

QED

NEOBIČNA TEORIJA  
SVETLOSTI I MATERIJE



# QED

## Neobična teorija svetlosti i materije

---

Ričard Fajnman

Prevod  
Milan M. Ćirković



*Naslov originala*  
Richard P. Feynman  
QED: The Strange  
Theory of Light and Matter

Copyright © 1985 by Richard P. Feynman  
Copyright © 2010, 2014, 2017, 2023. za srpsko izdanje, Heliks

*Izdavač*  
Heliks

*Za izdavača*  
Brankica Stojanović

*Lektor*  
Vesna Đukić

*Štampa*  
Artprint Media, Novi Sad

Četvrto izdanje

Knjiga je složena  
tipografskim pismom  
*Warnock Pro*

ISBN: 978-86-6024-088-2

Smederevo, 2023.

[www.heliks.rs](http://www.heliks.rs)

# Sadržaj

---

	<i>Predgovor srpskom izdanju</i>	vii
	<i>Predgovor</i>	xi
	<i>Zahvalnica</i>	xxv
<b>1</b>	Uvod	1
<b>2</b>	Fotoni – čestice svetlosti	34
<b>3</b>	Elektroni i njihove interakcije	74
<b>4</b>	Granice i nejasnoće	122
	<i>Indeks</i>	151
	<i>O autoru</i>	158
	<i>O prevodiocu</i>	159



Richard P. Feynman

Unikatni primerak jednog od čuvenih Fajnmanovih dijagrama kojeg je svojeručno nacrtao i potpisao Ričard Fajnman.

## Predgovor srpskom izdanju

---

# Povratak bez odlaska: Fajnman u 100. godini

Najfascinantniji aspekt knjige koju držite u ruci jeste činjenica da je u pitanju tekst o nauci koji ni 32 godine nakon prvog izdanja ne zahteva praktično nikakve izmene i dopune. To je uistinu velika retkost, jer knjige o nauci neminovno vrlo brzo zastarevaju i postaju dokumenti od interesa za istoriju nauke – ili širu kulturu – ali ne nešto iz čega se može *odista učiti*. Jedan deo bremena popularizatora nauke se sastoji upravo u tome: oni su svesni da je njihov rad nužno kratkog istorijskog daha. Ko se još seća sjajnih popularnih dela Flamariona, Edingtona, Gamova, Hojla? Iste te 1979. godine kada je Ričard Filips Fajnman na Novom Zelandu održao predavanja koja će šest godina kasnije biti sakupljena u ovoj knjizi, jedan drugi titan fizike, Stiven Vajnberg, objavio je *Prva tri minuta*, popularni prikaz standardnog kosmološkog modela, poznatog i kao Veliki prasak. Dok ima mnogobrojnih razloga zašto je vredno i danas čitati Vajnbergovu knjigu, to sigurno nije želja da se nauči savremena kosmologija. Zapravo, iskustvo u nastavi

kosmologije pokazuje da je suviše ozbiljno shvatanje Vajnbergove knjige zaista kontraproduktivno za razumevanje savremenog razvoja ove discipline; jednostavno, suviše mnogo toga se promenilo od 1979. godine do danas i čitava oblast je neprepoznatljiva iz simpatične, ali preterano jednostavne Vajnbergove skice. Ajnštajn bi ponovo rekao: „Sve treba da bude najjednostavnije moguće, ali ne jednostavnije od toga“.

Zabluda koju je Fajnman vešto izbegao sastoji se u uobičajenom insistiranju da se popularizacija nauke obavlja kroz *nove*, radikalne i samim tim nedovoljno jasne rezultate. „Publika nas uvek pita o onome što ne znamo.“ Upravo zbog toga se ono što znamo i ne ceni dovoljno. Njegova strategija, zapanjujuće efikasna (ili možda naše čuđenje nad njenom efikasnošću potiče tek iz cinizma u ovom dobu potpune bezvrednosti masovnih medija kao obrazovnog sredstva?), sastoji se u afirmaciji *naivnosti* kao pristupa teškim sadržajima: ono što treba da pitamo jesu najjednostavnija, dečija pitanja. Ako do razumevanja na ovaj način ne dolazi dovoljno često, teškoća je u tome da na drugoj strani nema u toj meri strpljivih učitelja, kakav je bio pisac ove knjige. Kako to *zapravo* saznajemo? Zašto verujemo u rezultat ovog ili onog proračuna? I verovatno najvažnije: jesmo li u stanju da to *napravimo*?

Fajnman, od čijeg se rođenja 11. maja ove, 2017. godine navršilo 99 godina, bio je ne samo jedan od najistaknutijih naučnika prošlog veka i milenijuma, već i možda najznačajniji *vizionar* među fizičarima. Mnoge od tema kojima je udario temelje – često sasvim nemarno i „u prolazu“ – kao što su kvantni računari ili nanotehnologija, obeležiće, sada je to sasvim jasno, ne samo nauku 21. veka, nego i celinu društva i ljudske egzistencije na planeti. U istraživačkoj nauci, Fajnmanov značaj je samo porastao sa vremenom. Svi rezultati fizike elementarnih čestica



i kvantne teorije polja danas se izražavaju kroz formalizam koji je Fajnman razvio u 1960-im za potrebe kvantne elektrodinamike, teorije iz naslova ove knjige. Razumevanje njegovih jednostavnih sličica – iza kojih se krije ključni koncept Fajnmanovog dijagrama, podjednako značajan kao što su „paralelogrami sila“ bili u doba klasične Njutnove mehanike, a ostali u inženjerstvu i do danas – vodi direktno do Higsovog bozona i drugih tema na samom frontu istraživanja savremene fizike. Već samo to je dovoljno da preporučim ovu knjigu, jer će njeno opušteno razumevanje omogućiti čitaocu da pronikne u mehanizam koji leži u samoj srži onoga što je najdinamičnije i najzudljivije u savremenoj fizici. Veza između odbijanja svetlosti od dve staklene površine i spontanog narušenja simetrije, te Higsovog bozona predstavlja pravu „zlatnu nit“ našeg najdubljeg saznanja o prirodi materijalnog sveta.

Međutim, Fajnmanov značaj je možda i veći na drugom polju, koje se često i potpuno nepravedno zapostavlja i gura u drugi plan u odnosu na „prava“ istraživanja: naučnoj pedagogiji. Duboko pogrešna ideja da treba favorizovati studente koji žele da se bave istraživanjem na račun onih koji se upisuju na nastavne smerove tako izaziva tragičnu povratnu spregu. Sledeće generacije studenata nastavnih smerova imaju još manje resursa i prilike da ih steknu. I tako ulazimo u začarani krug u kome se intelektualni kapital samo troši, a kvalitet naučnog obrazovanja u čitavom društvu se smanjuje. Ovaj proces je u nastavi fizike daleko odmakao i predstavlja globalni problem (koji je u našim krajevima samo intenziviran usled brojnih tragičnih lokalnih „specifičnosti“ i nedostatka ozbiljne pedagoške tradicije u prirodnim naukama).

Mi *moramo* raskinuti taj začarani krug. U pitanju nije ništa manje od života i smrti na planeti Zemlji u najbukvalnijem

smislu reči, jer bez stvarnog povećanja naučne pismenosti i većeg udela naučnog znanja i rasuđivanja u najznačajnijim društvenim sferama ne možemo se nadati uspešnom suočavanju sa izazovima i rizicima neposredne budućnosti, kao što su globalno zagrevanje, zloupotrebe novih i potencijalno neshvatljivo opasnih tehnologija kao što su biotehnologija ili nanotehnologija, prenaseljenost i posledično rapidno iscrpljivanje neobnovljivih resursa i izvora energije. Naučna pismenost je, više nego ikad otkako čovek postoji kao vrsta, preduslov za rešavanje ovih *transnaučnih* problema: opštedruštvenih pitanja na koja se može odgovoriti samo sa naučnim znanjem.

Stoga ima smisla uvek se iznova vraćati Fajnmanu, i stoga je svaki izdavački poduhvat ove vrste istinski intelektualni i duhovni praznik. Umesto lažnih veličina kojima smo svaki dan zasipani iz medija i kontinuiranog ispiranja mozga prolaznim i besmislenim vestima, umesto bezbrižne iracionalnosti nakaradne postmoderne, plasirane pod pompeznim nazivima poput „hermeneutike“ ili „heterogenosti jezičkih igara“, u čitanju Fajnmana dobijamo veliku tradiciju Prosvetiteljstva u njenom najboljem i najplemenitijem izdanju. On pokazuje žilavost razuma nasuprot svim izazovima pomodne iracionalnosti i medijski promovisanog bezumlja.

U susret Fajnmanovoj stogodišnjici, najmanje što se može reći jeste da je džin sa Kalteha življi danas nego ogromna većina naših formalnih savremenika, čak i među naučnicima. On ostaje kao inspiracija stalno novim generacijama mladih i ozbiljnih ljudi, koji bez obzira koliko bili u manjini, predstavljaju kreativnu snagu i nadu čovečanstva, danas, kao i u svim prošlim i budućim epohama.

*Milan M. Ćirković*

---

# Predgovor

Priповest o tome kako smo spoznali svetlost dramatična je i puna preokreta sudbine.

Foton je najvidljivija elementarna čestica: zadesite li se po sunčanom danu u sobi punoj prašine, s otvorenim prozorčićem, videćete mnoštvo tih vragolana kako lete kroz sobu. Njutm je sasvim logično zaključivao da se svetlost sastoji od niza čestica (korpuskula), ali i on je gajio izvesne sumnje; difrakcija svetlosti se lepo mogla opaziti čak i u sedamnaestom veku. Difrakcija i drugi fenomeni su, na kraju, pokazali da je svetlost van svake sumnje elektromagnetni talas. U Maksvelovim jednačinama elektromagnetizma, tom spomeniku fizici devetnaestog veka, svetlost je formulisana kao talas. Onda se pojavio Ajnštajn i objasnio fotoelektrični efekat postulirajući da je svetlost suma paketića (kvanta) energije. Tako su rođene reč foton i kvantna teorija svetlosti. (Neću se na ovom mestu osvrnuti na čuvenu činjenicu da je Ajnštajn bio netrpeljiv prema kvantnoj mehanici premda je i sam za nju zaslužan.) U međuvremenu, od dvadesetih do četrdesetih godina prošlog veka, fizičari su temeljno

proučavali kvantno ponašanje materije (atoma). Tim pre je nejasno zašto je kvantno ponašanje svetlosti i njena interakcija s elektronima odolevalo naporima najboljih i najrudrijih da ga objasni, prevashodno Pola Diraka i Enrika Fermija. Fizika je morala sačekati da tri mladića, Fajnman, Švinger i Tomonoga, koje su, izgleda, iskustva iz Drugog svetskog rata ispunila i optimizmom i pesimizmom, dođu do ispravne formulacije kvantne elektrodinamike, odnosno teorije QED.

Ričard Fajnman (1918–1988) bio je ne samo vrstan fizičar, već i izvanredna figura, raskošna ličnost kakva među teorijskim fizičarima pre i posle njega nije viđena. Tu i tamo, fizičari će u trenucima dokolice porediti doprinose Fajnmana i Švingera, dvojice dobrih jevrejskih momaka iz Njujorka koji su rođeni iste godine, a umalo su iste godine i umrli. Ta besmislena diskusija nema svrhu, ali pomenimo da je Džulijan Švinger bio stidljiv i povučen (iako se iza te spoljašnje suzdržanosti krila veoma topla i dobrodušna osoba) a Dik Fajnman izuzetno otvorena ličnost, dobra građa za legendu. Po svojim bongo bubnjevima, zabavljačicama i drugim detaljima pažljivo gajenog imidža koji je vojska pokojnika s oduševljenjem pothranjivala, bez sumnje je uz Ajnštajna jedan od najvoljenijih teorijskih fizičara.

Briljantni ruski fizičar Lav Landau je imao čuvenu logaritamski skalnu za rangiranje teorijskih fizičara, na čijem vrhu je bio Ajnštajn. Dobro je poznato da je, formulisavši teoriju faznih prelaza, povećao sebi rang za pola stepena. I ja imam skalnu po kojoj, šale radi, rangiram teorijske fizičare koje znam lično ili po čuvenju. Da, tačno je: većina teorijskih fizičara je glupa kao točak i na ovoj logaritamskoj skali imaju pozicije blizu minus beskonačno. Šredingera (o kome ću više kasnije) svrstavam na vrh, ali Fajnman izvesno ne bi mnogo zaostajao. Ne mogu vam reći gde sam ja na svojoj skali, ali pokušavam

da se što više zabavljam, s ograničenim talentom i resursima na raspolaganju.

Samo da znate koliko je Fajnman bio zabavan! Negde na početku moje karijere pozvao me je da izađemo u noćni klub. Jedan njegov kolega objasnio mi je kako poziv znači da me je ozbiljno shvatao kao fizičara, ali dok sam ja goreo od želje da mu izložim svoje mišljenje o Jang–Milsovoj teoriji, njega je samo zanimalo šta mislim o nogama igračice na bini. Naravno, u eri obožavanja medijskih zvezda, nikog nije briga za luckastog fizičara koji svira bubnjeve i voli zabavljačice. Zato, priznajem, moja skala zapravo vrednuje fizičare po formuli „zabava *puta* talenat“. To je Landauova skala u koju je ukalkulisana zabava, te Ajnštajn na njoj pada, a Landau se uspinje (Landau je izvodio sjajne neslane šale dok ga se KGB nije dočepao).

