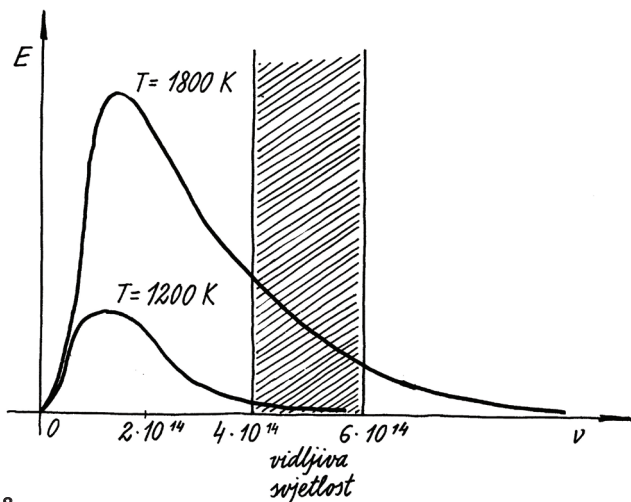
Prolazak α -čestica kroz tanak sloj materije

Rutherfordov atom bio je veliki uspjeh. John Gribbin piše da je tom modelu atoma bilo suđeno preobratiti fiziku, ali i dovesti do neizbježnog pitanja: onog o stabilnosti atoma (Gribin: 46). Prema Coulombovu zakonu, različiti naboji trebali bi se privlačiti, što bi u slučaju elektrona i protona rezultiralo padom elektrona na atomsku jezgru i raspadom atoma. Iz tog je razloga pretpostavljeno da se elektroni u atomu konstantno kreću oko jezgre. S druge strane, kretanje je elektrona novi problem zato što bi prema zakonima elektrodinamike rotirajući elektron morao zračiti energiju u obliku elektromagnetskih valova, što bi rezultiralo njegovim gubitkom energije te bi tako elektron ponovno morao pasti na jezgru. Rješenje za stabilnost atoma ponudio je Niels Bohr, danski fizičar koji će kasnije postati poznat kao jedan od glavnih osnivača kvantne fizike. Kako bi Bohrov model atoma bio razumljiv, potrebno je opisati fenomen zračenja crnog tijela za koje se, sve do Max Planckovog otkrića, nije moglo ponuditi rješenje koje ne bi bilo u najmanju ruku paradoksalno.

4. Zračenje crnog tijela – otkriće kvanta

Fizika i
filozofija

Ivan Supek u knjizi “Povijest fizike” kaže kako je od otkrića elektrona postalo jasno da su izvori svjetlosti titraji elektrona u atomu. “Prema klasičnoj teoriji, elektron bi, krećući se u atomu, emitirao isto tako svjetlost, kao što antena šalje radiovalove kad u njoj titra električna struja” (Supek: 170). Kao što smo već spomenuli, nisu svi bili spremni prihvatiti atomsku hipotezu u proračunima termalnog spektra. Poseban fenomen u svijetu fizičara krajem 19. stoljeća bio je zračenje crnog tijela.⁷ Univerzalnu spektralnu funkciju⁸ koja opisuje emisijski spektar apsolutno crnog tijela uveo je u znanstvenu praksu njemački fizičar, već spomenuti Gustav Robert Kirchoff 1859. godine. Kako se pokazalo, njezino je mjerenje bilo pravi izazov. Spektar zračenja crnog tijela raspoređuje se na sljedeći način: pri najmanjim frekvencijama imamo nizak stupanj energije koji se postepeno povećava te dostiže svoj vrh pri srednjim frekvencijama koje otprilike odgovaraju vidljivom spektru svjetlosti. Neobjašnjiva je činjenica to da će – krećući se prema visokim frekvencijama – funkcija naglo pasti, što predstavlja određeni moment diskontinuiteta; osim toga, energija pri visokim frekvencijama gotovo je jednaka nuli. (Slika 8)



Slika 8

Prikaz zračenja crnog tijela za temperaturu 1200 K i 1800 K. Iz grafikona se jasno može vidjeti kako se povećanjem temperature ne dobiva znatno veća energija u visokofrekventnom dijelu spektra

Što tu ne valja? Prema klasičnoj teoriji energija koja isijava pri ma kojoj frekvenciji proporcionalna je toj frekvenciji. Što je viša frekvencija, to bi trebala biti i veća energija zračenja. Prema proračunima dvojice fizičara, Rayleigha i Jeansa, zračenje crnog tijela pri najvišim frekvencijama dovelo bi do "ultraljubičaste katastrofe", što će reći do ogromnog povećanja energije što se spektar više pomiče prema ultraljubičastom dijelu i tako bi spalilo lice svakome tko bi se našao u blizini. Dvojica fizičara koristila su se Boltzmannovom statistikom i pretpostavila su da se energija kontinuirano (u skladu sa statističkim zakonima) raspodjeljuje na sve dijelove podjednako i da se ukupna količina energije dobiva zbrojem energije svih pojedinih dijelova. Upravo je u tome ležala glavna pogreška. Planck se u svojim proračunima također koristio Boltzmannovom statistikom (makar nepravilno), razlika je bila jedino u tome što je Planck "znao odgovor koji je tražio" pa je tako prekinuo izračun Boltzmannove statistike upravo na onome dijelu kada se zbrajanjem pojedinačnih čestica dobiva ukupna količina energije koja dovodi do ultraljubičaste katastrofe. Planck se nije fokusirao na samo zračenje već na način na koji električni oscilatori (atomi koji zrače) emitiraju i apsorbiraju energiju – tu se krije njegova glavna zasluga. On je došao do nevjerojatne teze da oscilatori u crnome tijelu mogu emitirati ili apsorbirati energiju samo u djelićima određene veličine zvanim *kvanti!* Raspoloživa količina energije može se razdijeliti na ograničen broj dijelova zato što oscilatori ne mogu poprimati bilo kakve iznose, već samo određene količine energije. Tako će u dijelu spektra koji ima nisku frekvenciju mnogo atoma biti pobuđeno na emitiranje niskoenergetskih kvantâ, što neće znatno doprinijeti povećanju energije u tom dijelu spektra. Jedino će pri srednjim frekvencijama biti mnogo atoma koji će moći apsorbirati i emitirati dovoljno velikih kvantâ da to dove-

*Autorski
tekstovi*

⁷Crnim tijelom nazivamo u principu svako tijelo koje emitira neko zračenje. Idealno ili apsolutno crno tijelo zamišljamo kao šuplju kuglu ili kocku s malim otvorom kroz koji se emitira zračenje. Specifičnost je crnih tijela da njihovo zračenje neće ovisiti o materijalu od kojeg su sačinjena i da će pri istoj temperaturi emitirati više energije za pojedinu frekvenciju nego bilo koje drugo tijelo, što ga čini idealnim emiterom. Ono je isto tako

i idealni apsorber zato što ćemo, osvjetljujući to tijelo kroz otvor, na njemu uvijek vidjeti crnu rupu jer se u njemu zrake svjetlosti višestruko reflektiraju i nikad ne izbijaju van.

⁸ Spektralni sadržaj zračenja opisujemo upotrebom spektralne funkcije koja daje mjeru udjela zračenja određene frekvencije u ukupnom toku zračenja pri danoj temperaturi tijela.

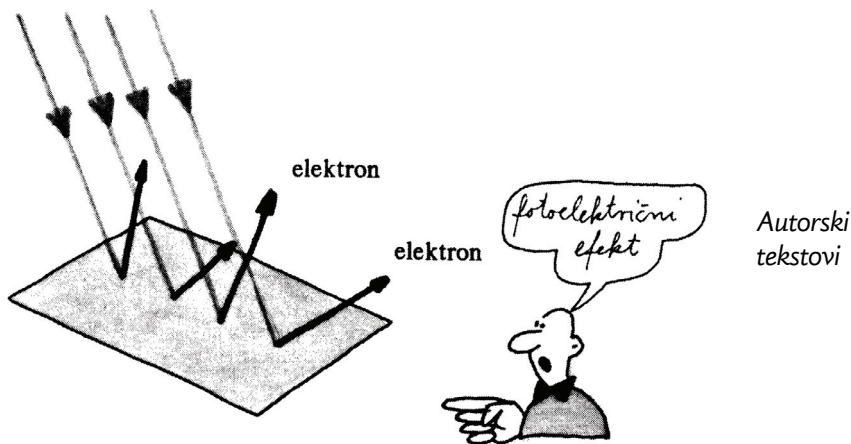
de do znatnog povećanja spektralne funkcije, dok će za visokofrekventno zračenje energija potrebna za emitiranje jednog kvanta zračenja biti toliko velika da će samo nekoliko oscilatora imati toliko energije. Emisija samo nekoliko visokoenergetskih kvantâ ne može se pokazati značajnom u funkciji iz jednostavnoga razloga što ih je samo nekoliko (Gribin: 55). Planck je napisao formulu za energiju pojedinog kvanta i ona se mora odnositi prema svojoj frekvenciji u skladu s formulom: $E = hv$ gdje h označava Planckovu univerzalnu konstantu koja iznosi nevjerojatno malih $6,6260755 \times 10^{-34}$ Js, a ν (ni) je oznaka za frekvenciju.

Danas znamo da je Planckova formula uzdrmala same temelje klasične fizike. "Do tada je u znanosti bilo nesumnjivo da se sve promjene u prirodi događaju neprekidno ... To načelo kontinuiranosti izriče Leibniz poznatim riječima: 'priroda ne izvodi skokove'" (Supek: 171). Malo tko je znao u to vrijeme što Planckova konstanta znači. Čak je i sam Planck, koji je bio veliki pobornik klasične fizike, nastojao do kraja života pomiriti svoje otkriće sa zakonima klasične fizike. Nije uspio, a Nobelovu nagradu za svoj rad dobio je 1918. godine.

Za primjenu Planckove formule i pokazivanja njenih domašaja u prvim redovima zaslužni su Albert Einstein te Niels Bohr. Prvi je primjenom Planckove formule dokazao da se svjetlost sastoji od sitnih čestica energije, takozvanih kvantâ svjetlosti, dok je drugi ponudio rješenje za jednu od najvećih zagonetki u svijetu fizike, onu o stabilnosti atoma. U narednim poglavljima bit će riječi o počecima kvantne fizike, kako je došlo do stvaranja kvantne mehanike, koje su bile najveće nedoumice što su mučile istraživače da bi se na kraju ponudilo takozvano "Kopenhagensko tumačenje kvantne teorije" koje je istoj dalo izgled kompletne teorije, a za koju najzaslužnijima držimo Nielsa Bohra i Wernera Heisenberga.

