

Džon Poukinghorn

KVANTNA TEORIJA

SAŽETI PRIRUČNIK

Prevela
Jelena Kosovac

Laguna

Naslov originala
John Polkinghorne
QUANTUM THEORY
A Very Short Introduction

Copyright © John Polkinghorne 2002.
Translation copyright © 2017 za srpsko izdanje, LAGUNA

„*QUANTUM THEORY: A Very Short Introduction* was originally published in English in 2002. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. Laguna is solely responsible for this translation from the original work and Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon.“

U sećanje na Pola Adrijana Morisa Diraka
1902–1984.

Mislim da sa sigurnošću mogu reći da niko
ne razume kvantnu fiziku.

Ričard Fajnman

Izjave zahvalnosti

Zahvaljujem svim zaposlenima u izdavačkoj kući *Oxford University Press* za pomoć u pripremi ovog rukopisa za štampu, a naročito Šeli Koks za brojne korisne komentare o prvom nacrtu knjige.

Džon Poukinghorn
Koledž Kvins
Kembridž

Sadržaj

Predgovor	11
Spisak ilustracija	15
1 Pukotine u klasičnoj fizici	17
2 Svitanje	37
3 Pomračenje	69
4 Dalji razvoj	95
5 Zajedništvo	121
6 Lekcije i značenja	129
Dodatna literatura	145
Glosar	148
Matematički dodatak.	153

Predgovor

Nastanak moderne kvantne teorije sredinom dvadesetih godina 20. veka doveo je do najznačajnijeg preispitivanja našeg načina razmišljanja o prirodi fizičkog sveta još od vremena Isaka Njutna. Otkriveno je da ono što se smatralo jasnim i određenim procesom, na subatomskom nivou jeste maglovitog i nestalnog ponašanja. U poređenju s ovom revolucionarnom promenom, veliko i značajno zasnivanje Specijalne i Opšte teorije relativnosti nije delovalo kao mnogo više od zanimljivih varijacija na teme klasične fizike. I zaista, kvantna mehanika do te mere nije bila po metafizičkom ukusu Alberta Ajnštajna, začetnika teorije relativnosti, da joj se on sve do kraja svog života neumoljivo suprotstavljao. Nije nikakvo preterivanje smatrati kvantnu teoriju jednim od najvažnijih intelektualnih dostignuća 20. veka – nečim što je izazvalo pravu revoluciju u našem shvatanju fizičkih procesa.

Pošto je tako, ne bi valjalo da se teorijski fizičari zauzave na poznavanju kvantnih ideja. Iako je za potpuno

formulisanje kvantne teorije potrebno koristiti njen prirodni jezik, matematiku, mnogi osnovni koncepti mogu postati pristupačni čitaocu s opštim obrazovanjem koji je voljan da se malo pomuči kako bi do kraja pročitao priču o ovom izuzetnom dostignuću. Ova kratka knjiga napisana je upravo za takvog čitaoca. U glavnom delu knjige nisu izložene nikakve matematičke jednačine. U kratkom dodatku izložena su pak neka jednostavna matematička saznanja što će pružiti dodatno razjašnjenje onima koji mogu da svare nešto teži zalogaj. (Na relevantne odeljke ovog dodatka, u glavnom tekstu se upućuje navođenjem rednog broja odeljka, podebljanim fontom.)

Za sedamdeset pet i više godina njene primene i korišćenja koji su usledili posle prvobitnih otkrića u ovoj oblasti, kvantna teorija dokazala je da je neverovatno produktivna. Trenutno se uspešno i s potpunim poverenjem u njenu sposobnost davanja rezultata primenjuje u raspravi o kvarkovima i gluonima (sadašnjim kandidatima za osnovne konstituente nuklearne materije), uprkos činjenici da su ovi entiteti bar sto miliona puta manji od atoma čije su ponašanje razmatrali pioniri kvantne teorije. Pa ipak, pred nama je i dalje ozbiljan paradoks. Epigraf ove knjige ima nešto od poletnog preterivanja u izražavanju koji je svojstven načinu govora tog velikog kvantnog fizičara druge generacije fizičara u ovoj oblasti, Ričarda Fajnmana; ali nesumnjivo je istina da mi, iako znamo da obavljamo računске operacije u ovoj oblasti, samu teoriju ne *razumemo* onoliko koliko bi trebalo da je

razumemo. U izlaganju koje sledi, pokazaće se da su važna interpretativna pitanja ostala nerešena.