Danas, tridesetak godina posle izlaska u noćni klub, osetio sam se počašćenim kada me je Ingrid Gnerlih iz izdavačke kuće Princeton University Press zamolila da napišem uvod za novo izdanje čuvene Fajnmanove knjige *QED: Neobična teorija svetlosti i materije*. Prvo da priznam: pre toga nisam pročitao *QED*. Kada je delo objavljeno 1985. upravo sam bio završio svoju prvu knjigu iz popularne nauke, i manje-više sam se držao pravila da ne čitam druge knjige iz popularne fizike iz bojazni da bi mogle uticati na moj stil. Zato sam knjigu koju mi je Ingrid poslala pročitao bez ikakve prethodne predstave o tom delu a ipak duboko svestan njegove vrednosti. Neizmerno sam uživao čitajući i beležio sam pritom svoja zapažanja.

Pogrešio sam što je nisam ranije pročitao, naročito zato što nije reč o uobičajenoj knjizi iz popularne fizike. Kad mi je Stiven Vajnberg 1984. godine predložio da napišem knjigu te vrste i ugovorio mi sastanak sa svojim urednikom u Njujorku, dao mi je koristan savet. Rekao je da se većina fizičara koji se late

pisanja takve knjige ne mogu odupreti porivu da objasne sve, dok čitalac laik samo hoće da stekne iluziju kako je razumeo materiju i želi da upamti nekoliko bombastičnih reči kojima bi mogao zadiviti društvo na koktelima.

Smatram da je Vajnbergov stav, iako donekle ciničan, u velikoj meri ispravan. Setimo se ogromnog uspeha Hokingove knjige *Kratka povest vremena* (koju nisam pročitao iz pomenutog razloga). Nekadašnji kolega s Kalifornijskog univerziteta, istaknuti fizičar, sada profesor na Oksfordu, jednom mi je pokazao rečenicu iz te knjige. Obojica smo uzaman pokušali da dokučimo njen smisao. Stoga sam hteo da budem siguran kako svaka rečenica u ovoj knjizi, iako naizgled bizarna da bizarnija biti ne može, ima smisla. Ali morate pažljivo da razmislite o svakoj rečenici i date sve od sebe da shvatite o čemu Fajnman govori pre nego što nastavite da čitate. U suprotnom, siguran sam da ćete se izgubiti bez nade za povratak. Nije fizika bizarna, već način na koji je predstavljena. Najposle, i naslov obećava „neobičnu teoriju“.

Kako je Fajnman bio takav kakav jeste, odabrao je da postupi sasvim suprotno Vajnbergovom savetu (koji igrom slučaja ni sam nisam do kraja sledio – pogledajte moje zapažanje o teoriji grupa nešto niže u tekstu). Fajnman je u zahvalnici ocrneo knjige iz popularne fizike, istakavši da se u njima postiže „navodna jednostavnost tako što se opisuje nešto drugo, nešto što je uveliko izmenjeno pa se bitno razlikuje od onog što autor navodno opisuje“. Umesto toga, zacrtao je sebi da opiše QED čitaocu laiku bez „izobličavanja istine“. Zato ovo delo ne smatrajte tipičnom knjigom iz popularne fizike. S druge strane, ona nije ni udžbenik, već čudna mešavina.

Da bih objasnio kakva je ova knjiga, pomoći ću se Fajnmanovom analogijom, donekle izmenjenom. Prema Fajnmanu,

QED možete savladati na dva načina: ili nakon sedmogodišnjeg obrazovanja iz fizike ili čitanjem ove knjige. (Brojka je donekle preuveličana: u današnje vreme bistar student bi posle završene srednje škole i s odgovarajućim usmeravanjem to verovatno postigao za manje od sedam godina.) Dakle, i nemate izbora, zar ne? Naravno, valjalo bi da odaberete čitanje ove knjige! Čak i ako razmišljate nad svakom rečenicom kako sam vas savetovao, ne bi trebalo da je čitate duže od sedam nedelja, nipošto sedam godina.

Po čemu se razlikuju pomenuta dva načina? Evo moje verzije analogije: majanski sveštenik objavljuje da će vâs, prosečnog pripadnika majanskog društva, za izvesnu nadoknadu naučiti da množite dva broja – na primer, 564 i 253. Kaže vam da zapamtite tabelu veličine  $9 \times 9$ , a potom i da nađete dve poslednje cifre brojeva koje treba da pomnožite (dakle, 4 i 3) i da kažete šta se nalazi u ćeliji na preseku četvrtog reda i treće kolone tabele. Vi kažete „dvanaest“. Naučili ste kako treba da zapišete 2 i prenesete 1, šta god to značilo. Posle toga, treba da kažete šta je u ćeliji na preseku šestog reda i treće kolone (18), čemu ćete, kako vam je naloženo, dodati broj koji prenosite. Naravno, morali biste godinu dana učiti da sabirate. Sad vam je jasno na šta mislim. To biste naučili pošto biste platili školarinu na prestižnom univerzitetu.

Umesto toga, jedan domišljat tip po imenu Fajnman obraća vam se: „Ma, ako znaš da brojiš, ne moraš da učiš sve te otmene stvari o prenošenju i sabiranju! Samo skupi 564 tegle, potom u svaku stavi 253 oblutka, izvorni sadržaj svih tegli na ogromnu gomilu i prebroj sve oblutke. To je odgovor!“

Dakle, Fajnman ne samo da vas uči kako da množite, već vam temeljno objašnjava šta rade visoki visoki sveštenici i njihovi učenici, oni ljudi sa doktoratima sa prestižnih univerziteta!

S druge strane, ako naučite da množite na Fajnmanov način, ne biste baš mogli da se prijavite za posao računovođe. Kad bi šef zatražio od vas da po čitav dan množite velike brojeve, bili biste iscrpljeni, a studenti univerziteta visokosveštenstva bi vas isprašili.

Dopustite da čitaoce ovog uvoda svrstam u tri kategorije: (1) studenti koje bi ova knjiga mogla nadahnuti da magistriraju na kvantnoj elektrodinamici, (2) inteligentni laici koje zanima kvantna elektrodinamika i (3) profesionalni fizičari poput mene.

Ako pripadate prvoj kategoriji, ova knjiga će vas neizmerno nadahnuti i podstaknuti – toliko da ćete poželeti odmah da se bacite na udžbenik iz kvantne teorije polja. Uzgred, QED se danas smatra relativno jednostavnim primerom kvantne teorije polja. Ali, kao u analogiji, po čitanju ove knjige nećete automatski postati stručnjak. Morate da naučite ono što Fajnman naziva „zahtevan, efikasan način“ množenja brojeva. Uprkos Fajnmanovoj obnarodovanoj želji da sve objasni od samog početka, on vidljivo posustaje u tome kako tekst odmiče. Na primer, na 86. strani i na slici 56, jedva da je objasnio bizarnu zavisnost od  $P(A \text{ do } B)$  na „intervalu  $I$ “, i vi, naprosto, morate da mu verujete na reč. U knjizi *Orahova ljuska*, ta zavisnost je izvedena. Slično je i sa formulom za  $E(A \text{ do } B)$  opisanoj u fusnoti na 88. strani.

Ukoliko ste u drugoj kategoriji, istrajte i bićete nagrađeni, verujte mi. Ne brzajte. Čak i ako pređete samo prva dva poglavlja, prilično ćete naučiti. Zašto je ovu knjigu tako teško čitati? Vratimo se majanskoj analogiji: to je kao da učite nekog da množi pomoću tegli i oblutaka, a on ne zna čak ni šta je tegla ili oblutak. Fajnman pokušava posredno da vam objasni stvari govoreći o fotonima od kojih svaki ima malu strelu, i kako



sabirate i množite ove fotone, smanjujući i rotirajući ih. To je sve vrlo zbunjujuće, i ne smete dozvoliti da vam pažnja popusti ni na trenutak. Uzgred, strelice su samo kompleksni brojevi (kao što se objašnjava u napomeni na stranicama 60 i 61), i ako već poznajete ovaj skup brojeva (i tegle i oblutke), razmatranje bi moglo biti nešto jasnije. Ili ste, možda, od onih Vajnbergovih tipičnih čitalaca laika, kojima je dovoljna iluzija da nešto razumeju. U tom slučaju, mogla bi vas zadovoljiti normalna knjiga iz popularne fizike. Ponovo ću se vratiti na majansku analogiju: normalna knjiga iz popularne fizike ne bih vas opterećivala tabelom dimenzija 9x9, prenošenjem, teglama ili oblucima. Iz nje biste se obavestili da visoki sveštenici znaju kako da naprave treći broj pomoću dva data broja. Zapravo, urednici knjiga iz popularne fizike insistiraju na tome da autori pišu na taj način kako ne bi zaplašili i odvratili kupce (detaljnije o tome nešto kasnije).

Na kraju, ako spadate u treću kategoriju, priželjkujete puni užitek. Premda se i sam bavim kvantnom teorijom polja i znam šta je Fajnman radio, ipak neizmerno uživam kada se u knjizi susretnem s poznatim fenomenom objašnjenim na zasenjjuće originalan i neobičan način. Uživao sam dok sam čitao Fajnmanovo objašnjenje zašto se svetlost kreće u pravoj liniji ili kako funkcionišu sočiva za fokusiranje (na 56. stranici: „Usporavanjem svetlosti koja prolazi kraćim putevima može se izvesti trik s Prirodom tako da se sve male strelice okrenu za isti ugao).

Vama, i samo vama, otkriću zašto je Fajnman drugačiji od većine profesora fizike. Zapitajte nekog profesora fizike zašto je, kada je reč o refleksiji svetlosti od staklene površine, dovoljno razmatrati samo refleksiju od prednje i zadnje površine. Tek nekolicina znaju odgovor (102. strana). Nije to zato što profesori fizike nisu dovoljno ućeni, već im ne pada na pamet da se

to zapitaju. Proučiće standardni Džeksonov udžbenik, položiti ispit i toliko od njih. Fajnman je dozlaboga dosadan mali koji stalno zapitkuje zašto!

Pošto uvedosmo tri kategorije čitalaca (ambiciozni student, inteligentni laik, stručnjak), svrstaćemo i knjige iz fizike u tri kategorije: udžbenici, knjige iz popularne fizike i dela koja zovem „izuzetno teške knjige iz popularne fizike“. Ova knjiga redak je primer dela iz treće kategorije i, u izvesnom pogledu, posrednik između udžbenika i knjige iz popularne fizike. Zašto je tako malo knjiga iz ove treće kategorije? Zato što „izuzetno teške knjige iz popularne fizike“ na smrt plaše izdavače. Čuvena je Hokingova izjava da svaka jednačina prepolovljuje prodaju knjige iz popularne nauke. Ne sporim da je to načelno istina, ali bih voleo da se izdavači manje plaše. Nije toliko reč o broju jednačina, već pre o tome da li bi knjige iz popularne nauke trebalo da sadrže poštenu predstavu teških koncepata. Kada sam pisao *Bojažljivu*, mislio sam kako je neophodno objasniti teoriju grupa da bi se razmotrila simetrija u modernoj fizici. Pokušao sam da ove koncepte učinim prijemčivijim pomažući se malim simbolima: kvadratićima i kružićima u koje su upisana slova. Ali prema želji urednika, pojednostavljivao sam izlaganje dok od njega nije ostalo gotovo ništa, a potom sam to što je preostalo premestio u dodatak. Fajnman je, s druge strane, umeo da poentira onako kako ne ume svaki fizičar pisac.

Dopustite da se vratim težim delovima u Fajnmanovoj knjizi. Mnogi čitaoci ove knjige već su čuli nešto o kvantnoj fizici. Zato će se s pravom zbunjeno zapitati, na primer, gde je talasna funkcija koja ima tako upadljivo mesto u drugim popularnim izlaganjima o kvantnoj fizici. Kvantna fizika dovoljno je zbunjujuća – kako jednom reče neki mudrac: „Šta će ti droga kad imaš kvantnu fiziku?“ Hajde da spasem zbunjenog čitaoca daljeg mozganja.

Ervin Šredinger i Verner Hajzenberg su bezmalo u isto vreme izmislili kvantnu mehaniku. Recimo, Šredinger je uveo talasnu funkciju određenu parcijalnim jednačinama da opiše kretanje elektrona, poznatu kao Šredingerova jednačina. Nasuprot tome, Hajzenberg je mistifikovao, govorio je o operatorima koji se primenjuju na nešto što je zvao kvantna stanja. Uveo je u fiziku čuveni princip neodređenosti, koji kaže: što se preciznije meri, na primer, pozicija kvantne čestice, njen impuls je neodređeniji i obrnuto.

Formalne teorije dvojice fizičara vidno se razlikuju, ali su se rezultati koje predviđaju za svaki fizički proces uvek poklapali. Kasnije se pokazalo da su dva formalizma identična. Danas se od svakog prosečnog studenta očekuje da lako prelazi iz jednog formalizma u drugi, primenjujući ih već prema tome koji je prigodniji datom problemu.