5. Primjena kvanta: fotoelektrični efekt i stabilnost atoma

Zahvaljujući njemačkim fizičarima Heinrichu Hertz, Wilhelmu Hallwachu i mađarskom fizičaru Philippu Lenardu, Albert Einstein imao je pred sobom zagonetnu pojavu znanu kao fotoelektrični efekt. Tim nazivom označavamo pojavu kada iz svjetlošću obasjanog metala izlijeću elektroni (vidi: Slika 9).

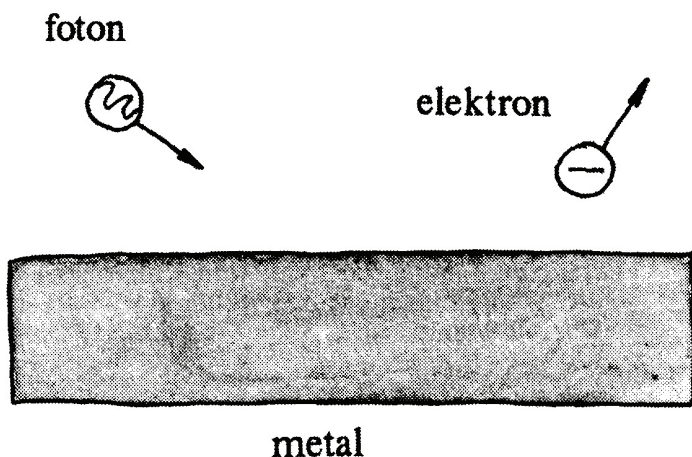


Slika 9
Fotoelektrični efekt

Spomenuli smo u prethodnim poglavljima kako zahvaljujući Maxwellu znamo da je svjetlost elektromagnetski val tj. val koji uzrokuje titranje električnog i magnetskog polja. Prema valnoj teoriji svjetlosti, izlijetanje elektrona iz metala zbivalo bi se tako da bi elektromagnetski valovi uzrokovali porast energije elektrona koji bi sve više i više titrali dok konačno ne bi dobili dovoljnu količinu energije da izlete iz metala. Prema klasičnoj fizici očekivali bismo da će se kinetička energija i brzina elektrona povećavati s porastom intenziteta svjetlosti kojom obasjavamo metalnu ploču, ali pokusi Philipa Lenarda dali su posve drugačije rezultate. On je dokazao da se kinetička energija elektrona ne mijenja povećanjem intenziteta svjetlosti već se mijenja samo broj elektrona koji izlijeću. Ali čim promijenimo frekvenciju zračenja i počnemo zračiti recimo ljubičastom svjetlošću, energija i brzina elektrona pri izlijetanju odmah se mijenjaju tj. rastu. "Svjetlost npr. dvaput veće frekvencije proizvodi elektrone s dvaput većom kinetičkom energijom" (Supek: 172). Ovakvi rezultati bili su potpuno nespojivi s valnom teorijom svjetlosti. Kako se pokazalo, Einstein je imao spreman odgovor koji je značio jedno od najvećih ali i najjednostavnijih otkrića. On je zaključio da bi se val svjetlosti trebao sastojati od malenih korpuskula

koje je on nazvao kvantima energije. Kvant energije djeluje tako da svoju kinetičku energiju prenosi na elektron, pri čemu kvant svjetlosti “utrne”, a umjesto njega odjuri brzi elektron (Supek: 172).

Dakle, pri interakciji sa slobodnim elektronima, elektromagnetsko zračenje ne djeluje kao valovi, nego kao da se sastoji od roja malih, nedjeljivih zrnaca energije, od kojih svako zauzima vrlo mali dio prostora. Ta sićušna “zrnca” elektromagnetske energije Einstein je nazvao fotoni” Paar: 47; (vidi: Slika 10). Einsteinova teorija fotona potvrdila je Planckovu hipotezu da atomi mogu apsorbirati i emitirati samo određene količine ili možda bolje reći pakete energije, a energija tih paketa (kvantâ) dobivala se Planckovom formulom.



Slika 10

Postoji još jedan eksperiment koji je također pokazao nužnost opisanja svjetlosti pomoću kvantâ energije, a dogodio se osamnaest godina kasnije. Riječ je o eksperimentu s X-zrakama koji je izvodio američki fizičar Arthur H. Compton 1922. godine. On je, propuštajući X-zrake kroz tanke slojeve materije, otkrio (slično kao i Rutherford s α -česticama) da valovi materije u velikom broju slučajeva prolaze kroz tvar, a u manjem broju skreću; čak je moguće da budu i odbijeni. Pritom je opazio da se valna duljina λ odbijenih i reflektiranih zraka povećava. Zamislite da vam se pred ogledalom vaša zelena majica pokaže kao crvena. Slična stvar događa se sa X-zrakama. Promjena valne duljine

odbijenih zraka može se protumačiti jedino ako pretpostavimo da se kvanti svjetlosti sudaraju s elektronima. Prilikom sudara, kvant svjetlosti prenosi nešto od svog impulsa i energije na elektron, a gubitak impulsa rezultirat će smanjenjem frekvencije tj. povećanjem valne duljine. Spomenuli smo kako je Planck otkrio da atomi mogu apsorbirati i emitirati samo određenu količinu zračenja. Pitamo li se stoga zašto se ne bi moglo dogoditi da nam se zelena majica u ogledalu pokaže kao crvena, odgovor će biti taj da “zeleni kvanti” očito nisu ona određena količina energije koju bi atom mogao apsorbirati. “Zeleni kvanti” tako će se reflektirati od zrcala ne mijenjajući svoju valnu duljinu (vidi: Ponomarjov: 144-146).

*Autorski
tekstovi*

Teza o fotonima nije bila odmah prihvaćena, što pokazuje i činjenica da je Einsteinu za taj rad Nobelova nagrada uručena tek 1921. godine.⁹ Usprkos nepovjerljivosti mnogih fizičara, nije se mogao izbjeći osjećaj da fizici, kakvu su je dotad poznavali, izmiče tlo pod nogama. Osim što je otkriveno da u atomskom svijetu postoji moment diskontinuiteta koji je možda jedan univerzalan zakon primjenjiv na sve atomske pojave (simboliziran Planckovom konstantom h), fizičari su bili još jednom suočeni s problemom prave naravi svjetlosti. Ovaj put situacija je bila još zamršenija zato što su postojali precizno izvedeni eksperimenti koji su sami za sebe mogli tvrditi da prikazuju pravu narav svjetlosti. Ako je svjetlost val, onda su fotoelektrični i Comptonov efekt nešto što moramo zanemariti. Ako tvrdimo da je svjetlost roj čestica, kako onda objasniti potpuni ogib svjetlosti oko neke zapreke ili interferenciju svjetlosti? Kvantna se teorija u dvadeset godina nakon Einsteinovih otkrića kretala tako da je za svaki korak unaprijed morala poduzeti dva unazad, sve dok konačno nije ponuđeno prvo cjelovito tumačenje kvantne mehanike danas poznato kao Kopenhagensko tumačenje. Jedan od glavnih utemeljitelja takvog tumačenja, kao i jedan od najzaslužnijih fizičara za razvoj kvantne teorije uopće, bio je danski fizičar Niels Bohr.

⁹ Einstein je iste godine (1905) objavio još dva rada, jedan o teoriji relativnosti, drugi o Brownovom gibanju o kojem je već bilo riječi u ovome radu.

6. Niels Bohr: svjetlo u tami

Fizika i filozofija

U današnje vrijeme teško je reći da je stabilnost atoma nešto što predstavlja izvor fascinacije za nekoga tko bi se nad tim fenomenom zamislio. Teško je zato opisati koliko su fizičari na početku 20. stoljeća time bili fascinirani. Prilikom prvoga susreta Nielsa Bohra i Wernera Heisenberga, Bohr opisuje Heisenbergu kako stabilnost atoma za njega predstavlja pravo čudo. To da nakon silnih promjena atom željeza uvijek ostaje atom željeza, da se uvijek pojavljuju ista spajanja, isti kristali, iste kemijske veze, pokazuje da u prirodi postoji stalna tendencija stvaranja određenih oblika. Zamislimo li atom kao kakav planetarni sistem, prema klasičnoj mehanici takvu će stabilnost jednostavno biti nemoguće opisati (Hajzenberg 1972: 76). Već je i Heisenbergu bilo jasno da u atomskom svijetu moraju vladati zakoni i sile potpuno različiti od onih koji su nam poznati iz klasične fizike. Niels Bohr je kao i Einstein iskoristio Planckove teze da bi došao do odgovora koji su, kao i kod većine pronalazača velikih otkrića, u njegovom umu već bili prisutni.

Spomenuli smo da je Ruthefordovim modelom atoma bilo nemoguće objasniti njegovu stabilnost; stoga si Bohr uzima u zadatak rješavanje te zagonetke. Bohrov model atoma predstavljao je spoj klasične mehanike i hipoteze o kvantima. Krenuo je od najjednostavnije pretpostavke da se elektroni kreću po kružnicama oko atomske jezgre. Pretpostavio je da su elektron i jezgra vezani električnim silama koje su opisane Maxwellovim jednadžbama te da su masa i naboj elektrona određeni električkim mjerenjima, ali (!) da gibanje elektrona u atomu ne mora poštivati Maxwellovu elektrodinamiku (Ponomarjov: 67). Koje je bilo Bohrovo rješenje? Za zornu predodžbu neka nam posluži atom vodika koji ima samo jedan elektron. Atom vodika nalazi se u svom stabilnom stanju sve dok ga vanjski utjecaji ne prisile na promjenu. Bohr je izračunao radijus najmanje kružnice u kojoj se elektron može gibati. Kada se elektron nalazi u toj kružnici, kažemo da se atom nalazi u stabilnom stanju. U skladu s Planckovom teorijom prema kojoj atomi mogu apsorbirati samo određene kvante energije, Bohr je došao do predodžbe o stacionarnim stanjima atoma.¹⁰ Ako atom može primiti određenu količinu energije, to znači da on može biti samo u određenim stanjima. Na atom ne djeluje bilo kakvo djelovanje, već samo određeni paket tj. kvant. Kada atom “upije” jedan kvant, to uzrokuje izlijetanje

elektrona iz najmanje kružnice i on preskoči u neku drugu kružnicu tj. orbitu. Nadalje, Bohr je pomoću Planckove konstante izračunao da u atomu ne može postojati neprekidan i beskonačan niz mogućih orbita, već točno određene, diskretne razine i nikakve druge nisu moguće. Stacionarna stanja tako simbolizira određen broj orbita u koje elektron vodika “ulijeće” i, tamo kružeći, ne zrači energiju – o tome govori Bohrov prvi postulat (Ponomarjov: 67). Sada kada smo objasnili kako prema Bohru atom “upija” određenu količinu energije, moramo izložiti i kako atom emitira energiju. Rekli smo da elektron upijanjem određenih paketa energije skače u više orbite koje sada možemo označiti i kao energetske razine. Svaki atom nužno teži stanju najmanje energije tj. stabilnom stanju i zato će se pobuđeni elektron spontano vratiti u svoju prvobitnu orbitu. Kada se to dogodi, dolazi do zračenja koje je jednako energiji $h\nu$ koju je atom i apsorbirao.¹¹

Sjetimo li se Comptonovog efekta i pitanja zašto nam se zelena majica u ogledalu nikada ne prikaže crvenom, sada možemo dati precizniji odgovor: zato što “zeleni kvanti” ne nose dovoljnu količinu energije da bi izbacili elektrone u ogledalu iz njihovih orbita. Bohr je pronašao odgovor na pitanje o stabilnosti atoma pokazavši da na atome ne može utjecati bilo kakvo zračenje te da svaki atom teži povratku u svoje prvobitno stanje.