Kao mlad, imao sam tu privilegiju da o kvantnoj teoriji saznajem i učim od čuvenog Pola Diraka, pohađajući njegova slavna predavanja na Kembridžu. Dirakova predavanja blisko su sledila način obrađivanja ovog materijala onako kako ga je on izložio u svom rekreativnom i uticajnom delu u ovoj oblasti, knjizi *Principi kvantne mehanike* (Paul Dirac, *Principles of Quantum Mechanics*, 1930) – jednom od istinskih klasika naučne literature 20. veka. Nije bio samo najveći teorijski fizičar kojeg sam lično poznao, već je i zbog svoje duhovne čistote i skromnosti u ponašanju (nikada nije ni u najnezatnijoj meri isticao vlastite neizmerne doprinose osnovnim načelima kvantne teorije), bio osoba koja nadahnjuje i neka vrsta naučnog sveca. S poniznošću posvećujem ovu knjigu uspomeni na njega.

Spisak ilustracija

1	Sabiranje talasa	20
2	Značajne ličnosti kvantne teorije na okupu . . .	38
3	Eksperiment dvostrukog proreza	48
4	Sabiranje vektora	53
5	Nekomutativne rotacije	56
6	Štern–Gerlahov ogled	77
7	Tunelovanje	96
8	Zonalna struktura	103
9	Ogled odloženog izbora	105

Prvo poglavlje

Pukotine u klasičnoj fizici

Moderna fizika doživljava svoj prvi vrhunac s objavljivanjem dela Isaka Njutna *Matematički principi prirodne filozofije*, obično skraćeno *Principia* (Isaac Newton, *Philosophie Naturalis Principia Mathematica*), 1687. godine. Nakon toga se mehanika utvrđuje kao zrela disciplina koja je jasno i deterministički mogla da opiše kretanje čestica. Ova nauka se do te mere činila dovršenom i potpunom da je krajem 18. veka najznačajniji Njutnov sledbenik, Pjer Simon de Laplas, mogao da iznese svoju čuvenu tvrdnju da biće koje poseduje neograničene moći računanja i ima potpuno znanje o dispozicijama svih čestica u nekom vremenskom trenutku, može da koristi Njutnove jednačine kako bi predvidelo budućnost celog univerzuma i s jednakom izvesnošću bi objasnilo i njegovu prošlost. Zapravo, ova prilično ledena mehanicistička tvrdnja uvek je imala snažan prizvuk oholosti. Pre svega, ljudska bića sebe ne doživljavaju kao automate koji funkcionišu onako kao što funkcionišu časovnici. I drugo, koliko

god Njutnova dostignuća nesumnjivo jesu bila impresivna, ona nisu obuhvatila sve aspekte fizičkog sveta koji su tada bili poznati. Problematična pitanja koja su ugrožavala verovanje u potpunu samodovoljnost Njutnove sinteze ostala su nerešena. Na primer, pitanje prave prirode i porekla univerzalnog zakona gravitacije koji je otkrio ser Isak. Sam Njutt je odbio da uobličiti hipotezu o tome. Zatim, nerešenim je ostavljeno i problematično pitanje prirode svetlosti. Ovde je Njutt sebi dozvolio određeni stepen spekulativne širine. U delu *Optika* (Isaac Newton, *Opticks*, 1704) naginje staništu da je snop svetlosti sačinjen od toka sićušnih čestica. Ova vrsta korpuskularne teorije bila je u skladu s Njutnovom sklonošću da fizički svet sagledava u atomističkim kategorijama.