Šest godina kasnije, 1932. godine, Pol Dirak je predložio treći formalizam nešto jednostavnijeg oblika. Dirakova ideja je, po svemu sudeći, bila zaboravljena sve do 1941. godine, kada je Fajnman razvio i definisao ovaj formalizam, koji je postao poznat kao formalizam funkcionalnih integrala, ili formalizam suma svih istorija. (Fizičari se ponekad pitaju da li je Fajnman ovaj formalizam razvio ne znajući za Dirakov rad. Istoričari fizike su utvrdili da je odgovor odričan. Na zabavi u klubu Prinstonskog univerziteta, gostujući fizičar Herbert Džele predstavio je Fajnmanu Dirakovu ideju, a Fajnman je po razradio formalizam pred zadivljenim Dželom. Pročitajte članak iz časopisa *Reviews of Modern Physics* iz 1986. godine autora S. Švebera.)

Fajnman se u ovoj knjižici iz petnih žila trudi da objasni upravo taj formalizam. Na primer, na 41. stranici, kada sabira sve te strele, zapravo integrali (što je, naravno, termin za sabiranje iz matematičke analize) amplitude pridružene svim mogućim

putanjama koje je foton mogao da sledi da bi došao od tačke S u tačku P. Otud termin formalizam funkcionalnih integrala. Alternativni izraz *sumiranje istorija* takođe ćete lako shvatiti. Da su pravila kvante fizike relevantna za dešavanja na makroskopskom, ljudskom nivou, bile bi moguće sve alternativne istorije: Napoleon bi pobedio kod Vaterloa ili bi Kenedi izbegao atentatorov metak, a svaka istorija bila bi povezana s amplitudom koju sumiramo (sumiranje svih strelica).

Ispostavlja se da funkcionalni integral, kao funkcija konačnog stanja, zadovoljava Šredingerovu jednačinu. Funkcionalni integral je, u suštini, talasna funkcija. Zato je formalizam funkcionalnih integrala jednak Šredingerovom i Hajzenbergovom formalizmu. Zapravo, Fajnman i Hibs su napisali udžbenik u kome je ova jednakost jasno objašnjena. (Da, Fajnman je pisao i udžbenike – znate već, one dosadne knjige iz kojih učite kako da efikasno obavljate postupke kao što su prenošenje i sabiranje. I, da, pogodili ste: Fajnmanove udžbenike uglavnom su pisali njegovi koautori.)

Kako je Dirak–Fajnmanov formalizam funkcionalnih integrala sasvim identičan Hajzenbergovom formalizmu, mora da sadrži princip neodređenosti. Dakle, Fajnman je pomalo preterao kada je čilo odbacio princip neodređenosti na 53. i 54. strani. U najmanju ruku, možemo se zapitati nad semantikom: na šta je mislio kada je rekao da princip neodređenosti nije potreban? Pravo pitanje glasi da li je koristan.

Teorijski fizičari su ozloglašeni po svojoj pragmatičnosti. Koristiće bilo koju metodu dok god je najlakša. Ni traga od tmurnog matematičarskog insistiranja na strogosti i dokazu. Ako radi, dobro je!

U svetlu toga, koji je od tri formalizma najlakši – Šredingerov, Hajzenbergov ili Dirak–Fajnmanov? Odgovor zavisi od

problema. Na primer, kada je reč o atomima, kao što majstor i sam priznaje na strani 98, „dijagrami za ove atome bi uključivali toliko mnogo pravih i talasastih linija da bi njihovo crtanje bilo sasvim neshvatljivo!“ Šredingerov formalizam mnogo je lakši i fizičari njega primenjuju. Zapravo, formalizam funkcionalnih integrala za većinu praktičnih problema gotovo je beznađežno komplikovan a pošteno govoreći, u nekim slučajevima ga je nemoguće primeniti. Kada sam zapitao Fajnmana kako rešiti jedan takav nemogući slučaj, nije znao. S druge strane, bruceši pomoću Šredingerovog formalizma lako rešavaju ove naizgled nemoguće slučajeve!

Dakle, odgovor na pitanje koji formalizam je najbolji zavisi od problema, te teorijski fizičari u jednoj oblasti – na primer, atomski fizičari – prioritet daju jednom formalizmu, dok fizičari domena velikih energija možda radije pribegavaju drugom formalizmu. Logično je, onda, da se, kako se data oblast menja i razvija, pokaže da je određeni formalizam prigodniji od drugog.

Fokusiraću se na oblast za koju sam obučen, odnosno na fiziku velikih energija ili fiziku čestica, što je i Fajnmanovo glavno polje istraživanja. Zanimljivo, formalizam funkcionalnih integrala u fizici čestica dugo je bio na poslednjem mestu u trci između tri formalizma. (Uzgred, niko ne kaže da mogu postojati samo tri formalizma. Možda će kakav nadareni mladić izmisliti i četvrti formalizam!) Zapravo, formalizam funkcionalnih integrala bio je toliko komplikovan za rešavanje većine problema da je do kraja šezdesetih godina već bio potpuno pao u zaborav, a kvantna mehanika se gotovo isključivo predavala preko kanonskog formalizma (što je samo drugi naziv za Hajzenbergov formalizam, ali sama odrednica kanonski bi trebalo da ukaže na formalizam koji se najviše poštovao). Pomenuću

lično iskustvo: kao student, nikada nisam čuo za formalizam funkcionalnih integrala, iako sam osnovne i doktorske studije pratio na dva univerziteta na Istočnoj obali sa zavidnom reputacijom. (Pominjem Istočnu obalu jer je poznato da bi se formalizam funkcionalnih integrala intenzivno predavao u istočnoj enklavi Los Anđelesa.) Tek kada sam radio na postdoktorskom projektu na Institutu na napredne studije, meni i većini mojih kolega pažnju na formalizam funkcionalnih integrala, skrenuo je jedan ruski članak. Čak i tada, razni autoriteti su izražavali sumnje u vezi sa formalizmom.

Što je ironično, lično je Fajnman bio odgovoran za takvu žalosnu situaciju. Studenti su lako učili Fajnmanove „zabavne dijagramčiće“ (poput onih sa 114. strane). Džulijan Švinger jednom je s popriličnim ogorčenjem rekao da je „Fajnman uveo kvantnu teoriju među široke narodne mase“, misleći na to da bi svaki tupavac mogao da nauči nekoliko „Fajnmanovih pravila“, potom se proglasi za teoretičara polja i napravi solidnu karijeru. Generacije su učile Fajnmanove dijagrame ne razumevajući teoriju polja. Takvih univerzitetskih profesora ima i dan-danas!

Ali onda se početkom sedamdesetih desilo nešto gotovo nemoguće (što je možda pridonelo Fajnmanovoj misterioznosti koja je kao magična aura obavijala njegovu karijeru): počev, dobrim delom, od pomenutog ruskog rada, Dirak-Fajnmanov formalizam funkcionalnih integrala se vratio na velika vrata. Brzo je postao dominantan mehanizam za napredovanje u kvantnoj teoriji polja.

Fajnmana izuzetnim fizičarem čini upravo opisana „bitka za srca i umove“ između onih koji koriste Fajnmanove dijagrame i drugih, mlađih, što koriste Fajnmanove funkcionalne integrale. Dodaću da je reč „bitka“ donekle jaka: ništa ne sprečava fizičare da koriste obe metode, i sam sam tako postupao.

U svom udžbeniku integralni formalizam koristio sam od samog početka, jer stariji udžbenici prednost daju kanonskom formalizmu. Drugo poglavlje počeo sam odeljkom naslovljenim „Noćna mora profesora: pametnjaković na času“. U duhu svih onih lažnih priča o Fajnmanu, smislio sam priču o studentu pametnjakoviću koga sam nazvao Fajnman. Formalizam funkcionalnih integrala izveden je pomoću procedure uvođenja beskonačno mnogo ekrana i bušenja beskonačnog broja rupa u svakom ekranu, tako da na kraju ekrana više ne bude. Ali, kao u analogiji s majanskim sveštenstvom, posle ovog fajnmanovskog izvođenja, studente sam morao da učim kako da računaju (prenose i sabiraju). Zato sam morao da okrenem leđa lažnom Fajnmanu i prođem kroz detalje Dirak–Fajnmanovog izvođenja formalizma funkcionalnih integrala sa svim tehničkim zavrzlamama poput „umetanja jedinice kao sume kompletnog skupa ugaonih zagrada i uspravnih crta“. Fajnmanove knjige neće vam otkriti tehničke detalje! Uzgred budi rečeno, uspravne crte je uveo strog, lakonski Pol Dirak, kao levu zagradu. I Dirak je legenda za sebe: za jednom večerom sedeo sam kraj njega, a on jedva da je progovorio koju reč.

Zasmejalo me je onih nekoliko Fajnmanovih opaski na račun drugih fizičara. Na primer, Marija Gel-Mana, briljantnog fizičara i njegovog prijateljskog rivala na Kalifornijskom tehnološkom institutu, na 130. strani podrugljivo naziva „velikim inovatorom“. Donekle suprotno svom pažljivo negovanom imidžu pametnjakovića, žali se na 132. strani na snižavanje nivoa poznavanja grčkog jezika među fizičarima, dobro znajući da je Gelman skovao neologizam gluon a uz to je vrsni lingvista.

Svidele su mi se Fajnmanove šale na sopstveni račun koje su deo njegovog imidža. Na 146. strani, kada govori o „nekom budalastom fizičaru koji drži predavanje na Kalifornijskom

univerzitetu u Los Angelesu „, zapravo misli na sebe. Iako takva izjava zbilja jeste samo deo imidža, smatram je osvežavajućom, jer mi, teorijski fizičari, s vremenom bivamo sve pompezniji i sujetniji. Fajnmanu kog sam ja poznavao – a naglašavam da ga nisam dobro znao – izvesno se ne bi svideo takav trend. Nije li baš on jednom podigao silnu buku kad je namerio da se povuče iz Akademije nauka?

Vratimo se trima kategorijama potencijalnih čitalaca koje sam pomenuo. Čitaoci iz druge i treće kategorije neizmerno će uživati u knjizi, ali knjiga je zapravo napisana za one iz prve kategorije. Ukoliko gajite ambicije da postanete teorijski fizičar, progutajte ovu knjigu vođeni žestokom glađu za znanjem, a potom se bacite na udžbenik iz kvantne teorije polja da naučite kako se to tačno „prenosi“.

Dakle, možete li da savladate teoriju kvantnih polja? Naravno! Ne zaboravite šta je Fajnman rekao: „Što jedna budala shvati, i druga će.“ Mislio je na sebe i na vas!

*Entoni Zi*

profesor fizike na Kalifornijskom  
univerzitetu u Santa Barbari



---

# Zahvalnica

Ova knjiga sadrži predavanja o kvantnoj elektrodinamici koja sam održao na Kalifornijskom univerzitetu u Los Angelesu (UCLA), a zabeležio ih je i redigovao je moj dobar prijatelj Ralf Lejton. Rukopis je, nakon predavanja zapravo značajno izmenjen. Lejtonovo iskustvo u nastavi i pisanju bilo je ogromno značajno u ovom pokušaju da se centralni deo fizike predstavi široj publici.

Mnoga popularna izlaganja naučnih sadržaja postižu očiglednu jednostavnost samo zato što opisuju nešto sasvim drugo, prilično izopačenog u odnosu na ono što pretenduju da opišu. Poštovanje za temu ovih predavanja nije nam dozvolilo da krenemo tim putem. Kroz mnogo sati diskusija, pokušavali smo da postignemo maksimalnu jasnoću i jednostavnost bez kompromisa i izvrtanja istine.



QED



# 1

---

## Uvod

**A**liks Mautner je veoma zanimala fizika, i često je tražila da joj objasnim ovo ili ono. Sve je išlo dobro, baš kao i s grupom studenata s Kalteha koji su dolazili na jednočasovna predavanja četvrtkom, dok ne stignemo do najinteresantnijeg dela za mene: suludih koncepcija kvantne mehanike. Rekao sam joj da se mogu objasniti te ideje tokom jednog večernjeg sata – trebalo bi mi znatno više vremena – ali sam joj obećao da ću jednog dana pripremiti seriju predavanja o toj oblasti.

Pripremio sam nekoliko lekcija i otišao na Novi Zeland da ih prvo tamo održim – s obzirom na to da je Novi Zeland dovoljno daleko pa ne bi bilo strašno ako se ne pokažu uspešnim! Međutim, Novozelandčani su smatrali da su predavanja u redu, pa sam se konačno i ja složio – bar je to važilo za Novi Zeland! Evo predavanja koja sam stvarno pripremao za Eliks, ali, nažalost, sada ne mogu da joj ih lično održim.

Govoriću o delu fizike koji nam je jasan, a ne o njenom nepoznatom delu. Ljudi uvek pitaju za najnovije napretke u sjedinjavanju ove teorije sa onom, i pri tom nam ne daju prilike da im

išta kažemo o onim teorijama koje poznajemo prilično dobro. Oni uvek žele da saznaju ono što je nepoznato. Tako, umesto da vas suočim s gomilom nedopečenih, samo delimično analiziranih teorija, pričaću vam o oblasti koja je vrlo detaljno ispitana. Lično, volim tu oblast fizike i smatram je čudesnom: ona se zove kvantna elektrodinamika, skraćeno QED.\*

Glavni mi je cilj da u ovim predavanjima što tačnije opišem tu čudnu teoriju svetlosti i elektrona. Biće potrebno dosta vremena da objasnim sve što bih želeo, ali budući da imam četiri lekcije, do kraja će sve doći na svoje mesto.