Bohrov model bio je teoretski model atoma i zato je bilo fascinantno što se zaista pokazao točnim i pri empirijskoj provjeri. Tako je pomoću Bohrovog modela atoma opisan linijski spektar što ga emitira atom vodika. Ako zamislimo energijska stanja atoma vodika kao stepenice koje ćemo označiti s $E_1, E_2, E_3, E_4, \dots, E_n$ te kažemo da će elektron skakanjem s E_4 na E_1 emitirati svjetlost frekvencije koju ćemo dobiti izračunavši je na način $E_4 - E_1 = E_3$, time ćemo dobiti točan proračun svih linija u linijskom spektru atoma vodika (Paar: 64). Osim toga, Bohr je pomoću svog modela atoma uspio opisati temeljni zakon kemijske periodičnosti što ga je otkrio Mendeljejev, opisavši način na koji elektroni popunjavaju atomske ljuske te zašto određeni atomi ulaze u određenu vrstu kemijskog spoja. Usprkos svim postignućima u području atomistike, Bohrov atom nije bilo lako prihvatiti. I dalje nije bilo jasno zašto atom ne zrači

¹⁰ Stacionarna stanja možemo nazvati i energijskim stanjima atoma zato što prelazak elektrona u više orbite simbolizira prelazak atoma u viša energetska stanja.

¹¹ Da bi atom zračio energiju, bitno je samo da elektron skače s više na nižu razinu, ne treba se nužno vratiti u svoje prvobitno stanje.

energiju ako se giba oko jezgre. Mnogi, poput Einsteina, pitali su se “što radi atom kada iz jednog stacionarnog stanja emitiranjem svetlosti prelazi u drugo” (Hajzenberg 1972: 117). Heisenberg, kojem je to pitanje bilo upućeno, odgovara Einsteinu da još ne znamo kako bismo trebali govoriti o atomima; jasno je jedino da se pojmovi klasične fizike više ne mogu jednoznačno primjenjivati na pojave u kvantnom svijetu. Bohrov model atoma bio je posljednji koji je imao veze s idejama iz svakidašnjeg života, makar je Bohr svojim kvantizacijama atomnih stanja to uvelike otežao. Daljnji razvoj kvantne fizike zapadao je u sve više poteškoća. Postupno su se otkrivala nova svojstva atoma koja se nisu mogla opisati drugačije do matematičkim jednadžbama. Iz tog razloga Ponomarjov tvrdi da je u svijetu znanstvenika došlo do krize izazvane empirijskim podacima koji se nisu nikako mogli spojiti te sukoba između principa kvantne teorije i ostataka klasičnih pojmova koji se nisu mogli odbaciti zato što se nije ponudilo ništa konkretno što bi ih moglo zamijeniti. Počelo je traganje za općim principom, a kao odgovor pojavit će se 1925. godine kvantna mehanika (Ponomarjov: 77). Prije tog otkrića doći će do usijanja s problemom valno-čestičnog dualizma i tezama mladog francuskog fizičara Louisa de Broglia.

7. Valovi materije

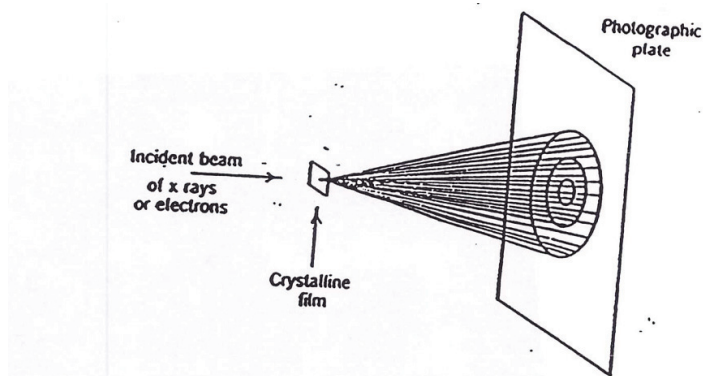
Louis de Broglie bio je rodom iz plemićke francuske obitelji. Rodio se 1892. Godine, a svijet kvantne fizike otkrio mu je stariji brat koji je radio kao tajnik na prvom Solvay kongresu¹² i koji mu je uvijek prilikom razgovora naglašavao “značaj i neosporno postojanje dvojnog aspekta vala i čestice”. Kako John Gribbin ističe, “bila je to ideja za koju je vrijeme sazrelo i Luj d’Brolji je imao tu sreću da bude prisutan kada je konceptualno jednostavan delič intuicije mogao da transformiše teoriju fizike”. (Gribin: 98). Kamo je intuicija vodila de Broglia? On je razmišljao da bismo, kao što gibanje svjetlosti opisujemo rojem čestica, mogli na jednak način prikazati i gibanje materije

¹² Solvay kongresi bili su tada mjesto okupljanja vodećih fizičara na kojima bi raspravljali o najvažnijim pitanjima u fizici. Nazvani

su po bogatom belgijskom kemičaru, industrijalcu i filantropu Ernestu Solvayu.

gibanjem njoj pripadnog vala. Kao što se foton ne može odvojiti od vala svjetlosti, tako ne može ni materija od vlastitog “vala materije”. Kako de Broglie sam tvrdi: “Sva nastojanja fizičara bila su usmjerena na to da materiju svedu na prostornu cjelinu korpuskula. Ali ne moramo li zaključiti da su – kao što se foton ne može odvojiti od vala koji je s njime povezan – i korpuskule materije uvijek povezane s nekim valom?” (Heisenberg 1961: 117) Louis de Broglie nije bez razloga pretpostavio valove materije, već je pomoću njih namjeravao objasniti stabilnost atoma. Tako su u njegovoj predodžbi stacionarne orbite prikazane kao *stacionarni valovi*. Stacionarni valovi su oni valovi “čije je širenje... ograničeno na dio prostora čije dimenzije odgovaraju dimenzijama valne dužine. To vrijedi za elektrone u unutrašnjosti atoma.” Tako Bohrove orbite u de Broglievu modelu možemo zamisliti kao žice oblikovane u prsten kroz koju konstantno protječe “elektronski val”. “Teorija pokazuje da ovi stacionarni valovi mogu imati samo izvjesne tačno definirane valne dužine kojima odgovara izvjesna tačno definirana energija pripadajućeg elektrona, naime, ona tačno definirana stanja energije koja odgovaraju kvantnim stanjima kretanja što ih je Bohr uveo u svoju teoriju.” Tako de Broglie objašnjava “do sad vrlo tajnovitu činjenicu da su ta kvantna kretanja jedino moguća kretanja elektrona zatvorenog u atomu.” (Heisenberg: 118). Na pitanje kako bi se njegova teza mogla provjeriti, de Broglie je imao spreman odgovor. Jednako kao što ćemo dobiti difrakciju svjetlosti jedino ako je propustimo kroz otvor koji je jednak ili manji od valne dužine njezinog vala, tako bi u slučaju da želimo vidjeti postoji li difrakcija elektrona morali i njih propuštati kroz izuzetno male razmake, upravo onakve kakvi su razmaci među atomima u kristalu. Davisason i Germer (SAD) su istovremeno kad i G.P. Thomson (sin čuvenog J.J. Thomsona) te njegov student Alexander Reid (Engleska), potvrdili 1927. godine de Broglievu tezu. Otkrilo se da će elektroni ako ih propuštamo kroz kristalnu rešetku zaista difraktirati. (vidi Sliku 11 i 12). Četiri godine koliko je prošlo otkad je de Broglie objavio svoj rad, pa sve do njegove eksperimentalne potvrde, nisu nikako prošle u samom iščekivanju. U međuvremenu svijet fizike pamti rođenje kvantne (matrične) mehanike i stroge (valne) kvantne mehanike atoma. Za prvu najzaslužnijim držimo Wernera Heisenberga, a za drugu nesumnjivo sve zasluge snosi Erwin Schrödinger.