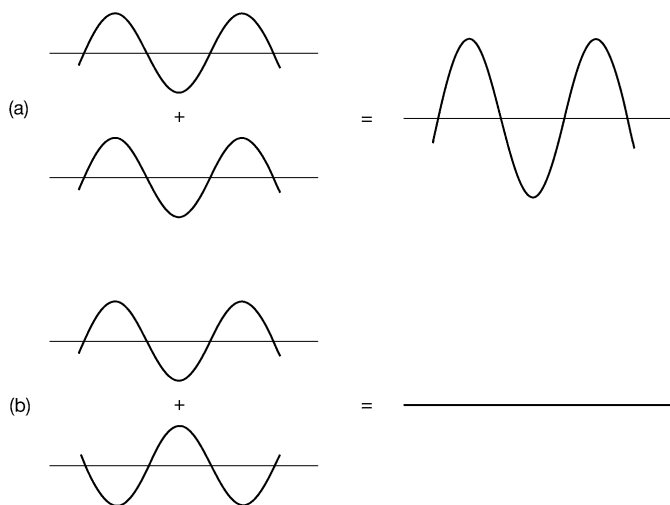
Priroda svetlosti

Pokazalo se da tek u 19. veku dolazi do stvarnog napretka u razumevanju prirode svetlosti. Na samom početku tog veka, 1801. godine, Tomas Jang izložio je vrlo uverljiv dokaz u prilog činjenici da svetlost ima prirodu talasnog kretanja, što je bila tek ideja kada ju je pre više od jednog veka izneo Njutnov savremenik, Holanđanin Kristijan Hajgens. Najvažnija Jangova opažanja zasnivaju se na efektima koje mi sada nazivamo pojavama interferencije. Karakterističan primer jeste postojanje naizmeničnih svetlih i tamnih pruga, a njih je pokazao, što je prilično ironično, sam ser Isak

u fenomenima poznatim kao Njutnovi prstenovi. Ovi efekti svojstveni su talasima i nastaju na sledeći način: dva talasa se kombinuju na način koji zavisi od toga u kakvom su odnosu njihove oscilacije. Ako su one usklađene (nalaze se u fazi, kako to kažu fizičari), tada se vrh jednog talasa konstruktivno poklapa sa vrhom drugog, što daje maksimalno međusobno pojačavanje. Kada je reč o svetlosti, tad nastaje svetla traka. Ako se pak dva talasa nalaze tačno u raskoraku (van faze), tada se vrh jednog talasa poklapa sa koritom drugog u međusobno destruktivnom poništavanju, te se dobija tamna traka. Stoga je pojavljivanje naizmeničnih svetlih i tamnih interferentnih pruga nepogrešiv znak prisustva talasa. Izgleda da su Jangove opservacije rešile to pitanje. Svetlost je poput talasa.

S odmicanjem 19. veka, činilo se da je priroda talasnog kretanja povezana sa svetlošću bila razjašnjena. Važna otkrića Hansa Kristijana Ersteda i Majkla Faradeja pokazala su da su elektricitet i magnetizam, pojave koje se na prvi pogled veoma razlikuju po svojoj prirodi – zapravo međusobno blisko povezani. Način na koji ih je moguće povezati i time dobiti konzistentnu teoriju elektromagnetizma naposletku je utvrdio Džejms Klerk Maksvel – o čijoj se genijalnosti sasvim prikladno može govoriti koliko i o genijalnosti samog Njutna. Svoje čuvene jednačine, koje su i dalje temelj teorije elektromagnetizma, Maksvel je izložio u *Raspravi o elektricitetu i magnetizmu* (James Clerk Maxwell, *Treatise on Electricity and Magnetism*), 1873. godine, klasičnom delu nauke, delu za sva vremena. Maksvel

je shvatio da ove jednačine imaju talasno rešenje i da je brzina ovih talasa određena u kategorijama poznatih fizičkih konstanti. Ispostavilo se da je to poznata brzina svetlosti!



1. Sabiranje talasa: (a) u fazi; (b) van faze

Na ovo otkriće gledalo se kao na najveći uspeh fizike u 19. veku. Izgledalo je kako je činjenica da je svetlost elektromagnetni talas toliko čvrsto utemeljena da ju je nemoguće pobiti. Maksvel i njegovi savremenici ove talase su smatrali oscilacijama u sveprožimajućoj sredini sa elastičnim svojstvima, sredini koja je dobila naziv etar. U jednom enciklopedijskom članku reći će da je etar najbolje potvrđen entitet u celoj teoriji fizike.

Mi nazivamo fiziku Njutna i Maksvela klasičnom fizikom. Krajem 19. veka ona je postala zadivljujuće

teorijsko zdanje. Teško da iznenađuje što su izuzetno ugledni stariji poznavaoци ove oblasti, kao što je lord Kelvin, počeli da misle da su sve značajne ideje fizike sada poznate, te preostaje još samo da se njene pojedinosti sa većom tačnošću dovedu u red. U poslednjoj četvrtini tog veka, jedan mladić u Nemačkoj, koji je razmišljao o akademskoj karijeri, bio je upozoren da se ne opredeljuje za fiziku. Bolje bi bilo da potraži nešto drugo jer je fizika dospela do kraja svog puta i malo je toga ostalo što zaista vredi uraditi. Taj mladi čovek zvao se Maks Plank. Srećom, nije poslušao savet koji mu je dat.