Fizika ima dugačku istoriju spajanja mnogo fenomena u malo teorija. Tako su u stara vremena bili poznati fenomeni kretanja i toplote; takođe se znalo za fenomene zvuka, svetlosti i gravitacije. Ali, u jednom trenutku, nakon što je Isak Njutn objasnio zakone kretanja, shvaćeno je da su neke od ovih naizgled veoma različitih pojava zapravo samo razni aspekti jedne iste. Fenomen zvuka se, recimo, može potpuno objasniti kao kretanje atoma vazduha. Na taj način, zvuk prestaje biti zaseban od kretanja. Takođe je zapaženo da se toplotne pojave mogu lako razumeti kroz zakone kretanja. Tako su veliki delovi fizike ujedinjeni kroz jednostavnu teoriju. Teoriju gravitacije, sa druge strane, nije moguće razumeti na osnovu zakona kretanja, pa čak i danas ona stoji zasebno od drugih teorija. Gravitaciju nije moguće objasniti preko drugih pojava.

Nakon ujedinjenja kretanja, zvuka i toplote, otkriveno je više fenomena koje danas zovemo električnim i magnetnim. Godine 1873, Džejms Klark Maksvel je povezo te fenomene s pojavama svetlosti i optike, sugerišući da je svetlost zapravo

\* S obzirom na to da se u ogromnoj većini stručnih tekstova na svim jezicima ova skraćenica ostavlja u engleskom originalu (od Quantum ElectroDynamics), tako smo i ovde postupili. (*Prim. prev.*)

elektromagnetni talas. U tom stadijumu razvitka fizike, dakle, postojali su zakoni kretanja, zakoni elektromagnetizma i zakoni gravitacije.

Oko 1900. godine počela se razvijati teorija koja je objašnjavala strukturu materije. Nazvana je teorija elektrona, i tvrdila je da unutar atoma postoje sićušne naelektrisane čestice. Ova teorija je postepeno evoluirala pa je obuhvatila masivno atomsko jezgro (nukleus) sa elektronima koji se kreću oko njega.

Svi pokušaji da se kretanje elektrona u atomu rastumači po mehaničkim zakonima – analogno sa situacijom kada je Njutn primenio zakone kretanja da objasni kretanje Zemlje oko Sunca – pokazali su se potpuno neuspešni. (Uzgred, teorija relativnosti, koju svi doživljavate kao veliku revoluciju u fizici, takođe je bila razvijena u to vreme. Ali u poređenju sa otkrićem da Njutnovi zakoni kretanja ne funkcionišu unutar atoma, teorija relativnosti je samo manja modifikacija.) Za izradu novog sistema prirodnih zakona koji bi zamenio Njutnove zakone trebalo je dosta vremena upravo zato što su se fenomeni na atomskom nivou pokazali veoma neobični. Potrebno je, u izvesnom smislu, izgubiti zdrav razum da bi se razumelo šta se dešava na atomskoj skali. Konačno, 1926. je razvijena „nerazumna“ teorija za objašnjenje novog načina ponašanja elektrona u materiji. Ona je samo izgledala budalasto; nazvana je kvantna mehanika. Reč kvantna odnosi se na taj neobični aspekt Prirode koji se suprotstavlja zdravom razumu. Upravo o tom aspektu govorim u ovim predavanjima.

Kvantnomehanička teorija je takođe objasnila sve vrste detalja, primera radi, zašto se atom kiseonika kombinuje s dva atoma vodonika, čineći vodu. Kvantna mehanika na taj način obezbeđuje teorijsku podlogu za razvoj hemije. Tako je fundamentalna teorijska hemija u stvari fizika.

Pošto se kvantnomehantičkom teorijom objašnjava čitava hemija i razne osobine supstanci, ona je bila izuzetno uspešna. Ali i dalje je postojao problem interakcije svetlosti i materije. Drugim rečima, Maksvelova teorija elektriciteta i magnetizma se morala izmeniti da bi bila u skladu s novim principima kvantne mehanike. Stoga se 1929. godine pojavila nova teorija, delo čitavog niza fizičara, teorija interakcije svetlosti i materije koja je nazvana zastrašujućim imenom kvantna elektrodinamika.

Ali teorija je bila problematična. Ako ste želeli da nešto grubo izračunate, ona je davala razumne odgovore. Ukoliko biste pak pokušali da to isto izračunate preciznije, brzo biste pronašli: korekcija za koju ste očekivali da je veoma mala, ne samo da je značajna, već je zapravo *beskonačno velika!* Tako se ispostavilo da *ništa* nije moguće izračunati preko određene tačnosti.

Uzgred budi rečeno, ono što sam vam upravo skicirao moglo bi se nazvati fizičarska istorija fizike, koja nikad ne može biti tačna. Izlažem vam konvencionalnu mitologiju koju fizičari prenose svojim studentima, a zatim ti studenti prenose svojim studentima, i nije nužno verna stvarnom istorijskom razvoju koji ja zapravo ne poznajem!

U svakom slučaju, nastavljajući sa našom istorijom, zapažamo da je Pol Dirak, koristeći teoriju relativnosti, stvorio relativističku teoriju elektrona koja nije potpuno uzimala u obzir sve efekte interakcije elektrona sa svetlošću. Dirakova teorija je tvrdila da elektron poseduje magnetni moment – nešto nalik dejstvu malog magneta – čija je veličina u određenom sistemu jedinica jednaka tačno 1. Tada je, oko 1948. godine, u eksperimentima otkriveno da je stvarni broj zapravo 1,00118 (s neodređenošću od oko 3 u poslednjoj značajnoj cifri). Bilo je, naravno, poznato da elektroni interaguju sa svetlošću, tako da je izvesna mala korekcija očekivana. Takođe se očekivalo



da bi ova korekcija mogla da bude razumljiva iz nove teorije kvantne elektrodinamike. Ali kada su proračuni izvršeni, umesto 1,00118, rezultat je bio beskonačno veliki broj – što je svakako eksperimentalno pogrešno!

Ovaj problem kako izračunati konkretne stvari u kvantnoj elektrodinamici rešili smo Džulijan Švinger, Sin-Itiro Tomonaga i ja, krajem pedesetih. Švinger je prvi izračunao korekciju koristeći novi „trik“; njegova teorijska vrednost bila je oko 1,00116 – dovoljno blizu eksperimentalnom broju da pokaže kako smo na pravom tragu. Konačno smo stekli kvatnu teoriju elektriciteta i magnetizma s kojom se moglo računati! Tu ću vam teoriju opisati.

Teorija kvantne elektrodinamike je stara već više od pedeset godina, i bila je testirana sa sve većom tačnošću u sve širem i širem rasponu situacija. Danas ponosno ističem da *još uvek nema značajne razlike* između eksperimenta i teorije!

Samo da uočite kako teorija prolazi kroz sito i rešeto, navešću neke novije brojeve: eksperimenti su izmerili da je Dirakov broj 1,00115965221 (s neodređenošću od oko 4 u zadnjoj značajnoj cifri); teorija daje 1,00115965246 (s neodređenošću oko pet puta većom). Da biste stekli predstavu o preciznosti ovih brojeva, zamislite kako bi to bilo slično merenju daljine između Njujorka i Los Anđelesa uz preciznost jednaku debljini vlasi kose – toliko osetljivo je kvantna elektrodinamika bila proverena tokom poslednjih pedeset godina, i teorijski i eksperimentalno. Uzgred, izabrao sam samo jedan broj da to demonstriram. Ima i drugih veličina u kvantnoj elektrodinamici koje su izmerene sa sličnom tačnošću, i takođe se dobro slažu s predviđanjima. Te veličine su proveravane na skalama koje sežu od stotinu puta većih od Zemlje do stotog dela veličine atomskog jezgra. Svrha ovih brojeva je da vas zaplaše i ubede da teorija

sigurno ne može biti veoma pogrešna! Pre nego što okončamo ova predavanja, opisaću vam kako se vrše ovi proračuni.

Voleo bih da vas ponovo impresioniram širokim rasponom fenomena koje opisuje teorija kvantne elektrodinamike. Gotovo da je lakše to reći na suprotan način: teorija opisuje sve fenomene fizičkog sveta osim gravitacionih efekata, tj. sile koja vas drži u stolicama (zapravo, pretpostavljam da se tu radi o sadejstvu gravitacije i učtivosti), i fenomena vezanih za radioaktivnost gde spadaju atomska jezgra i njihovi skokovi između energetskih nivoa. Ako izostavimo gravitaciju i radioaktivnost (tačnije rečeno, nuklearnu fiziku), šta nam preostaje? Benzin koji sagoreva u automobilu, pena i mehurovi, tvrdoća soli ili bakra, otpornost čelika. Zapravo, biolozi pokušavaju da interpretiraju što više podataka o životu u terminima hemije, a kao što sam već pomenuo, teorija koja stoji iza hemije je kvantna elektrodinamika.

Neophodno je razjasniti sledeće: kada kažem da se svi fenomeni fizičkog sveta mogu objasniti ovom teorijom, mi to, zapravo, ne znamo. Većina poznatih fenomena uključuje *ogromne* brojeve elektrona, tako da naši ograničeni umovi veoma teško prate toliku složenost. U takvim situacijama, možemo koristiti teoriju da bismo grubo razjasnili šta bi trebalo dogoditi, i to je ono što se, uglavnom, u takvim uslovima *dogadja*. Ali ako u laboratoriji izvedemo eksperiment koji uključuje samo *nekoliko* elektrona u *jednostavnim* uslovima, tada veoma precizno možemo izračunati i takođe veoma precizno izmeriti sve što bi se moglo desiti. Kad god su takvi opiti vršeni, teorija kvantne elektrodinamike se pokazala jako uspešnom.

Mi, fizičari, uvek proveravamo kako bismo utvrdili postoji li neki problem s teorijom. To je suštinski značajno, jer je zanimljivo upravo ukoliko s teorijom *ima problema!* Ali do danas

nismo pronašli ništa problematično s kvantnom elektrodinamikom. Ona je stoga, usudio bih se da kažem, dragulj fizike – naš najvredniji posed.

Teorija kvantne elektrodinamike takođe je prototip za nove teorije koje teže da objasne nuklearne fenomene, pojave koje se odigravaju unutar atomskih jezgara. Ukoliko zamislimo fizički svet kao pozornicu, tada glumci nisu samo elektroni, koji su van atomskih jezgara, već i kvarkovi, gluoni i drugi – desetine čestica – unutar nukleusa. I mada ovi glumci izgledaju sasvim različito, svi igraju u posebnom stilu – neobičnom i teško shvatljivom – kvantnom stilu. Na samom kraju reći ću vam ponešto o nuklearnim česticama. U međuvremenu, govoriću samo o fotonima – česticama svetlosti – i elektronima, da bi izlaganje bilo što jednostavnije. *Način* na koji oni igraju važan je i interesantan.

Sada znate o čemu će nadalje biti reći. Pitam se da li ćete *razumeti* ono o čemu ću predavati? Svako ko dođe na naučno predavanje zna da ga neće razumeti, ali možda predavač ima šarenu kravatu u koju je prijatno gledati. Ne u ovom slučaju! (Fajnman nije nosio kravatu.)

Izneću gradivo za studente fizike na trećoj ili četvrtoj godini postdiplomskih studija – i vi mislite kako to nameravam objasniti tako da sve razumete? Ne, vi nećete to razumeti. Zbog čega se uopšte bakćem? Zašto vi sedite ovde sve vreme, kada nećete razumeti ono što nameravam da vam kažem? Moj je zadatak ubediti vas da se ne razočarate ako ne shvatite teoriju. Vidite, ni moji studenti je ne shvataju. Zato što je ni ja ne shvatam. Zato što je niko ne shvata.

Kažimo ponešto i o razumevanju izloženog. Kada pohađate predavanje, zbog mnogo čega može se desiti da ne razumete predavača. Možda loše predaje – ne govori ono što bi želeo

reći, ili to kaže naopako – i to je teško razumeti. To je prilično trivijalno, i ja ću se truditi da što više izbegavam svoj njujorški akcent.

Druga mogućnost, posebno bitna kad je predavač fizičar, jeste to što zabavno koristi reči. Fizičari često koriste obične reči, „rad“ ili „dejstvo“ ili „energija“ ili čak, kako ćete uskoro videti, „svetlost“, u strogo tehničkom kontekstu. Tako, kada govorim o „radu“ u fizici, ja ne mislim na isto kao kada pominjem „rad“ na ulici. Tokom ovog predavanja može se desiti da upotrebim neku od tih reči, a da ne primetim kako sam primenio taj neuobičajen smisao. Pokušaću da se kontrolišem – to mi je dužnost – ali takvu je pogrešku vrlo lako učiniti.

Sledeći razlog zbog kojeg vam se može činiti da ne razumete ono što vam govorim, jeste da dok vam ja opisujem *kako* Priroda funkcioniše, ne shvatate *zašto* Priroda funkcioniše na taj način. Ali morate imati u vidu da to niko ne razume. Ja vam ne mogu objasniti zašto se Priroda ponaša na ovaj ili onaj specifični način.