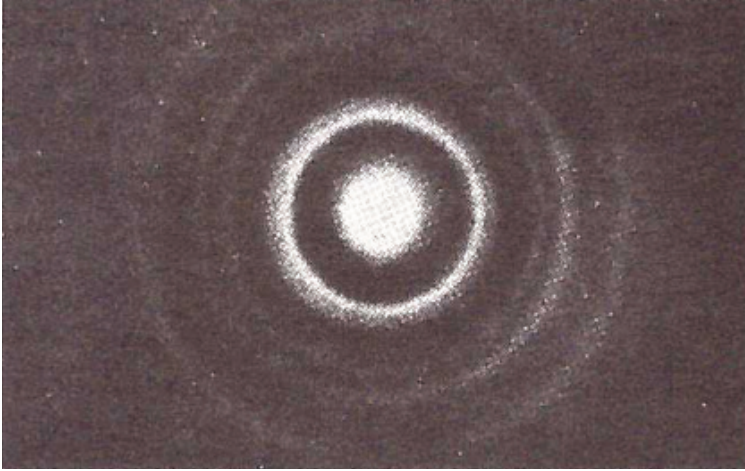
*Autorski
tekstovi*



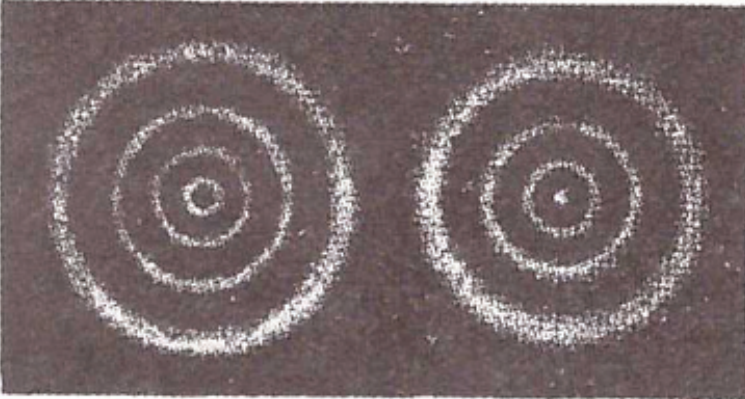
Slika 11
Difrakcija elektrona propuštenih kroz tanak sloj kristala

8. Matrična i valna mehanika

Werner Heisenberg na Bohrov se poziv seli iz Göttingena u Kopenhagen gdje sudjeluje u žustrim raspravama ljudi okupljenih oko Nielsa Bohra. U središtu rasprava, kako Ponomarjov tvrdi, bila su pitanja o elektronima i njihovom "nepoštivanju" zakona elektrodinamike te pitanja o njihovom gibanju. Heisenberg je ponudio konačno rješenje prilikom boravka na arhipelagu Heligoland gdje se liječio od peludne groznice. Heisenbergovo veliko otkriće bilo je u tome što je pokazao da ne postoji takvo što poput "gibanja" elektrona. Ispravan način govora o elektronu u obzir uzima samo one veličine koje se mogu izravno mjeriti. Tako pitanja poput: "što se s elektronom zbiva prilikom skoka iz višeg u niže energetske stanje?" ili "gdje bi elektron mogao biti dok je "između" dviju orbita?" više nisu ispravna. Razlog za takvo mišljenje Heisenberg je nalazio u otkriću da su načini na koje mi zamišljamo atom zapravo analogije s načinom na koji se predmeti kreću u našem svakodnevnom životu. Prema Heisenbergu, mi ne znamo kako se elektron "giba" u atomu, pojam gibanja kao takav u atomskom svijetu nije nešto o čemu mi možemo išta znati. Stoga umjesto da se bavi prijelazom atoma iz jednog stanja u drugo, Heisenberg će govoriti samo o parovima stanja te zaključiti da ako



*Autorski
tekstovi*



Slika 12

Difrakciju elektrona koji su prošli kroz listić zlata (gore) usporedi s difrakcijom zraka svjetlosti kroz malu rupicu (dolje)

poznamo sve moguće parove stanja u kojima se atom može nalaziti, tada možemo reći da potpuno poznamo stanje nekog atoma. Kako bi to izgledalo? Tako da bi za svako stanje atoma imali određen broj, recimo a_{nk} gdje bi n označavalo početno stanje a k konačno stanje atoma (Ponomarjov: 109-114). Recimo da postoji neki atomski sustav

s moguće četiri stacionarne orbite, tada bi potpuno poznavanje tog sustava izgledalo ovako:

*Fizika i
filozofija*

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}$$

gdje bi recimo a_{42} značio prijelaz između stanja 4 i 2. (Supek: 182). Kako možemo vidjeti iz ovog primjera, Heisenberg nije ostao samo na teoriji. Najvažniji dio njegovog otkrića leži u tome što je svoje ideje uspio izraziti matematički. Uzbuđenje koje je ga je u tom trenutku obuzelo Heisenberg opisuje riječima: “više nisam mogao da sumnjam u matematičku neprotivrečljivost i zaokruženost time nagoveštene kvantne mehanike. U prvom trenutku bio sam sasvim preplašen. Imao sam osećanje da kroz površinu atomskih pojava gledam u neko dno s čudnom unutarnjom lepotom što leži duboko pod njom, i gotovo me je uhvatila vrtoglavica pri pomisli da se sada treba zabaviti tim obiljem matematičkih struktura koje je priroda, tamo dole, razastrla preda mnom.” (Hajzenberg 1972: 108). Kako se kasnije pokazalo zahvaljujući Maxu Bornu, Heisenberg je već imao u matematici razrađene operacije koje su odgovarale njegovim proračunima. To su bile takozvane matrice, računске operacije za koje je specifično da rezultat ovisi o redoslijedu kojim ih množimo. Naprimjer, produkt: jasno se razlikuje od “obrnutog produkta”

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

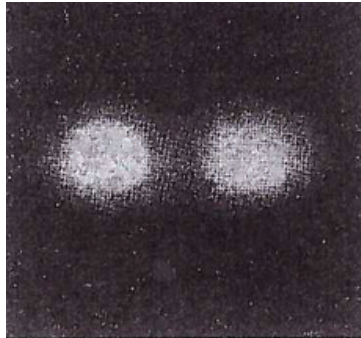
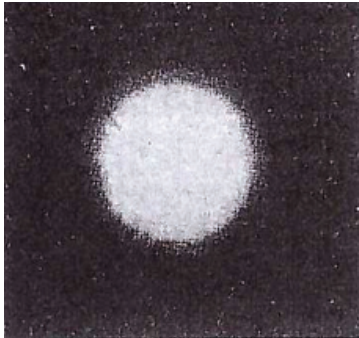
*Autorski
tekstovi*

Podudarnost između svojstava matrica i podrobnosti u gibanju elektrona na Bornu i Heisenberga ostavljala je dojam da se tu zaista radi o nečem stvarnom. Kako Heisenberg jednom prilikom odgovara Einsteinu na njegovo pitanje o tome zašto on tako čvrsto vjeruje u svoju teoriju: “Verujem, kao i vi, da jednostavnost prirodnih zakona ima objektivni karakter, da nije u pitanju samo ekonomija mišljenja. Kada vas priroda navede na matematičke obrasce velike jednostavnosti i ljepote ... na obrasce koje dotad još nitko nije izmislio, ne možete ne poverovati da su “istiniti”, to jest da predstavljaju pravu crtu prirode ... Budući da sami od sebe nikada ne biste došli na te obrasce, da nam ih je tek priroda predočila, oni pripadaju i samoj stvarnosti, a ne samo našim mislima o stvarnosti” (Hajzenberg 1972: 118). Kako ovaj citat pokazuje, Heisenberg je vjerovao da postoji korespondencija između matematičkih jednadžbi i atomske zbiljnosti te je odatle crpio snagu i uvjerenje koje mu je pomoglo ustrajati na vlastitim idejama koje se tada nisu mogle usporediti ni sa čime što se u fizici dotad napravilo. Na dan kada je ustanovljeno da ne možemo definirati pojam gibanja, Leonid Ponomarjov gleda kao na rođendan *kvantne mehanike kao znanosti o gibanju elektrona u atomu* (Ponomarjov: 109).

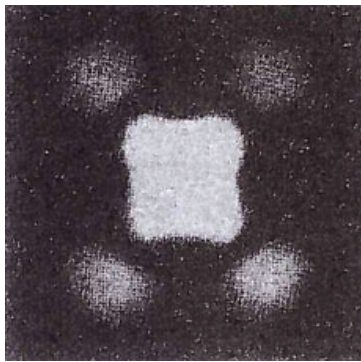
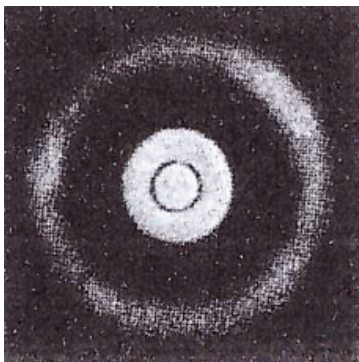
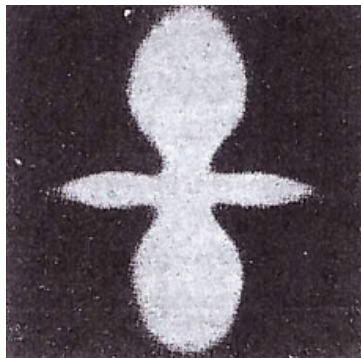
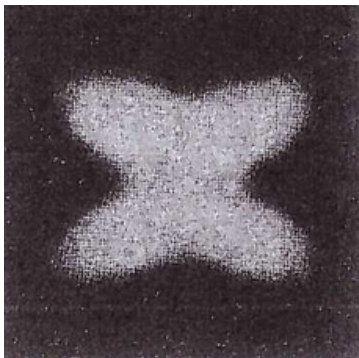
Ubrzo nakon tog rođendana proslavio se još jedan fizičar, Erwin Schrödinger. I on je svijetu fizike ponudio jednadžbe čija je jednostavnost i pragmatičnost izazivala divljenje. Erwin Schrödinger bio je jedinstvena pojava među fizičarima jer je do svojih otkrića došao tek u 39. godini života, a dotad je radio kao profesor na Sveučilištu u Zürichu koje u to doba nije bilo poznato kao mjesto velikih zbivanja. Schrödinger je čuo za pozitivnu kritiku Alberta Einsteina na de Brogliev rad, što je u ono vrijeme bilo dovoljno za poticanje bilo čijeg interesa. On se potpuno složio s de Broglievim tezama te je na osnovi njegovih elektronskih valova 1926. godine zasnovao strogu kvantnu mehaniku atoma.

