

## Čudesni svijet kvantne mehanike

«Svijet je čudan», reče Jeremy. «U usporedbi s čim?» zapita Spider.

George MacDonald



### Najprije: Pozdrav Festivalu!

Festivalska fizika! Je li to nova fizikalna disciplina? S obzirom na definiciju da je *fizika sve ono čime se fizičari bave* (G. Alaga), možda i jest. Ili je to prodor fizike na estradu, pop-fizika glamuroznih spektakala koji privlače mase s pratećim mas-medijima? A možda je to pak samo fizika za razbibrigu, uz čašicu dobrog vina? Nije ništa od toga. *Festival popularnih predavanja* poslužio je fizičarima da budu više valoviti nego čestični, da provedu više vremena u superpoziciji stanja:

$$\psi(1,2) = c_1|\text{bavim se fizikom}\rangle + c_2|\text{družim se s ljudima}\rangle,$$

umjesto da cijelo vrijeme okupiraju prvo kvantno stanje i budu kolabirani u njemu. Kvantni skokovi među ljude-nefizičare poželjni su i zbog pravilnog  $\psi$ -razvoja svakog bića pa tako i ezoteričnih stvorenja zvanih fizičarima. Osim toga, fizičari mogu biti čestično lokalizirani samo ako su motreni! Ah taj festival, baš zabavno i valovito bješe i na ovaj način samo uputiti poželjih: Pozdrav Festivalu! Do slijedećeg podizanja zastave!

Dakle, svijet je takav kakav jest, jer drugoga za usporedbu nema, kako reče Spider. No, ima modela koje fizičari smišljaju i uspoređuju. I čine nam se tako različitim da je otac Niels Bohr morao izjaviti: *Onaj tko nije šokiran kvantnom teorijom ne može je razumjeti*. Ali uistinu cijela klasična teorija čestica i valova bila je samo priprema terena za nadolazeću kvantnu teoriju, višestoljetni preludij za probijanje psihološke barijere i spoznajni uzlet kakav se ne pamti u povijesti znanosti. Osim što je kvantna mehanika najuspješnija teorija svih vremena, s njezinom pojavom uistinu se dogodilo nešto posebno u razumijevanju odnosa nas spram svijeta oko nas. Fizičar je po prvi put izravno i neodvojivo uključen u fizikalno zbivanje. Dotad je bio subjektivno isključen. (Isključen? Čudno, kako može čovjek biti isključen iz bilo čega?) To je od Newtona do Heisenberga trebalo biti siguran znak da nešto nije u redu s našim poimanjem stvarnosti. Ali tek od pojave kvantne mehanike, fizičar, motreći primjerice elektron, shvaća da stupa u nedjeljivu vezu posebne vrste, koja čak ne mora uključivati nikakvu fizičku interakciju putem sile, niti mora uključivati izmjenu signala u skladu sa posebnom teorijom relativnosti, dakle stupa u čudnu kvantnomehaničku povezanost s elektronom tijekom koje mjeri osobine ne samo elektrona nego i mjernog uređaja, ali i samog sebe. Naime, kako bi rekao čovjek Bohr, čovjekova je svijest potrebna ne samo da smisli pokus, provede ga i interpretira njegov rezultat, nego i da *omogući postojanje* elementarne čestice! (Hm, kako je to čudno, čudesno, čarobno, Stvoriteljski čak). Objekt i subjekt koji tako drastično utječe na «objekt» da ga omogućuje, postali su jedno – *kvantni sustav*. Ali da ne bismo pretjerali s «visokoučenim» verbalizmom, zaputimo se iz okruženja našeg svagdanjeg iskustva izravno u kvantnu stvarnost – dobri primjeri iz svakidašnjice povest će nas prema suštini kvantne stvari rječitije od suhoparnih teorija koje puno kažu, ali nekome nenaviknutom, onom tko se prvi put susreće s kvantima (*šokiranom* u smislu Bohrove izjave za tisak), još ne otkrivaju veo sa skrivene ljepote spoznaje.