Konačno, postoji i ova mogućnost: nakon što vam ja nešto saopštim, vi ne možete poverovati u to. Vama se to ne sviđa. Mala zavesa pada i vi ne slušate više. Nameravam da vam opišem kako Priroda postupa – i ako se to vama ne dopada, teško ćete razumeti predavanje. Fizičari su naučili da se suočavaju s tim problemom: oni su naučili da prihvate kako *nije bitno* li im se neka teorija sviđa ili ne sviđa. Značajno je da li teorija daje predviđanja koja se slažu sa eksperimentom. Nije važno da li je teorija filozofski prijatna, ili se lako razume, ili je savršeno smisljena s tačke gledišta zdravog razuma. Teorija kvantne elektrodinamike opisuje Prirodu kao apsurdnu s tačke gledišta zdravog razuma. I ona se potpuno slaže sa eksperimentom. Tako se nadam da možete prihvatiti Prirodu kakva jeste – apsurdna.

Zabavno mi je da vam govorim o ovoj apsurdnosti, jer je smatram zadivljujućom. Molim vas, nemojte se ohladiti zato što ne verujete da je Priroda tako čudna. Samo me slušajte do kraja, i nadam se da ćete biti zadivljeni kao ja kada završim izlaganje.

Kako nameravam da vam objasnim stvari koje ne objašnjavam svojim studentima dok ne stignu do treće godine postdiplomskih studija? Dozvolite mi da upotrebim analogiju. Maje su bili veoma zainteresovani za izlazak i zalazak Venere kao Zornjače i Večernjače. Posle mnogo godina posmatranja, zapazili su da je pet Venerinih ciklusa skoro jednako osam njihovih nominalnih godina od 365 dana (bili su svesni da je prava tropska godina različita i izračunali su i to). Da bi obavili proračune, Maje su izumele sistem crtica i tačkaka koje su predstavljale brojeve (uključujući nulu), i imali su pravila po kojima su računali i predviđali ne samo izlaske i zalaske Venere, već i druge nebeske fenomene, poput pomračenja Meseca.

U to vreme, samo je nekoliko majanskih sveštenika znalo da obavi te složene proračune. Zamislimo da smo upitali jednog sveštenika kako se obavlja samo jedan mali korak u procesu predviđanja kada će Venera sledeći put izaći kao Zornjača – korak oduzimanja dva broja. I zamislimo da nismo išli u školu i ne znamo da oduzimamo. Kako bi nam sveštenik objasnio šta je oduzimanje?

On bi nas mogao naučiti brojevima predstavljenim crticama i tačkama i pravilima za njihovo oduzimanje, ili bi nam objasnio šta on stvarno radi: „Pretpostavimo da oduzimamo 236 od 584. Prvo, odbrojimo 584 zrna graška i stavimo ih u ćup. Tada izvadimo tačno 236 zrna i stavimo ih na stranu. Konačno, izbrojimo zrna preostala u ćupu. Taj broj je rezultat oduzimanja 236 od 584.“

Mogli biste uzviknuti: „Tako mi Kvecakoatla! Kakav *napor* – brojati zrna, stavljati ih unutra, vaditi ih – kakav težak posao!“

Na to bi sveštenik odgovorio: „Zato i imamo pravila za crtice i tačke. Pravila su teška, ali su mnogo efikasnija za dobijanje odgovora od brojanja zrna. Što je najvažnije, rezultat je isti: predvidećemo kad će se Venera pojaviti tako što brojimo zrna (što je sporo, ali je lako razumeti), ili ćemo primeniti teška pravila (što je mnogo brže, ali morate se godinama školovati).“

Razumeti *kako* se obavlja oduzimanje – sve dok ga ne morate izvesti – nije uistinu toliko teško. To je moje stanište: nameravam da vam objasnim šta fizičari rade kada predviđaju kako će se Priroda ponašati, ali ne nameravam da vas učim trikovima pomoću kojih biste to mogli uraditi *efikasno*. Otkrićete da ćete, zarad realističnih predviđanja unutar sheme kvatne elektrodinamike, morati da ispišete neverovatno mnogo malih strelica na listovima papira. Naši studenti fizike obučavaju se sedam godina (četiri godine dodiplomskih i tri godine postdiplomskih studija) da to rade efikasno i uspešno. Tako ćemo preskočiti sedam godina obrazovanja u fizici: objasnim li kvantnu elektrodinamiku u terminima onoga što *zapravo radimo*, nadam se da ćete je shvatiti bolje nego pojedini studenti!

Nadalje, možemo upitati sveštenika *zašto* je pet Venerinih ciklusa približno jednako 2920 dana, ili osam godina. Mogu postojati najrazličitije teorije o tom *zašto*, na primer, „20 je značajan broj u našem brojnom sistemu, a kada podelite 2920 sa 20, dobićete 146, što je za jedan veće od broja koji se na dva načina može prikazati kao zbir dva kvadrata“ i tako dalje. Ali ta teorija nema nikakve stvarne veze s Venerom. U modernim vremenima, naučili smo da takve teorije nisu veoma korisne.

Stoga, nemamo nameru da razmatramo *zašto* se Priroda ponaša kako se ponaša; nema dobrih teorija koje to objašnjavaju.\*

Do sada sam vas pokušavao dovesti u pravo stanje da me slušate. Ukoliko to nisam ostvario, nemamo izgleda na uspeh. Verujem da smo sada spremni da se otisnemo na put!

Otpočecemo sa svetlošću. Kada je Njutn počeo da razmatra svetlost, prvo je uočio da je bela svetlost mešavina različitih boja. Pomoću prizme, on je razdvojio belu svetlost u pojedinačne boje, ali kada je propustio svetlost jedne boje – na primer crvene – kroz drugu prizmu, utvrdio je da se ona ne može dalje razdvajati. Tako je Njutn otkrio da je bela svetlost mešavina različitih boja, a svaka je čista što znači da se ne može dalje rastavljati.

Zapravo, svetlost svake boje se može još jednom razdvojiti na drugačiji način, prema polarizaciji. Ovaj aspekt svetlosti nije ključan za razumevanje karaktera kvantne elektrodinamike, te ću ga radi jednostavnosti izostaviti – po cenu nepotpunog opisivanja teorije. Ovo majušno uprošćenje neće vas ni na koji način sprečiti da razumete predavanje. Ipak, moram biti pažljiv i pomenuti sve što izostavljam.

Kada u ovim predavanjima kažem svetlost, ne mislim samo na svetlost koju vidimo, od crvene do ljubičaste. Ispostavlja se da je vidljiva svetlost samo delić dugačke skale koja je analogna muzičkoj skali u kojoj postoje tonovi viši od onoga što ljudsko uho čuje, kao i oni dublji od čujnih. Skala svetlosti se može opisati brojevima – koji se nazivaju frekvencije – i kako se brojevi povećavaju, svetlost prelazi iz crvene u plavu, zatim

\* U najmanju ruku ova Fajnmanova tvrdnja bezuslovno je važila do novijeg napretka u kosmologiji, a naročito principa koji se od Karterovog izlaganja na IAU simpozijumu 1974. naziva *antropički*, i čitave nove discipline *kvantne kosmologije*. (Prim. prev.)

u ljubičastu, pa u ultraljubičastu. Mi ne vidimo ultraljubičastu svetlost, ali fotografske ploče, na primer, reaguju na nju. To je i dalje svetlost – jedino je broj drugačiji. (Ne bi trebalo biti toliko provincijalan: ono što detektujemo svojim instrumentom, okom, nije jedino na svetu!) Ako bismo nastavili da povećavamo frekvenciju, stigli bismo do  $x$ -zraka, gama-zraka itd. Ukoliko menjamo broj u suptornom smeru, tada iz plave prelazimo u crvenu, potom u infracrvenu svetlost (toplotno zračenje), zatim u mikrotalase, pa radio-talase. Za mene, sve je to svetlost. U većini primera navodiću samo crvenu svetlost, ali kvantna elektrodinamika se prostire preko čitavog spektra koji sam opisao, i ona stoji u osnovi svih ovih različitih fenomena.

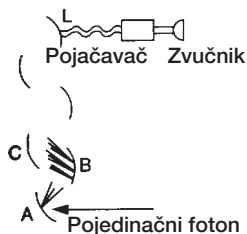
Njutn je smatrao da je svetlost sačinjena od čestica – koje je nazivao korpuskule – i bio je u pravu (mada je zaključivanje kojim je do toga došao bilo pogrešno). Mi znamo da se svetlost sastoji od čestica zato što možemo upotrebiti veoma osetljiv instrument koji se oglašava klikovima: kada ga obasjamo svetlošću, i kako svetlost postaje sve slabija, signali ostaju podjednako glasni – jedino se njihov broj smanjuje. Tako je svetlost nalik na kapi kiše – svaka mala količina svetlosti se naziva foton – i ako je svetlost samo jedne boje, sve „kapljice“ su iste veličine.

Ljudsko oko je veoma dobar instrument: uz svega pet ili šest fotona, aktiviraju se nervne ćelije i šalju signal u mozak. Kada bismo evoluirali još samo malo tako da vidimo deset puta preciznije, uopšte ne bismo morali razmatrati pojavu – svi bismo videli veoma slabu svetlost jedne boje kao seriju malih bleskova jednakog intenziteta.

Mogli biste se upitati kako je moguće detektovati pojedinačni foton. Jedan od uređaja koji to učini naziva se fotomultiplikator, i ukratko ću vam opisati kako on funkcioniše. Kada foton



SLIKA 1. Fotomultiplikator je u stanju da detektuje pojedinačni foton. Kada foton pogodi ploču A, jedan elektron je izbačen i privučen pozitivno naelektrisanom ploči B, i pri tom se izbacuje još elektrona. Ovaj proces se nastavlja, sve dok milijarde elektrona ne udare u poslednju ploču, L, i proizvedu električnu struju koja se pojačava standardnim pojačavačem. Ako je zvučnik povezan s pojačavačem, signali podjednake intenziteta (klikovi) čuju se svaki put kada foton date boje pogodi ploču A.



pogodi metalnu ploču A na dnu instrumenta, jedan elektron napusti jedan od atoma iz ploče. Slobodni elektron je snažno privučen ka ploči B (koja je pozitivno naelektrisana), i on udara o nju s dovoljnom energijom da izbaci tri ili četiri elektrona. Svaki elektron izbačen iz ploče B je privučen ka ploči C (koja je takođe naelektrisana), i u njihovim sudarima s pločom C izbacuje se još više elektrona. Ovaj proces se ponavlja deset ili dvanaest puta sve dok milijarde elektrona, dovoljne da formiraju merljivu električnu struju, ne udare u poslednju ploču, L. Ova struja se može pojačati običnim pojačavačem i poslati kroz zvučnik gde proizvodi čujan klik. Svaki put kada foton određene boje pogodi fotomultiplikator, čuje se klik iste jačine.

Ukoliko postavite mnogo fotomultiplikatora unaokolo i omogućite da veoma slaba svetlost sija u raznim pravcima, svetlost će upasti u jedan ili drugi detektor i proizvesti klik punog intenziteta. Situacija je „sve ili ništa“: ako se jedan fotomultiplikator oglasi u datom trenutku, nijedan drugi neće u istom momentu (izuzev u retkim situacijama, kad dva fotona napuštaju izvor svetlosti u egzaktno isto vreme). Nema deljenja svetlosti na polovine čestica koje bi išle na različita mesta.

Naglašavam da svetlost dolazi u obliku čestica. Veoma je važno da znate: svetlost se ponaša kao mlaz čestica, i to je

naročito bitno za one od vas kojima su u školi govorili da se svetlost ponaša kao talas. Ovde vam govorim kako se ona *odista* ponaša – kao čestice.

Mogli biste posumnjati da je problem u fotomultiplikatoru koji detektuje svetlost u vidu čestica, ali to nije tačno; svaki instrument koji dovoljno precizno detektuje slabu svetlost, uvek će otkriti isto: svetlost se sastoji od čestica.

Pretpostavljam da su vam poznata svojstva svetlosti koja se ispoljavaju u svakodnevnom životu – svetlost se prostire po pravoj liniji; prelama se kada prolazi kroz vodu; reflektuje se s površina kao što su ogledala, pri čemu je upadni ugao jednak izlaznom; može se rastaviti u boje; u blatnjavoj bari po kojoj se prolilo ulje vide se blistave boje; sočiva fokusiraju svetlost i tako dalje. Koristiću veoma poznate fenomene da ilustrujem zaista čudno ponašanje svetlosti; nameravam da objasnim te poznate fenomene jezikom teorije kvantne elektrodinamike. Ispričao sam vam o fotomultiplikatoru da ilustrujem osnovni fenomen s kojim možda niste bili upoznati – da se svetlost sastoji od čestica. Nadam se da vam je od sada i to jasno!

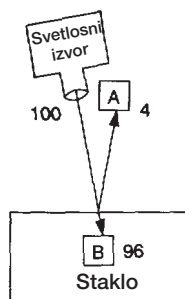
Razmotrimo poznatu pojavu: odbijanje svetlosti od nekih površina, poput vode. Postoje mnoge romantične slike Meseca reflektovanog s površine jezera (i mnogo puta ste verovatno i sami upali u nevolju zbog mesečine koja se odražava na vodi!). Kada pogledate u vodu, vidite ono što je ispod površine (posebno danju), ali takođe ćete videti i odraz s površine. Gledanje kroz staklo je još jedan primer: ako imate lampu u sobi, i danju gledate kroz zatvoren prozor, videćete kroz staklo i bleđi odraz lampe u sobi. Tako se svetlost delimično odbija s površine stakla.