Schrödinger je izračunao pomoću de Broglievih i Bohrovih formula da polumjer atoma iznosi otprilike jednu šestinu valne duljine elektrona. To je značilo da bi elektron promatran kao čestica bio prevelik da bi se gibao u atomu, naime on bi se morao gibati u nečemu što je manje od njega. Stoga je Schrödinger zaključio da “elektroni u atomu ne postoje kao čestice nego kao valovi.” Priroda tih elektrona nije u početku bila jasna ni samom Schrödingeru, ali zato mu je bilo sasvim jasno “da gibanje tih elektronskih valova, bez obzira na njihovu prirodu, mora poštovati *valnu jednadžbu*” (Ponomarjov: 126), čiju su prednost pred Heisenbergovom matričnom mehanikom fizičari brzo uočili. Ovdje neće biti riječi o Schrödingerovoj jednadžbi, već o njegovom viđenju atoma. Prema tom modelu, atomi nemaju određeni oblik, već ga stalno mijenjaju ovisno o tome jesu li pobuđeni ili ne. Elektroni se ne nalaze na određenom mjestu, nego su “razmazani” oko jezgre; električne sile atomskih jezgri zgušnjavaju elektronske valove u sitna atomska područja nalik na oblake (vidi sliku 13). Logično je pitanje kako možemo govoriti o stabilnosti nečega što nema oblik. Prema Ponomarjovu, jednako lako kao što možemo govoriti o stabilnosti Zemljine putanje a da ne kažemo da je itko nosi na leđima: “Tajna je... u gibanju i nepromjenljivosti dinamičkih zakona koji vrijede za to gibanje” (Ponomarjov: 141). Prema Schrödingerovom modelu, atomi koji mijenjaju svoj oblik nemaju više momente diskontinuiranosti, oni mijenjaju svoj oblik na sličan način kao što violinska žica mijenja svoju vibraciju prilikom prelaska s jedne note na drugu (Gribin: 127). Schrödingera su kod kvantne teorije najviše smetali kvantni skokovi, stoga ne iznenađuje njegova izjava nakon višednevnih iscrpljujućih razgovora s Bohrom i nakon što je sam shvatio da njegova valna mehanika i ona matrična daju iste rezultate: “Ako ipak treba da se ostane pri tim prokletim kvantnim skokovima, onda žalim što sam se uopšte ikad petljao (s) kvantnom teorijom.” (Hajzenberg: 128).

Podudarnosti između valnih i matričnih jednadžbi dovele su do općenitog zaključka o zornim predodžbama atoma: u kvantnoj mehanici zorne predodžbe atoma nisu nužne, a pitanje je i koliko su moguće. Dovoljno je da se shvate jednadžbe kvantne mehanike i pravila njihove upotrebe. Atom stoga najbolje predstavlja *sustav diferencijalnih jednadžbi* iz čega proizlazi da kvantnu mehaniku možemo definirati kao “matematičku shemu koja nam omogućuje



*Atorski
tekstovi*



Slika 13
Trodimenzionalni prikaz Schrödingerovih valova

proračunavanje fizički mjerljivih svojstava atomskih pojava.” (Ponomarjov: 144). Prema Heisenbergu, atome u modernoj fizici predstavljaju matematički oblici¹³ koji predstavljaju rješenja “nepromjenjivog zakona gibanja za tvar.” Heisenberg nam daje dobar primjer kako bi to izgledalo u primjeni: “kada današnja teorija polja tvrdi da se proton prikazuje određenim svojstvenim rješenjima osnovne jednadžbe tvari, onda to znači da bi se iz tog rješenja matematički mogla izvesti sva svojstva protona i da bi se u svakoj pojedinosti mogla dokazati ispravnost rješenja pomoću eksperimenta.” (Heisenberg 1997: 57).

9. Kopenhagensko tumačenje kvantne teorije

Prije nego se upustimo u zanimljiv svijet atomskih pojava kako nam ih predstavljaju protagonisti tumačenja kvantne teorije, potrebno je spomenuti u kojem se pojmu “umirila” valno-čestična dualnost elektrona. Max Born pretpostavio je da su elektronski valovi zapravo valovi *vjerojatnosti*. Što to znači? To znači da se elektroni, jednom kad ih usmjerimo prema nekoj fotografskoj ploči, ponašaju slično kao i molekule vode u vodenom valu, samo što u slučaju elektrona taj val nije moguće opaziti. Svaka pojedina molekula vode giba se na svoj određeni način, no sve su zajedno nošene jednim valom koji će ih sve razmazati po nekom zidu (recimo da smo ga mi postavili). Takvi su i elektroni, svaki od njih kreće se u atomu na svoj poseban način, no svi oni zajedno ponašaju se kao da ih nosi val. Samo Bornov val nije materijalan kakvim su ga zamišljali Schrödinger i de Broglie nego je to val vjerojatnosti, val koji nam opisuje “gibanje pojedinačnog elektrona, posebno vjerojatnost njegovog pogađanja u danu točku na fotografskoj ploči.” Zamislite da se elektron kada ga ispalimo iz elektronskog topa pretvori u jedan čudan val koji će prilikom sudara s fotografskom pločom ostaviti trag na samo jednom mjestu kao što bi to i čestica učinila. Pokazalo se da je to jedini način za opisivanje gibanja elektronâ, čak i kada se oni nalaze u atomu. Kvantna je mehanika pojmom vjerojatnosti dobila svoju dosljednost. "Pokazalo se da je taj po-

¹³ Kako Heisenberg tvrdi, do sada je već predložen osnovni oblik za tu osnovnu jednadžbu tvari. Tu se “radi o nelinearnoj valnoj jednadžbi za operator polja koji može vrijediti kao matematički predstavnik tvari” (1997: 55).

jam jednakovrijedan pojmu pravilnosti zato što kvantna mehanika svoju pravilnost proračunava – ali sa stopostotnom sigurnošću – na način da nam pokaže kamo će određeni elektron vjerojatno završiti. Naravno, ona će to moći tek nakon što je prethodno izvršila velik broj mjerenja s istim kvantnim objektima. Stoga ćemo i reći da ako treba izračunati točan položaj gdje će se naći pojedini elektron, onda kvantna mehanika ne daje potpun odgovor. No ako govorimo o tome kamo će cijeli snop elektrona završiti, tada će kvantna mehanika pokazati da se njezine jednadžbe ne daju nimalo upotpuniti jer su točne do u detalj (Ponomarjov, poglavlje: “Uzročnost i slučajnost, vjerojatnost i sigurnost”: 175-178).

*Autorski
tekstovi*

9.1. Princip neodređenosti

Sada je prilika da se u osnovnim crtama iznesu Heisebergova i Bohrova tumačenja kvantne teorije koja će kasnije postati poznata kao Kopenhagensko tumačenje. Počinjemo s Heisenbergovim *principom neodređenosti* za koji se pokazalo da vrijedi za cjelokupni atomski svijet i najkraće bi se mogao opisati tvrdnjom da nije moguće u isto vrijeme izmjeriti brzinu kretanja i položaj elektrona. Zatim ćemo nastojati objasniti kako je to pomoglo Bohru da osmisli svoj *princip komplementarnosti*, princip koji stavlja temeljnu važnost na činjenicu da je do potpunog opisa prirode moguće doći samo ako u opis uključimo međusobno isključive opise. Bohrovi stavovi jako su zanimljivi i od neprocjenjive su važnosti za uočavanje spoznajnoteorijskih posljedica nastalih razvojem kvantne mehanike i iz tog je razloga Bohru posvećen najveći dio teksta.

U čemu se sastojalo Heisenbergovo veliko otkriće? Njega je mučilo pitanje što točno možemo putem eksperimenata opažati i pritom mu se sam čin mjerenja učinio kao nešto na što se dosad u cijeloj povijesti fizike nije obraćalo dovoljno pažnje. U svakom istraživanju potrebno je da istraživač stupi u interakciju sa sustavom koji mjeri. Tako ćemo, ako nas zanima točan položaj Mjeseca, morati odbijati radare od njega, čime djelujemo na Mjesec, no zbog njegove mase naš će utjecaj biti zanemariv. Osim toga, prema zakonima klasične fizike mi bismo mogli, ako poznamo trenutno stanje nekog tijela, u potpunosti predvidjeti njegov položaj u bilo kojem zadanom budućem vremenu. Logična je onda bila pretpostavka klasičnih fizičara da je jednak način mjerenja

moguće postići i u atomskom svijetu. Dvije su pretpostavke bile ključne za klasičnu mehaniku – ona o zanemarivu utjecaju promatrača na promatrani objekt te pretpostavka o determiniranosti cjelokupnog univerzuma – i obje su se pokazale neodrživima nakon Heisenbergovog otkrića.

Heisenberg se pitao može li se u kvantnoj mehanici prikazati situacija u kojoj se elektron otprilike – to jest s izvjesnom netočnošću – nalazi na nekom mjestu i pri tome ima otprilike – to jest opet s izvjesnom netočnošću – neku unaprijed datu brzinu te mogu li se netočnosti smanjiti toliko da se pritom ne dospije u teškoće. (Hajzenberg 1972: 131). Odgovor je bio da ne možemo. Heisenberg je smislio jedan misaoni eksperiment koji dobro ilustrira navedenu nemogućnost da se u isto vrijeme izmjeri položaj i impuls. Zamislimo jedan mikroskop koji bi mogao precizno opažati elektrone. Mikroskop s tako visokom razlučivošću morao bi upotrebljavati gama-zrake zato što je njihova valna duljina manja od veličine atoma. Da bismo saznali gdje se elektron točno nalazi, nužno je da barem jedan kvant svjetlosti pogodi elektron. Kada se to dogodi, mi ćemo sa sigurnošću znati da je elektron zaista bio na određenom mjestu, ali će nam njegovo daljnje kretanje ostati potpuna nepoznanica zato što će isti kvant kojim smo locirali položaj elektrona biti uzrokom promjene u njegovom kretanju (Heisenberg 1997: 35). Ako bismo htjeli sada opet saznati gdje se elektron nalazi, morali bismo izvršiti novo mjerenje.¹⁴ Iz ovog primjera možemo vidjeti zašto je pretpostavka klasične mehanike o determiniranosti cjelokupnog zbivanja neodrživa. Rekli smo da bi se upravo iz poznavanja svih početnih parametara (kada bi to bilo moguće) mogli izvesti zaključci o bilo kojem trenutku u budućnosti, a ono čemu nas je Heisenberg poučio jest upravo to da mi sadašnjost nikada ne možemo poznavati u svim njenim detaljima. Razlog tomu vidimo iz relacija neodređenosti.