A istina, zapravo, jeste da su se na blistavoj fasadi klasične fizike već počinjale nazirati izvesne pukotine. Osamdesetih godina 19. veka Amerikanci Majkelson i Morli pametno su zamislili i izveli oglede s namerom da demonstriraju kretanje Zemlje kroz etar. Ideja je bila sledeća: ako je svetlost zaista talas u ovoj sredini, onda njena izmerena brzina treba da zavisi od toga kako se posmatrač kreće u odnosu na etar. Zamislite talase na moru. Njihova prividna brzina, ako se talasi posmatraju sa broda, zavisi od toga da li se brod kreće uz talase (uz vetar) ili protiv talasa (protiv vetra) te će njihova brzina izgledati manja u prvom nego u drugom slučaju. Ogled je bio osmišljen da uporedi brzinu svetlosti u dva smera koji su međusobno pod pravim uglom. Samo ako bi se poklopilo da je Zemlja u mirovanju u odnosu na etar u vreme merenja, očekivalo bi se da ove dve brzine budu iste, a ta mogućnost je mogla da bude isključena ponavljanjem

ogleda nekoliko meseci kasnije, kada se Zemlja bude kretala u suprotnom pravcu po orbiti. No, Majkelson i Morli nisu detektovali nikakvu razliku u brzini. Za rešenje ovog problema biće potrebna Ajnštajnova Specijalna teorija relativnosti koja ga se otarasila skupa s etrom. To veliko otkriće nije tema naše trenutne priče, premda valja primetiti da teorija relativnosti, izuzetno značajna i neočekivana kada se pojavila, nije ukinula osobine jasnoće i determinizma svojstvene klasičnoj fizici. Upravo sam zato u predgovoru tvrdio da je Specijalna teorija relativnosti zahtevala daleko manje radikalnog preispitivanja koliko će ga zahtevati kvantna teorija.

Spektar

Prvi nagoveštaj kvantne revolucije zapravo se pojavljuje 1885. godine, ali tada nije bio prepoznat kao takav. Nastaje iz matematičkih mozganja švajcarskog učitelja Balmera. Naime, on je razmišljao o spektru vodonika, to jest o skupu odvojenih obojenih linija koje nastaju kada se svetlost iz užarenog gasa prelama dok prolazi kroz prizmu. Različite boje odgovaraju različitim frekvencijama (iznosi oscilovanja) datih svetlosnih talasa. Poigravajući se brojkama, Balmer je otkrio da ove frekvencije mogu da se opišu prilično jednostavnom matematičkom formulom [videti Matematički dodatak, 1]. U to vreme ovo nije izgledalo mnogo više od puke čudnovatosti.

Kasnije su naučnici pokušali da Balmerove rezultate protumače u okvirima tadašnje slike atoma. J. J. Tomson je 1897. godine otkrio da negativan električnost u atomu nose sićušne čestice koje su naposljetku dobile naziv „elektroni“; pretpostavljalo se da se uravnotežujući pozitivni električnost naprosto rasprostire kroz atom. Ova zamisao o atomu je nazvana model „pudinga sa šljivama“, gde su elektroni igrali ulogu šljiva a pozitivan električnost ulogu pudinga. U tom slučaju, spektralne frekvencije bi trebalo da odgovaraju različitim načinima na koje bi elektroni mogli da osciluju unutar pozitivno naelektrisanog „pudinga“. Međutim, pokazalo se da je krajnje teško naterati ovu ideju da zaista funkcioniše na empirijski zadovoljavajući način. Videćemo da će pravo objašnjenje Balmerovog čudnog otkrića na kraju doneti primena sasvim drugačijeg skupa ideja. U međuvremenu, dok se još nije došlo do tih ideja, priroda atoma je verovatno izgledala previše opskurno za sve ove probleme te je izazvala sveopštu zabrinutost.

Ultraljubičasta katastrofa

Kudikamo izazovniji i zamršeniji bio je jedan drugi problem kojeg je na svetlost dana prvi izneo lord Rejli 1900. godine. Problem je dobio naziv „ultraljubičasta katastrofa“, a proistekao je iz primene ideja jednog drugog velikog otkrića 19. veka – statističke fizike. U okviru statističke fizike, fizičari su pokušavali da

izađu na kraj sa ponašanjem veoma složenih sistema, sistema čija su kompleksna kretanja mogla da imaju mnoge različite oblike. Jedan primer takvog sistema bio bi gas sačinjen od mnoštva različitih molekula, svaki sa svojim sopstvenim stanjem kretanja. Drugi primer predstavlja energija zračenja koja može biti ishod sabiranja više različitih frekvencija. Bilo bi gotovo nemoguće pratiti sve pojedinosti onoga što se dešavalo u ovako složenim sistemima, ali neki važni aspekti njihovog opšteg ponašanja ipak jesu mogli da budu objašnjeni. To je proizlazilo otud što sveukupno ponašanje rezultira iz grubog usrednjavanja efekata mnogih pojedinačnih komponenti stanja kretanja. Među tim mogućnostima dominira najverovatniji skup, pošto se ispostavlja da je nadmoćno najverovatniji. Na ovom temelju maksimalnog povećanja verovatnoće, Klerk Maksvel i Ludvig Bolcman mogli su da pokažu da se pouzdano mogu izračunati izvesna opšta svojstva sveukupnog ponašanja složenog sistema, kao što je pritisak gasa pri datoj zapremini i temperaturi.