Pre nego što nastavim, skrećem vam pažnju na pojednostavljenje koje ću sada sprovesti, a korigovaću ga kasnije: kada govorim o delimičnom odbijanju (refleksiji) svetlosti od stakla,

pretvaraću se da se svetlost odbija samo od *površine* stakla. U stvarnosti, komad stakla je strahovito složena stvar – veliki broj elektrona se kreće unaokolo kroz njega. Kada se pojavi foton, on međusobno deluje sa elektronima *u celom staklu*, ne samo na površini. Foton i elektroni obavljaju svojevrstan ples, čiji je konačni rezultat isti kao da je foton pogodio samo površinu. Napravimo sada to pojednostavljenje. Kasnije ću vam pokazati šta se zapravo dešava unutar stakla, tako da ćete razumeti zašto je rezultat uvek isti.

Sada ću opisati jedan eksperiment i saopštiću vam njegove začuđujuće rezultate. U ovom eksperimentu, neki fotoni iste boje – recimo crvene – emitovani su iz izvora svetlosti (slika 2) prema bloku stakla. Fotomultiplikator je postavljen u tački A, iznad stakla, da uhvati sve fotone koji se odbiju od gornje površine. Da bi se izmerilo koliko fotona prolazi kroz gornju

SLIKA 2. Eksperiment za merenje delimičnog odbijanja svetlosti od površine stakla. Na svakih 100 fotona koji napuštaju svetlosni izvor, 4 se odbijaju od prednje površine i završavaju u fotomultiplikatoru u A, a preostalih 96 prolazi kroz površinu i nastavlja ka fotomultiplikatoru u ploči B.



površinu, drugi fotomultiplikator je postavljen u B, unutar stakla. Zanemarujući trenutno očigledan problem – stavljanje fotomultiplikatora u stakleni blok – upitajmo se kakvi će biti rezultati eksperimenta?

Na svakih 100 fotona koji se emituju prema staklu pod pravim uglom, u proseku 4 stignu u A, a 96 u B. Tako, delimično

odbijanje znači da je 4% fotona reflektovano s prednje strane stakla, dok je ostalih 96% transmitovano kroz staklo. Već je ovo velika misterija: kako svetlost može biti *delimično* odbijena? Svaki foton završava put u A ili B – kako se pojedinačni foton odlučuje hoće li otići u A ili B? (Publika se smeje.) Ovo može zvučati kao šala, ali se ne možemo samo nasmejati; valja da to objasnimo u terminima teorije! Delimično odbijanje je samo po sebi velika zagonetka, i bilo je težak problem još za Njutna.

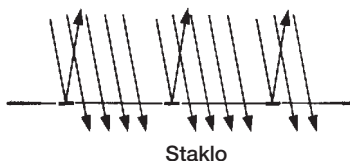
Postoji nekoliko teorija koje bi mogle objasniti delimičnu refleksiju svetlosti na staklu. Po jednoj, 96% površine stakla su rupe koje propuštaju svetlost, dok su ostala 4% površine pokrivena malim pegama reflektivnog materijala (slika 3). Njutn je brzo uvideo da ovo nije zadovoljavajuće objašnjenje.\* Uskoro ćemo se susresti s čudnom osobinom delimičnog odbijanja koja je potpuno suluda ako se držite teorije o rupama i pegama – ili bilo koje druge razumne teorije!

Po drugoj mogućoj teoriji, fotoni imaju unutrašnji mehanizam – točkice i zupčanike koji se pokreću. Kada je foton usmeren potpuno pravo, on prolazi kroz staklo, a kada nije usmeren pravo, on se odbija. Možemo proveriti ovu teoriju pokušavajući da eliminišemo fotone koji nisu potpuno pravo usmereni: dodaćemo nekoliko slojeva stakla između izvora i prve staklene

\* Kako je to zaključio? Njutn je bio velika ličnost; napisao je: „Zato što mogu da uglačam staklo.“ Mogli biste se zapitati, otkud je bio siguran da na staklu, pošto se može uglačati, neće biti rupa i pega? Njutn je sam glačao svoja sočiva i ogledala, i jako je dobro znao šta se dešava prilikom glačanja: na površini stakla se prave ogrebotine s prahom sve veće finoće. Kako ogrebotine postaju sve finije i finije, površina stakla menja svoj izgled: od mutnosivog (zato što velike ogrebotine rasejavaju svetlost) postaje providno i čisto (zato što svetlost prolazi kroz izuzetno fine ogrebotine). Tako je Njutn shvatio kako je nemoguće prihvatiti ideju da na svetlost mogu uticati male nepravilnosti kao što su ogrebotine, ili rupe, ili pege; zapravo, on je utvrdio suprotno. Najfinije ogrebotine (i takođe podjednako male pege) uopšte ne utiču na svetlost. Stoga teorija rupa i pega nije ispravna.

površine. Nakon što prođu kroz sve filtere, fotoni koji stižu na staklo trebalo bi da budu *svi* usmereni pravo i nijedan od njih ne bi trebalo da se reflektuje. Problem sa ovom teorijom je to što se ona ne slaže sa eksperimentom: čak i nakon prolaska kroz mnoge slojeve stakla, 4% fotona koji stižu na površinu odbija se od nje.

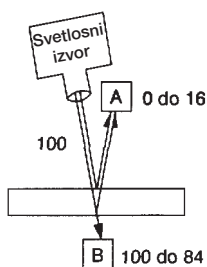
Koliko god pokušavali da izmislimo razumnu teoriju o tome kako se foton „odlučuje“ da li da prođe kroz staklo ili da se odbije, nemoguće je predvideti kojim će putem svaki dati foton krenuti. Filozofi su rekli da su predviđanja nemoguća i nauka će kolabirati ako isti uslovi ne proizvode uvek iste rezultate.



SLIKA 3. Po jednoj teoriji kojom se objašnjava delimično odbijanje s površine, pretpostavlja se da je površina sačinjena uglavnom od rupica koje propuštaju svetlost, dok nekoliko pegica odbija fotone.

Evo okolnosti – identični fotoni uvek dolaze iz istog pravca na isti komad stakla – koje proizvode različite rezultate. Mi ne možemo predvideti hoće li dati foton stići u A ili B. Samo možemo predskazati da će od 100 fotona koji se emituju, u proseku 4 biti odbijeno sa staklene površine. Znači li to da se fizika, nauka velike preciznosti, mora zadovoljiti pukim računanjem *verovatnoće* nekog događaja, a ne egzaktnim predviđanjem da li će se desiti? Da. To je u izvesnom smislu povlačenje, ali to je jedni put: Priroda nam omogućava samo da računamo verovatnoće. A nauka ipak nije kolabirala.

Dok je delimična refleksija od pojedinačne površine duboka misterija i težak problem, delimična refleksija s dve površine ili više površina potpuno je neshvatljiva. Pokazaću vam zašto. Izvršićemo drugi eksperiment, u kome ćemo meriti delimično odbijanje svetlosti od dve površine. Zamenićemo blok stakla vrlo tankom staklenom pločom – čije su obe površine potpuno paralelne jedna drugoj – i stavićemo fotomultiplikator ispod staklene ploče, naspram izvora svetlosti. Ovoga puta, fotoni se mogu odbiti s prednje ili zadnje površine stakla da bi završili u A; svi ostali će završiti u B (slika 4). Mogli biste očekivati da prednja površina reflektuje 4% svetlosti, i da zadnja površina



SLIKA 4. Eksperiment za merenje delimičnog odbijanja svetlosti od dve staklene površine. Fotoni mogu stići do fotomultiplikatora u A reflektujući se ili od prednje ili od zadnje površine staklene ploče; alternativno, oni mogu proći kroz obe površine i završiti u detektoru u B. Zavisno od debljine stakla od svakih 100 emitovanih iz izvora u fotomultiplikator u A stiže između 0 i 16 fotona. Ovi rezultati predstavljaju problem u svakoj razumnoj teoriji, uključujući onu prikazanu na slici 3. Izgleda da se delimično odbijanje može isključiti ili pojačati ukoliko se ukloni ili doda još jedna površina.

reflektuje 4% od preostalih 96%, što ukupno čini oko 8%. Tako ćemo, prema očekivanjima, utvrditi da će od svakih 100 fotona koji napuste izvor svetlosti, oko 8 stići u A.

U stvarnosti, pod pažljivo kontrolisanim eksperimentalnim uslovima broj fotona koji stižu u A retko iznosi 8 od 100. S nekim staklenim pločama stalno ćemo dobijati rezultate od 15 ili 16 fotona – dvostruko veće od očekivanog rezultata! S drugim staklenim pločama, stalno ćemo imati samo 1 ili 2 fotona. Treće staklene ploče, opet, mogu imati delimičnu refleksiju od

10%; neke potpuno eliminišu delimičnu refleksiju! Kako objašnjavamo ove sulude rezultate? Nakon što smo proverili kvalitet i homogenost raznih staklenih ploča, otkrivamo da se one malo razlikuju po debljini.

Učinimo seriju eksperimenata kako bismo proverili ideju da količina svetlosti koju odbijaju dve površine zavisi od debljine stakla: počevši s najtanjom staklenom pločom, brojaćemo koliko fotona detektuje fotomultiplikator u A svaki put kada 100 fotona biva emitovano iz izvora svetlosti. Tada ćemo zameniti staklenu ploču nešto debljom i ponoviti merenje. Nakon ponavljanja cele procedure više desetina puta, kakve rezultate dobijamo?

Sa najtanjim slojem stakla, utvrđujemo da je broj fotona koji stižu u A skoro uvek nula – neki put dobijemo 1. Kada zamenimo najtanji sloj nešto debljim, vidimo da je količina reflektovane svetlosti veća – blizu očekivanih 8%. Posle još nekoliko povećanja debljine, broj fotona koji stižu u A prelazi granicu od 8%. Kako nastavljamo da stavljamo sve deblje staklene ploče – sada smo blizu 12 milionitih delova centimetra – količina svetlosti koju odbijaju dve površine dostiže maksimum od 16%, i tada opada, preko 8% ponovo do nule – ako je sloj stakla tačno određene debljine, uopšte nema refleksije. (Pokušajte da to izvedete s rupicama!)

Uz postupno povećavanje debljine staklenih slojeva, delimična refleksija se ponovo uvećava do 16% i vraća do nule – ciklus se stalno ponavlja (slika 5). Njutn je otkrio ove oscilacije i učinio jedan eksperiment koji bi se mogao korektno interpretirati jedino ako se oscilacije nastavljaju kroz najmanje 34.000 ciklusa! Danas, s laserima koji proizvode veoma čistu, monohromatsku svetlost, možemo utvrditi da se ciklusi nastavljaju i nakon više od 100 miliona ponavljanja – što odgovara staklu debelom preko 50 metara. (Mi ne zapažamo ovaj fenomen u svakodnevnom životu zato što svetlosni izvori obično nisu monohromatski.)

Tako se ispostavlja da je naše predviđanje od 8% ispravno kao totalni prosek (pošto količina varira od nule do 16%), ali je egzaktno tačno samo na dva mesta u čitavom ciklusu – kao zastavljeni časovnik (koji pokazuje tačno vreme dvaput dnevno). Kako bismo objasnili ovo neobično svojstvo, delimičnu refleksiju, koje zavisi od debljine stakla? Pošto prednja površina odbija 4% svetlosti (kao što smo potvrdili prvim eksperimentom), kada, postavljajući drugu površinu na tačno određenu udaljenost ispod nje, možemo na neki način isključiti refleksiju?



SLIKA 5. Rezultati eksperimenta preciznog merenja odnosa između debljine sloja stakla i delimičnog odbijanja demonstriraju fenomen koji se naziva interferencija. Kako se debljina stakla povećava, delimično odbijanje prolazi kroz cikluse od nule do 16%, bez znakova prigušivanja.

I kako stavljanjem druge površine na nešto drugačiju udaljenost, možemo pojačati odbijanje sve do 16%? Je li moguće da zadnja površina utiče na sposobnost prednje površine da odbija svetlost? Šta se dešava ako stavimo i *treću* površinu?

S *trećom* površinom, ili ma koliko dodatnih površina, količina delimično odbijene svetlosti se ponovo menja. Vidimo da treba juriti površinu za površinom, ne znajući da li smo konačno dostigli poslednju. Da li foton mora sve to činiti kako bi odlučio da li da se odbije od gornje površine?

Njutn je naveo ingeniozne argumente u vezi sa ovim problemom, ali je na kraju shvatio da nije još razvio zadovoljavajuću



teoriju.\* Tokom mnogih godina posle Njutna, delimična refleksija od dve površine je uspešno objašnjavana talasnom teorijom.† Ali kada su izvršeni eksperimenti s veoma slabom svetlošću

\* Srećna je okolnost što je Njutn bio ubeđen da se svetlost sastoji od korpuskula; zato na njegovom primeru vidimo kroza šta sve inteligentan um mora proći da bi pokušao da objasni delimičnu refleksiju o dve ili više površina. (Oni koji su verovali da je svetlost talasne prirode, nikada se nisu morali mučiti s tim.) Njutn je tvrdio da se svetlost ne odbija s gornje površine, iako se čini da se tako dešava. Da to zaista čini, kako bi onda svetlost reflektovana s gornje površine bila ponovo uhvaćena kada je staklo takve debljine da gotovo uopšte r nema efleksije? Tada se svetlost mora reflektovati s druge površine. Ali da bi se objasnila činjenica da debljina stakla određuje količinu delimične refleksije, Njutn je predložio sledeću ideju: svetlost koja pogađa prvu površinu emituje talase ili polje koje putuje zajedno sa svetlošću i određuje da li će se ona odbiti od druge površine ili neće. On je nazvao ovaj proces udari lake refleksije ili lake transmisije, i oni se odigravaju u ciklusima, zavisno od debljine stakla.