Kakvu onda ulogu možemo reći da igra motrenje u kvantnoj mehanici? Heisenbergov je odgovor jednoznačan: motrenje se poistovjećuje s “događa se” (Heisenberg 1997: 41). Činom motrenja mi uzrokuje promjenu u sustavu koji mjerimo. Na razini atoma sve se promjene događaju na kvantnoj razini tj. promjene su moguće jedino na razini nedjeljivog kvanta djelovanja. To znači da nije moguće kontinuirano,

¹⁴ Bitno je pritom imati na umu ono što je već dva mjerenja mi ne možemo znati što se s Heisenberg ustanovio prilikom “osnivanja” elektronom događalo. matrične mehanike, a tiče se toga da između

već samo diskretno djelovanje, tj. djelovanje s određenom količinom energije (kvant). Kada uposlamo jednu takvu količinu energije (u primjeru s mikroskopom bio je to kvant svjetlosti) tada smo mi uzrokom nove kvantne pojave, tj. nove diskontinuirane promjene u svijetu atoma. Nije više moguće pretpostaviti istraživača kao subjekt odvojen od objekta koji promatra. Subjekt i objekt povezani su pomoću instrumenta (mikroskop) koji se nalazi u međudjelovanju s mikroskopskim objektom (atom s elektronima) koji se promatra. Bitno je naglasiti da bez našeg čina mjerenja putem instrumenata sustav nikada ne bi imao ta svojstva koja mu mi pridajemo. Tako je Heisenberg išao dotle da je rekao kako zato ne možemo ni reći da uopće postoji takva stvar kao što je elektron koji bi imao položaj i impuls u isto vrijeme. "Prema Heisenbergu ne mogu se atomski procesi shvatiti kao objektivni u prostoru i vremenu, nego atomski sistem predstavlja sklop *mogućnosti*, koje će se, po statističkom zakonu, ostvariti u mjerenjima" (Supek: 191).

Heisenberg je svojim zapažanjima uspio dati matematički oblik i on bi prevedeno u riječi izgledao otprilike ovako: neodređenost položaja zajedno s neodređenošću impulsa nikada ne može biti manja od Planckove konstante.¹⁵ Uloga Planckove konstante od presudne je važnosti bila Bohru i Heisenbergu. Prema Srđanu Lelasu, Heisenberga je do relacija neodređenosti dovela njegova analiza granice između objekta i instrumenta i toga što se na njoj zbiva. Heisenberg je došao do zaključka da ako se ni u kakvoj interakciji (na razini atoma) ne može razmijeniti manja količina djelovanja od one što ju propisuje Planckova konstanta, onda će taj iznos biti ona minimalna količina smetnje koja se nikako ne da odstraniti iz mjerenja. To je granica koja odvaja instrument pa tako i istraživački subjekt od objekta i ona za Heisenberga predstavlja nepremostivu smetnju u mjerenjima. Relacije neodređenosti predstavljaju mjeru te smetnje (Lelas 1973, poglavlje: "Relacije neodređenosti": 70-78).

Još jednu činjenicu bitno je naglasiti, a tiče se instrumenata kojima istražujemo atomne pojave. Mnogi su Heisenbergovu tvrdnju uzeli kao uvredu i pokušali naći način na koji bi usavršili instrumente tako da bi mogli izmjeriti položaj i impuls čestice u isto vrijeme. No takvi se zaključci nisu mogli izvesti iz Heisenbergovih relacija neodređenosti

¹⁵ Slavna Planckova konstanta doživjela je stanovite promjene pa se ne piše svugdje jednostavno sa h , već joj se pridaju određene veličine. Za ovu razinu uvida u kvantnu teoriju smatram da to nije potrebno detaljnije opisivati.

zato što nije problem u instrumentima, već u naravi atomnog svijeta koji je takav da će sve više pokazivati neodređenost u količini gibanja što mu mi više nastojimo izmjeriti položaj te čiji će položaj biti sve više neodređen što mi više želimo izmjeriti impuls. Heisenberg nije rekao da je nemoguće odrediti impuls ili položaj elektrona, već samo to da nije moguće simultano odrediti oboje! Za Heisenberga je Planckova konstanta predstavljala onu *minimalnu granicu smetnje* koju nije moguće kontrolirati pri mjerenju.

9.2. Niels Bohr: princip komplementarnosti

Na međunarodnom kongresu povodom stogodišnjice smrti Alessandra Volte, održanom 16. rujna 1927. godine u Comu, "Niels Bohr je podnio izvještaj pod naslovom *Postulat o kvantu i najnoviji razvoj teorije atoma*. On je sadržavao dosljedno izlaganje sustava i pojmova nove kvantne fizike, uvevši pojam komplementarnosti" (Ponomarjov: 187). Iako je sadržaj spomenutog izlaganja označio prekretnu točku, Bohr se nije zaustavio samo na jednom predavanju. On je tijekom cijele svoje znanstvene karijere nastojao dati što preciznije tumačenje rezultata u području kvantne fizike, kao i zasnovati teoriju koja će nam pomoći da sve rezultate teorijski objedinimo. Teorijski plodovi Bohrovog rada ne daju se sažeti samo u jedan princip pa će zato u ovom poglavlju biti iznijeta i neka druga Bohrova itekako relevantna stajališta. Tihomir Vukelja, predstojnik Zavoda za povijest, sociologiju i filozofiju znanosti na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu objavio je knjigu pod naslovom *Nesjedinljivo znanje: Bohrov doprinos filozofskoj teoriji spoznaje* u kojoj su detaljno objašnjeni Bohrovi spoznajnoteorijski nazori. U nastavku ovoga poglavlja oslanjamo se uglavnom na spomenutu knjigu.

Bohr se suočio s činjenicom da su u kvantnoj fizici istraživači putem eksperimenata uočili karakteristike atomnih objekata u koja, zbog točnosti i nedvojbenosti u pogledu dobivenih rezultata, nije moguće sumnjati. Posebnost otkrića u kvantnoj fizici leži u tome što svi dobiveni rezultati uzeti zajedno ne udovoljavaju zahtjevu za jednom jedinstvenom zornom predodžbom, kao ni zahtjevu za jedinstvenim tumačenjem atoma i atomnih pojava. Glavni problem bio je taj što kvantna fizika nije imala, za razliku od klasične, vlastiti pojmovni sustav na koji bi se

mogla u potpunosti osloniti prilikom opisivanja kvantnih pojava. Bohr se pitao kako je moguće udovoljiti nužnom cilju svake znanosti, onom objektivnosti, u takvoj grani znanosti kao što je kvantna fizika gdje iz dva različita eksperimenta dobivamo dva potpuno suprotna tumačenja promatrane pojave, npr. da se elektron ponaša kao val i kao čestica?

Mnogi su fizičari u tadašnje vrijeme ozbiljno razmatrali ideju da bi se za područje mikroskopskih zbivanja trebalo iznaći nove pojmove koji će nam omogućiti da rezultate tumačimo na nedvosmislen način. Niels Bohr toj se ideji oštro usprotivio. On je tvrdio da se mi kao istraživači nužno nalazimo “u svijetu” koji istražujemo te da smo istovremeno i sami dio prirode koju se toliko trudimo opisati. U našem svakodnevnom ophođenju s prirodom mi smo razvili pojmove koji nam omogućavaju da opišemo i nedvosmisleno priopćavamo naša svakodnevna iskustva. Jezik je tako ukorijenjen u našem odnosu spram prirode ili, možda bolje rečeno, on je odraz nastojanja da opišemo naša svakodnevna iskustva. Jezik klasične fizike služi se upravo takvim pojmovima koji su proizašli iz opisivanja našeg svakodnevnog iskustva poput: vrijeme, prostor, uzrok, posljedica, položaj, čestica, val, impuls itd. Kada bi se istim pojmovima koristili prilikom opisivanja rezultata u području kvantne fizike, neminovno bismo upali u proturječja. Zato je Bohr uveo ograničenja za primjenu takvih pojmova, a matematičku formulaciju za ta ograničenja našao je u Heisenbergovim relacijama neodređenosti. Ono što prema Bohru slijedi iz relacija neodređenosti između ostalog je i to da se pojmovima klasične fizike ipak moramo služiti, ali moramo uvijek biti svjesni ograničenosti njihove primjene. Primjena određenih pojmova prilikom opisivanja pojava automatski isključuje njihovu primjenu u drugim okolnostima, za primjer neka nam posluži opis svjetlosti koji proizlazi iz Youngova eksperimenta i onaj koji proizlazi iz fotoelektričnog efekta kako ga je opisao Einstein. Isto tako postoje i pokusi koji nedvojbeno pokazuju da je elektron val, a takvi su izvedeni nakon de Broglievih i Schrödingerovih otkrića. Postoje i oni koji pokazuju elektron u njegovoj putanji.¹⁶ Iz ovih primjera Bohr je shvatio da u različitim eksperimentima pomoću različitih instrumenata otkrivamo i različita svojstva promatranih objekata. “Prije Bohra svi su se slagali da je nezdruživost dvaju tipova instrumenata siguran znak da su

*Autorski
tekstovi*

¹⁶ Takvi se eksperimenti služe Wilsonovom kompleksan da bi ga autor teksta opisao. Za komorom čiji je način funkcioniranja pre- detaljnije informacije vidi Supek 1990.

nespojiva i svojstva koja se njima mjere.” (Ponomarjov: 155), dok je Bohr prvi tvrdio da je potpun opis jedino moguć samo ako u opis uključimo i ta prividno oprečna svojstva. Kažemo prividno zato što ona prema Bohru nisu suprotstavljena nego *komplementarna*. Tako elektron prema principu komplementarnosti nije val ili čestica, već je on u jednom slučaju val, a u drugome čestica. Vratiti ćemo se ovome problemu uskoro.

Mogli bismo sada postaviti pitanje o tome što zapravo mi zahvaljujući kvantnoj teoriji znamo o atomnim objektima. Ukoliko su svojstva promatranog objekta različita ovisno o tome na koji način pristupamo njihovom istraživanju, možemo li onda reći nešto o pravoj zbilji ili o pravoj naravi opažanih objekata. Prema Bohru mi to ne možemo. Jedino što možemo jest govoriti o ljudskom iskustvenom znanju.¹⁷ No ako to jest istina, ne čine li takve tvrdnje Bohra pristašom idealizma i nisu li njegove teze samo jedan pragmatičan način da se opišu kvantne pojave? Pokazalo se da je odgovor na oba postavljena pitanja nužno negativan. Razlog zašto Bohra ne možemo nazvati pristašom idealizma jest taj što Bohr zaista govori o stvarima kakve one jesu, npr. atom se zaista ponašao na takav i takav način i to što ga na osnovi njegovih ponašanja moramo opisivati oprečnim pojmovima ne znači da mi govorimo samo o tome kako se nama stvari čine. Ili, ako ne možemo uobličiti jednu jedinstvenu predodžbu atoma, to ne znači da se ne može govoriti o prirodi kakva zaista jest. Bitno je uočiti razliku između davanja ontoloških iskaza i iskustvenog znanja o pravoj zbilji prirode. Prvim se Bohr nije bavio i iz njegove teorije ne proizlaze zaključci o “pravoj” zbilji ili prirodi. Ali ponavljam, to ne znači da se o prirodi uopće ne može govoriti. Mi govorimo o našem iskustvenom znanju i ono se potpuno oslanja na načine na koje se priroda ponaša pod određenim okolnostima. Razlog zašto Bohrova teza nije samo pragmatičan oblik nošenja s poteškoćama jest taj što je komplementaran opis jedini mogući objektivni opis atomske zbilje. Bohr se pita kada mi uopće možemo reći da elektron ima određeni položaj ili kada možemo reći da ima određeni impuls. Odgovor će biti da pod jednim okolnostima možemo reći nešto o položaju, a pod drugim možemo reći nešto o impulsu. Spajanje tih dvaju iskaza nije pragmatičan način, već jedini mogući objektivni način govora o kvantnome svijetu (Vukelja 2004: 93-102).