Rejli je primenio ove tehnike statističke fizike na problem načina raspodeljivanja energije između različitih frekvencija u slučaju zračenja crnog tela. Crno telo jeste telo koje potpuno apsorbuje svako upadno zračenje a zatim iznova emituje sve to zračenje. Pitanje spektra zračenja u ravnoteži sa crnim telom može delovati kao prilično egzotično, ali zapravo postoje izvanredne aproksimacije za crna tela, tako da ovo jeste pitanje koje se može ogledno istraživati, a i teorijski – na primer, proučavanjem zračenja u unutrašnjosti

posebno pripremljene pećnice. To pitanje je uprošćavala činjenica što se tada smatralo da je poznato da odgovor treba da zavisi samo od temperature tela a ne od ma koje druge osobine njegove strukture. Rejli je ukazao na to da jednostavna primena oprobanih ideja statističke fizike vodi ka poražavajućem rezultatu. Ne samo što se račun nije slagao s izmerenim spektrom, nego uopšte nije imao nikakvog smisla. Naime, predviđao je da će neograničena količina energije biti koncentrisana upravo u najvišim frekvencijama – posramljujući zaključak koji će biti nazvan „ultraljubičasta katastrofa“. Sasvim je jasno u čemu se sastoji katastrofičnost ovog zaključka: „ultraljubičasto“ jeste, dakle, samo način da se kaže „visoke frekvencije“. Ovaj ozbiljan problem nastao je zato što po predviđanjima klasične statističke fizike svaki stepen slobode sistema (u ovom slučaju svaki poseban način na koji zračenje može da se ponaša kao talas, da osciluje) dobija istu utvrđenu, nepromenljivu količinu energije, količinu koja zavisi samo od temperature. Što je viša frekvencija to postoji veći broj odgovarajućih načina oscilovanja, što za posledicu ima da one koje zaista odlikuje najviša frekvencija preuzimaju sve, gomilajući neograničene količine energije. Evo problema koji je postao daleko više od neugledne pukotine na površini blistave fasade klasične fizike. Pre će biti da je bio zjapeća rupa u njenom zdanju.

Za godinu dana je Maks Plank, sada profesor fizike u Berlinu, otkrio izvanredan izlaz iz ove dileme. Sinu je rekao da veruje da je došao do otkrića podjednako

značajnog kao što je bilo Njutново. Tvrdnja se može učiniti grandioznom; međutim, Plank je jednostavno izrekao ozbiljnu istinu.

Shodno principima klasične fizike, smatralo se da zračenje neprestano „curi“ u crno telo i izlazi iz njega, umnogome onako kako voda može da utiče i otiče iz sunđera. U svetu klasične fizike, koja se lagano menjala, nijedna druga pretpostavka nije se činila nimalo verovatnom. Pa ipak, Plank je postulirao nešto suprotno tome – da se zračenje emituje ili apsorbuje s vremena na vreme u paketima energije konačne veličine. Utvrdio je da će energetska sadržaj jednog od tih *kvanta* (kako su ovi nedeljivi paketi energije nazvani) biti srazmeran frekvenciji zračenja. Ta konstanta proporcionalnosti smatra se univerzalnom konstantom prirode, sada poznatom kao Plankova konstanta. Označava se simbolom h . Veličina h je izuzetno mala s obzirom na veličine koje odgovaraju svetu svakodnevnog iskustva. Upravo zato ovo tačkasto ponašanje zračenja nije bilo ranije primećeno; niz malih tačaka koje su veoma blizu jedne drugima izgledaju kao prava linija.

Neposredna posledica ove smeđe hipoteze jeste da je zračenje visoke frekvencije moglo da bude emitovano ili apsorbavano samo kada je uključen jedan jedini kvant izuzetno velike energije. Ova ogromna količina energije značila je da bi ti slučajevi visoke frekvencije bili ozbiljno potisnuti u poređenju s očekivanjima klasične fizike. Obuzdavanje visokih frekvencija na ovaj način nije samo uklonilo „ultraljubičastu katastrofu“,