Postoje dve teškoće sa ovom idejom. Prva je efekat dodatnih površina – svaka nova površina utiče na refleksiju – koji sam opisao u tekstu. Drugi problem je to što se svetlost sigurno odbija od jezera koje nema drugu površinu, tako da se svetlost ipak mora odbijati od gornje površine. Njutn je smatrao da svetlost ima predispoziciju da se odbija sa izolovanih površina. Možemo li imati teoriju po kojoj svetlost zna kakvu vrstu površine pogađa i da li je to jedina površina?

Njutn nije naglašavao ove teškoće sa svojom teorijom udara refleksije i transmisije, iako je jasno da je i sam znao kako teorija nije zadovoljavajuća. U Njutnovu vreme, teškoće s teorijom su ovlaš tretirane ili čak prikrivane – što je različit naučni stil od današnjeg, gde se ističu mesta na kojima se naša teorija ne slaže sa eksperimentom. Ne pokušavam da ovim kažem bilo šta protiv Njutna; samo želim da kažem nešto u prilog načina na koji danas komuniciramo u nauci.

† U toj teoriji se koristila činjenica da se talasi mogu kombinovati ili poništavati, i proračuni zasnovani na ovom modelu su reprodukovali rezultate i Njutnovih eksperimenata i onih izvršenih u potonjim vekovima. Ali kada su načinjeni instrumenti dovoljno precizni da detektuju pojedinačne fotone, talasna teorija je predviđala da će klikovi postajati sve tiši i tiši, iako su oni ostajali uvek u punoj snazi – samo su se oglašavali sve ređe i ređe. Nijedan razuman model nije mogao da objasni ovu činjenicu, tako da je jedno vreme valjalo biti veoma mudar: morali ste znati koji eksperiment analizirate da biste rekli je li svetlost talas ili čestica. Ovo konfuzno stanje se nazivalo talasno-čestični dualizam svetlosti, i neko je u šali rekao da je svetlost talas ponedeljkom, sredom i petkom, čestica utorkom, četvrtkom i subotom, dok u nedelju razmišljamo o svemu tome! Svrha ovih predavanja je upravo da vam objasni kako je ova zagonetka konačno rešena.

i fotomultiplikatorima, talasna teorija se srušila: kako je svetlost postajala slabija i slabija, fotomultiplikatori su nastavljali da proizvode klikove istog intenziteta – samo ih je bilo manje. Svetlost se ponaša poput čestica.

Danas nemamo dobar model da objasnimo delimičnu refleksiju od dve površine: mi samo računamo verovatnoću da pojedinačni fotomultiplikator detektuje foton koji se odbija od sloja stakla. Odabrao sam ovaj proračun kao prvi primer metoda koji nam obezbeđuje teorija kvantne elektrodinamike. Nameravam da vam pokažem kako „brojimo zrna graška“ – šta fizičari rade da bi dobili pravi odgovor. Ne nameravam da vam objašnjavam kako fotoni odlučuju da li da se odbiju o staklo ili da prođu kroz staklo; to nam nije poznato. (Verovatno je i samo pitanje besmisleno.) Pokazaću vam kako da izračunate korektnu *verovatnoću* da će svetlost biti reflektovana od stakla date debljine, jer fizičari samo to znaju da urade! Ono što činimo da bismo odgovorili na *ovo* pitanje analogno je onome što preduzimamo da dobijemo kao rešenje za *bilo koji drugi* problem kvantne elektrodinamike.

Biće potrebno da se pripremimo – ne zato što je to teško razumljivo, već zbog toga što je sasvim smešno: samo ćemo crtati strelice na listu papira – samo to!

Pa, kakve veze ima strelica s verovatnoćom da se neki događaj odigra? Prema zakonima brojanja graška, verovatnoća događaja je jednaka kvadratu dužine strelice. Na primer, u našem prvom eksperimentu (kada smo merili delimičnu refleksiju samo s gornje površine), verovatnoća da foton stigne u fotomultiplikator u A bila je 4%. To odgovara strelici čija je dužina 0,2 pošto je kvadrat od 0,2 jednak 0,04 (slika 6).

U našem drugom eksperimentu (kada smo zamenjivali tanke pločice stakla sve debljim i debljim), fotoni koji su se odbijali ili s gornje ili s donje površine stizali su u A. Kako crtamo strelicu

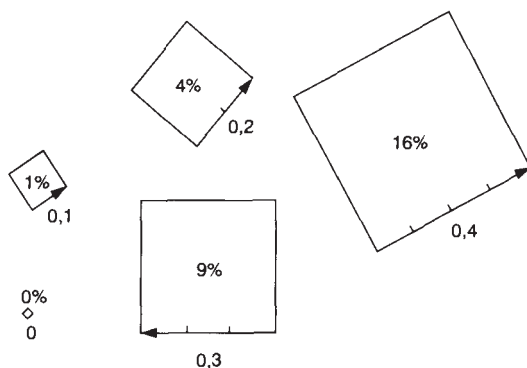
da predstavimo tu situaciju? Dužina strelice mora varirati od nula do 0,4 da bi odražavala verovatnoće između nula i 16%, zavisno od debljine stakla (slika 7).

Najpre razmotrimo različite *puteve* kojima foton može doći od izvora do fotomultiplikatora u A. Pošto smo usvojili pojednostavljenje da se svetlost odbija ili od gornje površine ili od donje, postoje dva puta kojima foton može stići u A. U ovom

SLIKA 6. Zbog čudnih osobina delimičnog odbijanja od dve površine, fizičari su se morali okrenuti proračunavanju verovatnoća događaja, umesto pravljenju apsolutnih predviđanja. Kvantna elektrodinamika pruža metod za to – crtanje strelica na papiru. Verovatnoća događaja je predstavljena površinom kvadrata dužine strelice. Na primer, strelica koja predstavlja verovatnoću od 0,04 (4%) ima dužinu 0,2.

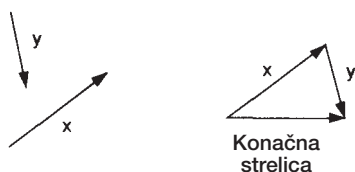


slučaju, crtamo *dve* strelice – po jednu za svaki način na koji se događaj može odigrati – i tada ih kombinujemo u konačnu strelu čiji kvadrat predstavlja verovatnoću događaja. Ako bi postojala tri različita načina da se događaj odigra, morali bismo nacrtati tri odvojene i onda ih kombinovati.



SLIKA 7. Strelice koje predstavljaju verovatnoće od 0% do 16% imaju dužine od 0 do 0,4.

Sada ću vam pokazati kako se kombinuju strelice. Recimo, hoćemo da kombinujemo strelu  $x$  sa strelom  $y$  (slika 8). Samo postavimo vrh strele  $x$  do početka strele  $y$  (ne menjajući pravac i smer nijedne), i nacrtajmo konačnu strelu od početka  $x$  do vrha  $y$ . To je sve. Tako možemo kombinovati bilo koji broj strelica (to se tehnički naziva sabiranje vektora). Svaka strela

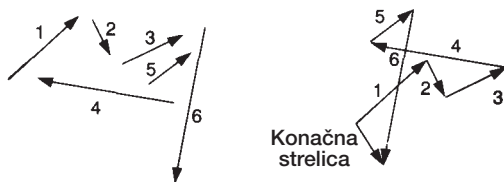


SLIKA 8. Strelice koje predstavljaju svaki mogući način na koji se jedan događaj može odigrati crtaju se odvojeno, a zatim kombinuju (sabiraju) na sledeći način: vrh jedne strelice se spoji s početkom druge – bez promene pravca i smera bilo koje – pa se konačna strelica nacrtava od početka prve strelice do vrha poslednje.

nam govori koliko daleko i u kojem pravcu se krećemo u plesu. Konačna strela nam pokazuje *jedan* pokret koji treba da učinimo kako bismo se našli na istom mestu (slika 9).

Koja pravila određuju dužinu i smer konačne strele? U ovom slučaju, kombinovaćemo dve strele – onu koja predstavlja refleksiju s gornje površine stakla i onu koja predstavlja refleksiju s donje strane.

Razmotrimo prvo dužinu. Kao što smo videli u prvom eksperimentu (gde smo postavili fotomultiplikator unutar stakla), gornja površina odbija oko 4% upadnih fotona. To znači da strelica za „gornju refleksiju“ ima dužinu od 0,2. Donja površina stakla takođe reflektuje 4%, tako da je „donja refleksija“ označena strelicom čija je dužina takođe 0,2.



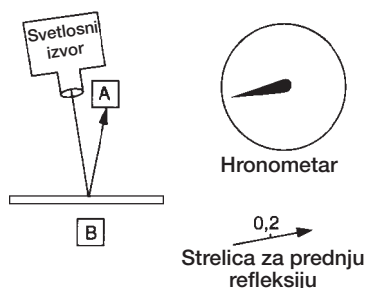
SLIKA 9. Bilo koji broj strelica se može sabrati kao što je prikazano na slici 8.

Da bismo odredili pravac svake strelice, zamislimo da imamo hronometar koji meri vreme prolaska fotona. Ovaj imaginarni hronometar ima jednu kazaljku koja se okreće veoma, veoma brzo. Kada foton napusti izvor, mi pokrećemo hronometar. Sve dok se foton kreće, kazaljka hronometra se okreće (oko 14.400 puta po centimetru za crvenu svetlost); kada foton završi u fotomultiplikatoru, mi zaustavljamo hronometar. Njegova kazaljka pokazuje određeni pravac. U tom pravcu ćemo nacrtati strelicu.

Potrebno nam je još jedno pravilo da bismo tačno izračunali odgovor: kada razmatramo put fotona koji se odbija od *prednje* površine stakla, obrnućemo smer strelice. Drugim rečima, dok strelicu za refleksiju sa *zadnje* površine crtamo u *istom* smeru kao kretanje kazaljke hronometra, strelicu za odbijanje od *prednje* površine crtamo u *suprotnom* smeru.

Nacrtajmo strelice za slučaj svetlosti koja se reflektuje od veoma tanke staklene ploče. Da bismo nacrtali strelicu za prednju refleksiju, zamislimo foton koji napušta izvor svetlosti (kazaljka hronometra počinje da se kreće), odbijajući se od prednje površine i stižući u A (kazaljka se zaustavlja). Crtamo strelicu dužine 0,2 u smeru suprotnom od smera kretanja kazaljke hronometra (slika 10).

SLIKA 10. U eksperimentu u kome merimo odbijanje od dve površine, možemo utvrditi da foton stiže u A jednim od dva moguća puta – s prednje ili sa zadnje površine. Strelica dužine 0,2 se crta za svaki od ta dva puta, s pravcem određenim kazaljkom hronometra koji meri vreme fotona na svakom putu. Strelica za prednju refleksiju se crta u smeru suprotnom od onog u kome se nalazi kazaljka kada prestane odbrojavanje.

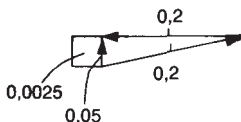
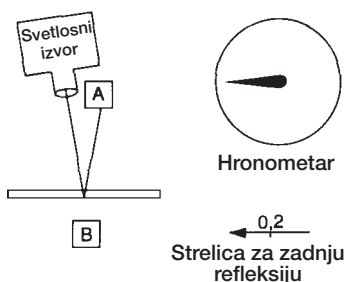


Da bismo nacrtali strelicu za refleksiju od zadnje površine, zamislimo foton koji napušta izvor svetlosti (kazaljka hronometra počinje da se vrti), prolazi kroz prednju površinu, odbija se od zadnje površine i stiže u A (kada se kazaljka zaustavlja). Ovoga puta, kazaljka pokazuje u gotovo istom pravcu, pošto fotonu koji se odbije sa zadnje površine treba tek veoma malo više vremena da stigne u A – on dvaput prolazi kroz tanak sloj stakla. Sada crtamo malu strelicu dužine 0,2 u istom smeru u koji pokazuje kazaljka hronometra (slika 11).

Sada saberimo dve strelice. Pošto su obe iste dužine, ali pokazuju u skoro suprotnim smerovima, dužina konačne strelice će biti gotovo jednaka nuli, i njen kvadrat je još manji. Stoga je verovatnoća da se svetlost reflektuje sa infinitezimalno tankog sloja stakla u suštini nula (slika 12).

Kada zamenimo najtanju staklenu ploču s nešto debljom, foton koji se odbija sa zadnje površine putuje nešto duže do A nego u prethodnom primeru; stoga se kazaljka hronometra više pomera pre nego što se zaustavi, i strelica za odbijanje od zadnje površine se nalazi pod nešto većim uglom nego strelica za odbijanje s prednje površine. Konačna strelica je nešto duža i njen kvadrat je odgovarajuće veći (slika 13).