¹⁷ Pod iskustvenim znanjem Bohr ne misli naprosto na “osjetilni doživljaj predmeta, već skup iskaza o tako doživljenom predmetu, skup iskaza kojima se izražava rezultat

nekovrsnoga motrenja istraživanoga predmeta, ono što o istraživanom predmetu možemo reći “na temelju iskustva” (Vukelja: 2004)

Na temelju gornjeg opisa možemo izvesti zaključak da postavljanje eksperimenta u suštini odgovara onome što se u spoznajnoj teoriji zove *spoznajnim pristupom* (Vukelja: 2004). O tome koja pitanja postavimo putem eksperimenta ovise i odgovori koje ćemo dobiti.

Heisenberg tu činjenicu dobro opisuje u svojim kasnijim predavanjima kada ističe kako atom ne može posjedovati nijednu od osobina koje mu pridajemo ako imati pojedinu osobinu razumijevamo u uobičajenom smislu. Ključan je pojam potencijalnosti. Atom je potencijalno mnogo toga, a svaki naš čin mjerenja kao da "tjera" atom da uobitilji jednu od niza mogućnosti" (Heisenberg 1998: 32). U Bohrovom tumačenju nema govora o svojstvima objekta po sebi, već smo primorani govoriti o *situacijskim* svojstvima objekata. Kvantna pojava nije očitovanje neovisnog ponašanja atomnog objekta, već je to situacijska pojava uzrokovana našom intervencijom u svijet atoma putem instrumenata. Stoga i ne možemo ništa reći o svojstvima atoma po sebi jer se onda ne bi poštivale relacije neodređenosti. Svako svojstvo atoma ovisno je o situaciji u kojoj ga promatramo tj. o načinu na koji smo postavili eksperiment. U području kvantne mehanike o situaciji govorimo kao o spoznajnoj situaciji, a eksperiment skupa s načinom na koji ga postavljamo nazivamo spoznajnim pristupom.¹⁸ Pojava i motrenje nerazdruživi su elementi, kako Vukelja tvrdi, "(n)emoguće je rasplitanje motrene atomne pojave i doprinosa procesa motrenja" zato što je motrenje "također kvantni proces" (Vukelja: 219).

Već smo spomenuli da je u kvantnoj mehanici mjerenje jednako događaju i pritom smo spomenuli da kod Heisenberga čin mjerenja uvijek uključuje jednu smetnju koju ne možemo kontrolirati i koja je predstavljena Planckovom konstantom. No Bohr neće reći da mi mjerenjem uzrokuje smetnju u nečemu što se kreće i odvija na način kao što se Mjesec kreće oko Zemlje gledali ga mi ili ne. U kvantnoj teoriji moramo odbaciti predodžbe jedne objektivne zbilje koja postoji neovisno o nama. Zato će Bohr umjesto smetnje upotrijebiti pojam *međudjelovanja* s atomnim svijetom i cjelovitosti kvantne pojave (Vukelja, poglavlja: "Mehanična predodžba prirode": 146-166; "Područje atomnoga iskustva": 214-228). Rekli smo da se na atomni sus-

¹⁸ "Trebalo reći (...) da je u opisnoj predodžbi ljudskoga znanja svaka obavijest o svijetu uz odgovarajući način na koji ljudi mogu spoznati svijet." (Vukelja: 66)
načelno "vezana" uz spoznajni pristup,

tav ne može djelovati kontinuirano, već samo putem određene količine energije, tj. putem nedjeljivog kvanta djelovanja. Da bismo otkrili nešto o atomima, mi moramo s njima stupiti u interakciju, što znači da naš mjerni uređaj i atom moraju izmijeniti određeni kvant djelovanja. Čineći to kao istraživači koji su postavili instrument, mi postajemo uzrokom nove kvantne pojave. Stoga u slučaju istraživanja kvantnog svijeta govorimo o atomnom objektu kao aficiranom od strane subjekta. Mi smo ti koji uzrokuju promjenu u sustavu koji promatramo i možemo reći da je jedini način na koji mi saznajemo nešto o atomima upravo taj da ih prisilimo ili iz njih izmamimo neki oblik djelovanja. Način na koji se djelovanje kvantnih objekata javlja pokazuje nam se kao jednotan ili cjelovit događaj koji se ne da dalje raščlanjivati. To je kao kada bismo rekli da nije moguće ništa saznati o pojedinoj osobi sve dok ju nešto ne pitamo. No postavljajući pitanje mi utječemo na njezino stanje i onda nam ona daje odgovor (ili reakciju) koji inače ne bi nikada izašao iz njenih usta da nije bilo našeg pitanja. Da bi paralela bila potpuna, zamislite da se ljudi i pojavljuju samo onda ako ste imali sreće da uputite pravo pitanje (kvant djelovanja) na pravom mjestu (položaj elektrona) tj. mjestu gdje naizgled nije bilo nikoga, ali tren kada ste vi postavili pitanje pojavi se netko i ponudi vam odgovor. To je onaj dio u istraživanju koji zovemo subjektivnim elementom i kako se pokazalo, on je sastavni dio svakog eksperimenta. Heisenberg tvrdi da se uvijek moramo podsjetiti na to da “ono što motrimo nije priroda sama, nego priroda koja je izložena našem načinu postavljanja pitanja” te da smo “mi u igrokazu života istodobno gledatelji i suigrači” (Heisenberg, 1997: 43-44).

Kako onda kao gledatelji i suigrači polazemo pravo na objektivnost naših opisa? Rekli smo već da Bohr nije govorio o opisu prave zbilje, već je tvrdio da mi možemo samo govoriti o ljudskom, iskustvenom znanju koje možemo odrediti kao “objektivno ljudsko razumijevanje prirodnih pojava” (Vukelja: 82). Naše iskustveno znanje najviše ovisi o ishodima eksperimenata, dok sami eksperimenti predstavljaju svojevrsna vrata za prostor igre s kvantnim objektima. U području kvantne fizike eksperiment je “temeljni kriterij istine” (Lelas: 43). Stoga govoriti o iskustvenom znanju ne znači izbjegavati pitanje objektivnosti, već je to put kojim se status objektivnog znanja tek postiže. Mi nemamo druge opcije nego pričati o vlastitom iskustvenom znanju zato što u kvantnoj fizici ne govorimo o stvarima kakve su “po sebi”, već samo o stvarima kako nam

se one pojavljuju u našim pokusima. Iskustveno znanje predstavlja subjektivni most spram objektivnosti. Ovdje ne smijemo shvatiti subjektivnost u onom smislu koji bi izvira iz izjave da je npr. svekoliko znanje subjektivno čime bi se htjelo negirati postojanje objektivno važećih činjenica. Zašto nije tako? Iz jednostavnoga razloga što se pozivanjem na subjekt kao most spram objektivnih događanja poziva na onoga tko opaža rezultate mjerenja, a mjerenje za sve vrijedi kao objektivno. Objektivnost je u kvantnoj fizici postignuta kao neovisnost o subjektivnoj prosudbi, a ne kao neovisnost o bilo kojem subjektu.¹⁹

*Autorski
tekstovi*

Ako je sada malo jasnija narav objektivnosti kvantnih mjerenja, neće biti teško razumjeti sljedeću Bohrovu izjavu koja poistovjećuje objektivnost s mogućnošću jednoznačnog opisivanja pojava: “U tome je smislu naš zadatak prikazati to ljudsko iskustvo na način neovisan o subjektivnoj prosudbi pojedinca i stoga objektivna u smislu da ga je moguće jednoznačno priopćiti putem običnoga ljudskoga jezika” (Vukelja: 55). Za Bohra pitanje objektivnosti bilo je pitanje mogućnosti jednoznačnoga, nedvosmislenog priopćavanja ljudskog iskustva svakodnevnim jezikom. Vukelja to opisuje riječima da “objektivnost iskustvenoga znanja ne podrazumijeva da je ono slika zbilje, već da sadrži jednoznačnu poruku. Neovisnost poruke o subjektu, njezinu stvaratelju, ne leži u njezinom možebitnom odslikavanju zbilje, već u njezinoj jednoznačnosti, u mogućnosti da ju primatelj nedvosmisleno protumači” (Vukelja: 55). Neophodan je uvjet jednoznačnoga opisa taj da se u iskazu dâ potpun opis okolnosti pod kojima se opazila pojava. Bohrovim riječima: “Srž je argumenta to da je za objektivni opis i skladno shvaćanje, u gotovo svim poljima znanja nužno obratiti pozornost na okolnosti u kojima je svjedočanstvo stečeno.” (Vukelja: 60). Takvim kriterijima za objektivno znanje Bohr je uspio pomiriti bitnu odrednicu kvantne teorije da je svekoliko znanje ovisno o spoznajnom subjektu s težnjom za postizanjem objektivnosti.

¹⁹ Zato što je velika uloga koju subjekt (istraživač) ima u konstituiranju same zbilje svijeta mikroskopskih čestica tj. taj svijet se

nikada ne bi mogao takvim prikazati da se nije subjekt upustio u “igru” s mikroskopskim česticama.

10. Zaključak

Fizika i filozofija

Na samom početku rada bilo je riječima Wernera Heisenberga opisano stanje u kvantnoj fizici početkom dvadesetog stoljeća. Mnogi fizičari u to su vrijeme zasigurno dijelili Heisenbergovo mišljenje. Je li ono bilo opravdano možemo se zapitati na kraju rada. Što možemo reći da smo naučili iz razvoja kvantne fizike? Prvenstveno je bitno spomenuti u koliko se mjeri do gotovo svih otkrića – poput onih Maxa Plancka, Alberta Einsteina, Nielsa Bohra, Louisa de Broglia, Erwina Schrödingera, Maxa Borna, Wolfganga Paulia te Wernera Heisenberga – došlo zahvaljujući intuiciji istraživača. Naravno, ta otkrića zasigurno ne bi bila moguća da im nije prethodila Boltzmannova statistika, Maxwellovo otkriće elektromagnetskog zračenja, Planckova konstanta i sl., no za sve istraživače stoji da se njihove teorije i izračuni nisu mogli logički deducirati iz prethodnih teorija i jednažbi. Govorimo o 40-ak godina na početku stoljeća koje je bilo turbulentno ne samo na znanstvenom, već i na političkom planu. Vrijedno je istraživati i koliko su društveno-političke prilike doprinijele otkrićima na znanstvenom području.