SLIKA 11. Foton koji se odbija od zadnje površine tankog sloja stakla putuje nešto malo duže do tačke A. Zato se kazaljka hronometra zaustavlja u nešto drugačijem položaju kada je merila vreme fotona odbijenog od prednje površine. Strelica za zadnju refleksiju se crta u istom smeru kao i kazaljka.

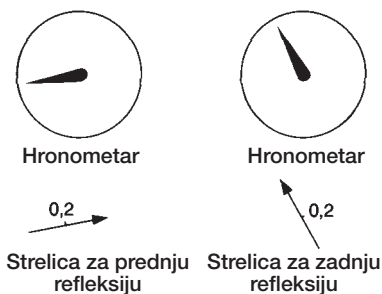


SLIKA 12. Konačna strelica, čiji kvadrat predstavlja verovatnoću odbijanja od veoma tankog sloja stakla, crta tako što se sabere strelica za odbijanje od prednje površine i strelica za odbijanje od zadnje površine. Rezultat je gotovo nula.

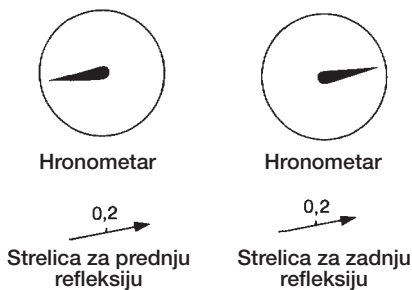
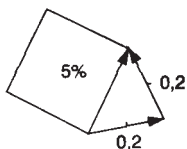
Kao još jedan primer, pogledajmo sledeći slučaj. Staklo je taman toliko debelo da kazaljka hronometra načini još jednu polovinu obrtaja kada se foton odbija od zadnje površine. Ovoga puta, strelica za zadnju refleksiju će pokazivati u potpuno istom pravcu kao i ona za prednju. Kada mi kombinujemo ove dve strelice, dobijamo finalnu strelicu dužine 0,4, čiji je kvadrat 0,16, što predstavlja verovatnoću od 16% (slika 14).

Ako povećavamo debljinu stakla taman toliko da kazaljka hronometra pri praćenju odbijanja od zadnje površine napravi još jedan *pun* krug više, naše dve strelice će pokazivati u suprotnim smerovima i konačna strelica će biti nula (slika 15). Ova situacija se stalno ponavlja, kad god je staklo taman toliko debelo da se razlika u putevima odslikava kao ceo broj punih krugova kazaljke.

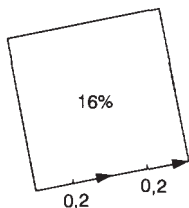
Ukoliko je debljina stakla taman tolika da kazaljka koja prati refleksiju sa zadnje površine napravi još  $\frac{1}{4}$  ili  $\frac{3}{4}$  kruga,



SLIKA 13. Konačna strelica za malo deblji sloj stakla je nešto duža od prethodne, zbog većeg ugla između strelica za prednju i zadnju refleksiju. To se dešava zato što foton koji se odbija od zadnje površine putuje nešto duže do detektora u A nego u prethodnom primeru.

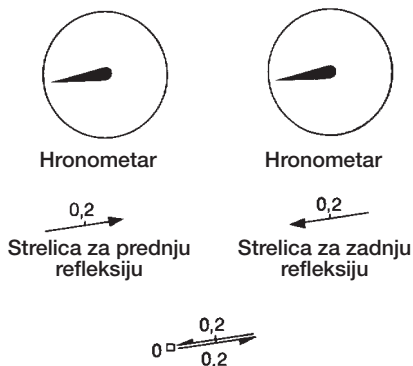


SLIKA 14. Kada je sloj stakla taman toliko debeo da kazaljka hronometra koji meri putno vreme napravi jedan dodatni poluokret, strelice za prednju i zadnju refleksiju pokazuju u istom pravcu i smeru, pa konačna strelica dužine 0,4 predstavlja verovatnoću od 16%.



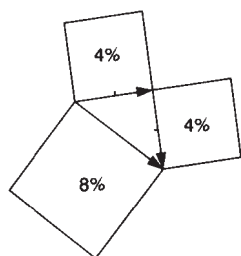


SLIKA 15. Kada je sloj stakla debljine taman tolike da kazaljka hronometra koji meri putno vreme fotona koji se odbija od zadnje površine stakla napravi još jedan okretaj, konačna strelica je ponovo nula i uopšte nema odbijanja.

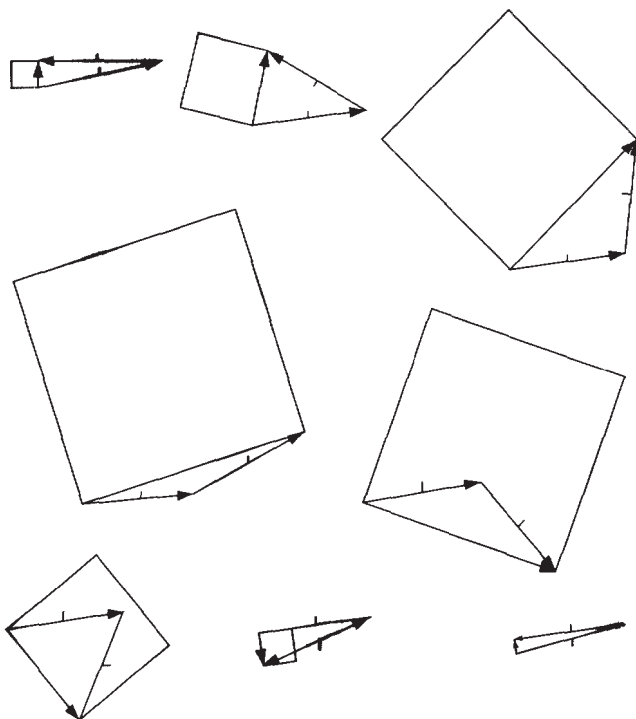


dve strelice će se naći pod pravim uglom. Konačna strelica u ovom slučaju je hipotenuza pravouglog trougla i, prema Pitagori, njen kvadrat jednak je zbiru kvadrata dve katete. Ova vrednost je ispravna dvaput dnevno, pošto  $-4\%$  i  $+4\%$  daju  $8\%$  (slika 16).

Zapazimo: kako postepeno uzimamo sve deblje staklo, strelica koja predstavlja refleksiju s prednje površine uvek pokazuje u istom pravcu i smeru, dok strelica za refleksiju sa zadnje površine postepeno menja pravac. Promena u relativnom pravcu dve strelice čini da zbirna strelica prolazi ciklično kroz dužine između nule i  $0,4$ ; stoga kvadrat konačne strelice ciklično prolazi kroz sve vrednosti između  $0$  i  $16\%$ , upravo kao što smo zaključili iz eksperimenata (slika 17).



SLIKA 16. Kada su strelice za prednju i zadnju refleksiju međusobno pod pravim uglom, konačna strelica je hipotenuza pravouglog trougla. Stoga je njen kvadrat zbir kvadrata druge dve strelice –  $8\%$ .



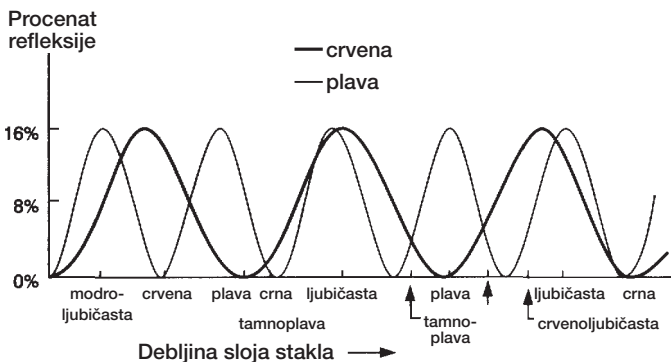
SLIKA 17. Kako se tanak sloj stakla zamenjuje sve debljim i debljim, kazaljka hronometra koji meri putno vreme fotona okreće se sve više, i relativni ugao između strelica za prednju i zadnju refleksiju se menja. Ovo prouzrokuje da konačna strelica menja dužinu i njen kvadrat se menja od 0 do 16% i nazad do nule, stalno iznova.

Upravo sam vam pokazao kako se ova čudna osobina delimičnog odbijanja može objasniti kad se na listu papira nacrtaju nekakve strelice. Tehnički izraz za ove strelice je amplitude verovatnoće, i ja se osećam svečanije kada izjavim da mi računamo amplitude verovatnoće određenog događaja. S druge strane, ipak više volim da budem sasvim pošten, pa navodim kako tražimo strelicu čiji kvadrat odgovara verovatnoći da se nešto dogodi.

Pre nego što okončam ovo uvodno predavanje, izneću vam nešto i o bojama na mehurovima od sapunice. Ili, još bolje, ako iz vašeg automobila curi ulje u baru, a vi pogledate smeđe ulje u prljavoj bari, videćete divne boje na površini. Tanak sloj ulja koji pluta na površini bare nalik je na veoma tanak sloj stakla – on reflektuje svetlost jedne boje od nule do maksimuma, zavisno od svoje debljine. Ako čistom crvenom svetlošću obasjamo tanak uljani sloj, videćemo mrlje crvene svetlosti, razdvojene tankim crnim prugama (gde nema refleksije), zato što debljina sloja ulja nije svuda jednaka. Ukoliko čistom plavom svetlošću obasjamo tanak sloj ulja, videćemo mrlje plave svetlosti razdvojene crnim trakama. Upotrebimo li i crvenu i plavu svetlost istovremeno, videćemo oblasti debljine neophodne za refleksiju crvene svetlosti i oblasti koje imaju debljinu neophodnu za refleksiju plave svetlosti; još neke oblasti će imati debljinu koja snažno reflektuje i crvenu i plavu svetlost (što naše oči vide kao ljubičastu boju), dok su druge oblasti takve debljine da poništavaju svu refleksiju i tako izgledaju crne.

Da bismo ovo bolje razumeli, valja znati da se ciklus delimičnog odbijanja od nule do 16% ponavlja brže za plavu nego za crvenu svetlost. Tako se pri određenim debljinama jedna ili obe boje snažno odbijaju, dok se u oblastima druge debljine odbijanje obeju boja poništava (slika 18). Ciklusi refleksije se ponavljaju različitim učestalostima zato što se kazaljka hronometra kreće brže kada meri plavi foton, nego u slučaju crvenog. Zapravo, brzina kazaljke hronometra jeste *jedina* razlika između plavog i crvenog fotona (ili fotona ma koje druge boje, uključujući radio-talase, rendgenske zrake i tako dalje).

Kada crvenom i plavom bojom obasjamo tanak sloj ulja, pojavljuju se crvene, plave i ljubičaste šare, razdvojene tamnim oblastima. Kada sunčeva svetlost, koja sadrži crvenu, žutu,



SLIKA 18. *Kako se debljina sloja stakla povećava, dve površine proizvode delimično odbijanje monohromatske svetlosti čija verovatnoća ciklično fluktuirá između 0% i 16%. Pošto je brzina zamišljenog hronometra različita za različite boje svetlosti, ciklusi se ponavljaju različitim učestalostima. Kada se dve boje, recimo čisto crvena i čisto plava svetlost usmere ka sloju, staklo date debljine će reflektovati samo crvenu, samo plavu, i crvenu i plavu svetlost u različitim proporcijama (što proizvodi različite nijanse ljubičaste) ili nijednu boju (crnilo). Ako sloj varira u debljini od mesta do mesta, kao što je slučaj s kapi ulja koja se širi po bari, sve ove kombinacije će se istovremeno pojaviti. U Sunčevoj svetlosti, koja je mešavina svih boja, nastaju sve vrste kombinacija, što proizvodi mnogo nijansi.*

zelenu i plavu svetlost, obasja baru na kojoj je ulje, oblasti koje snažno reflektuju svaku od ovih boja preklapaju se i proizvode sve vrste kombinacija koje naše oči vide kao različite boje. Kako se tanak sloj ulja širi i kreće preko površine vode, menjajući svoju debljinu u različitim tačkama, obojene šare se stalno menjaju. (Ako, s druge strane, gledate u istu baru sa uljem noću, uz svetlost jedne natrijumske ulične svetiljke, videćete samo žućkaste mrlje razdvojene crnilom – zato što te lampe emituju svetlost samo jedne boje.)

Ovaj fenomen boja koje proizvodi delimična refleksija bele svetlosti od dve površine naziva se iridescencija i može se pronaći na mnogim mestima. Možda ste se pitali kako nastaju blistave boje rajskih ptica i papagaja. Sada znate. Kako su te

briljantne boje evoluirale, takođe je zanimljivo pitanje. Kada se divimo bojama paunova, trebalo bi da zahvaljujemo generacijama bezbojnih paunica koje su birale svoje partnere. (Kasnije se pojavio čovek i usmerio proces prirodne selekcije kod paunova.)

Na sledećem predavanju pokazaću vam kako se ovim apsurdnim procesom kombinovanja strelica izračunavaju tačni odgovori za još neke fenomene koje znate: pravolinijsko prostiranje svetlosti; odbijanje svetlosti od ogledala pod istim uglom pod kojim ona na njega pada („upadni ugao jednak je odbojnom“); zašto sočivo fokusira svetlost i tako dalje. Uz ovaj novo-stečeni pogled, opisaću sve što znam o svetlosti.