Ne možemo ne uočiti sličnosti između Heisenbergovih i Bohrovih teza o subjektu koji je istodobno dio prirode koju istražuje s onim Heideggerovim o bivanju-u-svijetu (ili bitku-u-svijetu). Heideggerovo je mišljenje da je spoznaja samo jedan modus bivanja u svijetu, a ne nekakvo izlaženje subjekta iz svoje sfere da bi se zahvatio objekt pa tako steklo znanje o njemu. Takvo nešto za Heideggera nije moguće zato što mi već jesmo povezani s objektom na način da ga ne možemo u potpunosti razlučiti od nas samih. Slično nam poručuju Bohr i Heisenberg tvrdeći da atomni objekt znamo samo ako smo se postavili u odnos međudjelovanja s njim, samo ako shvatimo da i mi i atomni objekti oboje bivamo u svijetu, ali zato na različite načine. Promjene na koje smo navikli u svakodnevnom životu daju se rastaviti na sve manje i manje dijelove i tako je udovoljeno zahtjevu za kontinuiranim prijelazom između svih događaja. Atomni svijet poučio nas je da za njega vrijede potpuno drugi zakoni i da se u tom svijetu promjene ne mogu rastavljati na sve manje i manje dijelove. Ovdje moramo odustati od predodžbe apsolutnog subjekta i prihvatiti svoju ulogu u ovome svijetu koji nam i sam omogućuje da budemo takvi kakvi jesmo, npr. fizičari koji istražuju pojave na određen način, a ne da se poimamo odvojenima od svijeta i zamišljamo ga kao da bi on mogao

postojati nezavisno od nas. Možda i bi, no takav svijet ne bi mogao biti predmetom ni najmaštovitije spekulacije.

Kvantna fizika poučila nas je jednoj novoj vrsti poimanja zakonitosti te novom načinu opisivanja objekata. U kvantnoj mehanici govorimo o statističkoj uzročnosti te o pravilnosti vjerojatnosti. Kada je otpala vjera u potpuni opis svih parametara trenutnog stanja nekog objekta, postalo je jasno da se mora tragati za drugom vrstom uzročnosti. Kvantna mehanika iznjedrila je statističku uzročnost. Takav tip uzročnosti nužno povlači za sobom nepotpuno poznavanje nekog sustava. Ali nepotpuno poznavanje sustava ne mora značiti i nepotpunost kvantne mehanike. "Najvažniji novi rezultat atomske fizike bila je spoznaja mogućnosti da se neproturječno na iste fizikalne pojave mogu primijeniti različite sheme prirodnih zakona" (Heisenberg 1998: 21). Kako bi trebao izgledati jedan zakon koji ne isključuje mogućnost da ako se atom u jednom slučaju ponaša kao val, u drugom slučaju može ponašati kao čestica? Bilo kakva tendencija da se predvidi npr. emisija α -čestice isključila bi mogućnost da se ona pojavi kao emisija vala. Upravo nas eksperimenti koji pokazuju i valnu i čestičnu prirodu atomnih pojava sile svojom paradoksalnošću na formuliranje statističkih zakonitosti, a takvih eksperimenata ima mnogo. Stoga se odluka da se u kvantnoj teoriji služimo statističkim zakonima nameće sama od sebe. U kvantnoj teoriji ne možemo sa sigurnošću potvrditi točnost našeg mjerenja zbog utjecaja koji mjerni uređaj vrši na sustav niti možemo točno opisati kauzalni lanac u eksperimentu. Ali jednu stvar možemo, i to s najvećom preciznošću. Možemo formulirati statističke zakone koji će nam npr. za jednu česticu reći kolika je vjerojatnost da se pojavi baš na tom mjestu, ali će zato za roj čestica nepogrešivo proračunati njihovu točnu raspodjelu.

Ako smo odbacili poimanje subjekta kao apsolutnog i karakter zakona klasične fizike kao jednom za svagda utvrđene pravilnosti u prirodi, još nam preostaje da pitamo kvantnu fiziku kako se služiti pojmovima koji su nam tako zorni i intuitivno razumljivi. Odgovor koji ćemo dobiti bit će u najmanju ruku okrepljujući. Koliko smo se puta morali, da bismo opisali nečije ili vlastito ponašanje, koristiti pojmovima koji naizgled nikada ne bi mogli pripadati jednoj osobi. Koliko puta smo bili izloženi tumačenju pojedinih fenomena sa znanstvenog stajališta i sa stajališta umjetnosti ili filozofije. Sociologija je znanost gdje nikada nije postignut konsenzus o tomu jesmo li došli do potpunog opisa društva ako smo

*Autorski
tekstovi*

opisali svakog pojedinca koji društvo sačinjava ili postoji nešto što je nesvodivo na karakteristike pojedinaca, a što označavamo pojmom društvo. Kvantna teorija, posebice u tumačenju Nielsa Bohra, poručuje nam da moramo odbaciti logiku koja nas uči da jedna stvar može u isto vrijeme biti samo jedno ili drugo. U kvantnoj mehanici kvantni objekti su i valovi i čestice te bilo koji opis koji bi izbacio jedno od navedenog ne bi bio u potpunosti točan. U kvantnoj teoriji odbacujemo pravilo *tertium non datur* zato što treća opcija zaista postoji u obliku ujedinjenja prve dvije opcije. Takvi opisi ne znače da odustajemo od konačnih definicija, nego nas podsjećaju da pravila moramo izrađivati u vezi s iskustvom a ne nametanjem iskustvu. Kantova izreka da mi ne otkrivamo, već pridajemo zakone prirodi zauvijek će vrijediti, ali bitno je spomenuti da su u području kvantne fizike zakoni ipak proizašli iz svojevrsnog razgovora s atomima.

Cilj ovoga rada bio je u najosnovnijim crtama izložiti povijesni pregled razvoja kvantne teorije i uz to priložiti kratki osvrt na dvojicu glavnih fizičara zaslužnih za takozvano Kopenhagensko tumačenje kvantne teorije. Na području hrvatskog i srpskog jezika prevedena je nemala količina literature koja nastoji približiti kvantnu fiziku široj publici. Od prevedenih knjiga malo je onih koje su zaista nastojale opisati kvantnu fiziku pretpostavljajući skoro pa potpuno neobrazovanog čitatelja na području fizike. Takvim knjigama, poput one Leonida I. Ponomarjova i Johna Gribbina dugujem neophodno razumijevanje potrebno za pisanje ovog rada. U radu sam nastojao objediniti na jednom mjestu glavna otkrića koja su dovela do razvoja kvantne fizike kao i ideje onih koji su za ista otkrića zaslužni, sve u svrhu olakšavanja pristupa djelima koja su pisana prvenstveno od fizičara, a od velike su vrijednosti za ljude koji se zanimaju za filozofiju kao i u svrhu pobuđivanja interesa za kvantnu fiziku među studentskom populacijom. U ovome radu nije gotovo nimalo prostora posvećeno najvažnijem dijelu cjelokupne kvantne fizike, a tiče se njenog matematičkog formalizma. Jedini pravi put u kvantnu fiziku mora ići preko matematičkih jednadžbi za koje smo spomenuli da su predstavnici elementarnih čestica i zakona gibanja koji njima upravlja. Bez dovoljnog razumijevanja kvantnomehaničnih jednadžbi svako znanje o kvantnom svijetu samo je puka upoznatost s riječima onih koji su razumijevanju tog svijeta posvetili cijeli život i bili toliko dobri da nam ga opišu svakodnevnim jezikom. Ovaj rad zato nije drugo doli prenošenje riječi upravo tih ljudi uz mali autorski doprinos.

Ilustracije:

SUKA 1 – Paar (1991): 40

SUKA 2 – Gribin (1989): 30

SUKA 3 – Ponomarjov (1995): 13

SUKA 4 – Paar (1991): 57

SUKA 5 – Ponomarjov (1995): 34

SUKA 6 – Ponomarjov (1995): 68

SUKA 7 – Supek (1990): 153

SUKA 8 – Supek (1990): 170

SUKA 9 – Paar (1991): 43

SUKA 10 – Paar (1991): 48

SUKA 11 – Eisberg, Resnick (1985): 60

SUKA 12 – Supek (1990): 186

SUKA 13 – Supek (1990): 189

Literatura:

- EISBERG, ROBERT; RESNICK, ROBERT (1985) *Quantum physics, of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles*, New York: John Wiley & Sons
- GRIBIN, DŽON (GRIBBIN, JOHN) (1989) *U traganju za šredingerovom mačkom*, prev. Đorđe Dobrić. Beograd: Prosveta
- HEISENBERG, WERNER (1961) *Slika svijeta suvremene fizike*, prev. Drago Dujmić. Zagreb: Biblioteka Epoha
- HAIJZENBERG, VERNER (HEISENBERG, WERNER) (1972) *Fizika i metafizika*, prev. Vera Stojić. Beograd: Nolit
- HEISENBERG, WERNER (1997) *Fizika i filozofija*, prev. Stipe Kutleša. Zagreb: KruZak
- HEISENBERG, WERNER (1998) *Promjene u osnovama prirodne znanosti*, prev. Mladen Klepac. Zagreb: KruZak
- LELAS, SRĐAN (1973) *Kopenhagenska interpretacija kvantne mehanike i posljedice na problem odnosa subjektai objekta*. Doktorska disertacija, Filozofski fakultet u Zagrebu
- PAAR, VLADIMIR (1991) *Titranja, uvod u kvantnu fiziku*, poluvodiči. Zagreb: Školska knjiga
- PONOMARJOV, I. LEONID (1995) *Kvantna kocka*, prev. Dušan Trbojević. Zagreb: Školska knjiga
- SUPEK, IVAN (1990) *Povijest fizike*, Školska knjiga, Zagreb
- VUKELJA, TIHOMIR (2004) *Nesjed-injljivo znanje: Bohrov doprinos filozofskoj teoriji spoznaje*. Zagreb: KruZak