### Svijet = čestice i/ili valovi



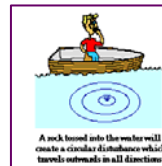
Ovo *ili* odnosi se na klasičnu «stvarnost» u kojoj odrastamo. Ako smo pažljivi motritelji primijetiti ćemo u svijetu oko nas samo dvije strane jedne stvarnosti. Onu *čestičnu* ili onu *valnu*. Ili primjećujemo zrnatost ili pak valovitost.

Koje je svojstvo zrnatosti? *To što predmete možemo brojati kao odvojene*. I pratiti njihove usko definirane staze kada se gibaju ( $r(t)$  i  $dr/dt$  u isti mah). Jedna lopta, druga lopta, zrno graška, tamo vani su prebrojivi automobili, devet ili deset planeta kruži oko Sunca itd.

I ... valovi. Bacimo kamen na mirnu površinu jezera - nastaju lijepe koncentrične kružnice koje se šire na sve strane. Zatim vrišteći zvuk valova koje stvaraju sirene automobila širi se uzduž i poprijeko cijelog

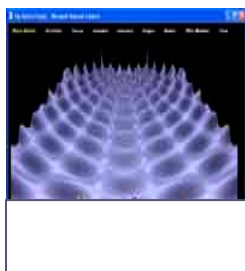
prostora. Uvijek ih naravno čuju i oni kojima nisu upućeni. Zatim elektromagnetski valovi s odašiljača TV postaje. Gdje god izvukli antenu hvatamo neki program.

Koje je svojstvo valova? *Žele zauzeti čitav prostor*, a ne kao kamen ili zrno graška boraviti u malenom dijelu prostora, biti prebrojivi ili se gibati po uskim stazama. *Valovi nemaju određen položaj u prostoru nego se nastoje nalaziti istodobno svuda*. Ako su proizvedeni negdje imaju takav način gibanja da se s vremenom šire na sve strane – delokaliziraju se.

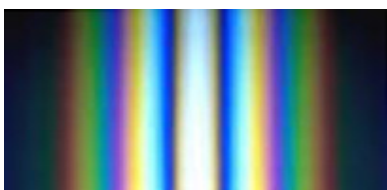


## Interferencija potpisuje licenciju svih vrsta valova. Pojam superpozicije

Svi valovi *interferiraju* čineći stalne ili nestalne valne oblike. *Superpozicija* je širi pojam od interferencije. Kada se dva vala nađu u istom dijelu prostora tada se nadograđuju ili slažu jedan na drugog tako da se njihove «visine» jednostavno zbrajaju ili oduzimaju. To je posljedica linearnosti diferencijalnih jednadžbi koje ih opisuju. Najjednostavniji primjer imamo kod valova na vodi. Kada dva nedaleka izvora titraju po vodi, proizvedeni kružni valovi koji se šire po površini dođu jedan do drugog i prelope se u području između izvora. U području preklapanja nastaje različita, superponirana slika novog, složenog vala. Na tom mjestu kažemo da je novi val nastao iz superpozicije dva stanja: stanja kružnog vala 1 i stanja kružnog vala 2, a slika koju vidimo naziva se interferentnom slikom. Interferentna slika je posljedica superpozicije.



www.campus-technology.com



Naprotiv čestice ne mogu interferirati. Ta dva načina ponašanja vidljive stvarnosti nikad se ne pomiješaju. Nogometna lopta nikada ne može biti val jer valovi se na nekim mjestima mogu preklopiti i nestati (destruktivna interferencija) kao što to ponekad čini svjetlost. Svjetlo + svjetlo = mrak! Vrlo valovito! Mogu li se, za razliku od valova, dvije biljarske kugle, nakon što udare u isto mjesto, poništiti, tako da obje nestanu? (Ako je to netko ikada primijetio neka odmah kaže ili neka zauvijek šuti o tome.) No, to se nikada ne događa. Ili, zamislite loptu koja se rasplinjava i zauzima sve veći dio prostora, da se ponaša kao val. Nikada. Ili je Ronaldo zabio gol ili nije zabio

gol, lopta ne može biti istodobno u mreži i izvan nje. Ali valovi to mogu. Zato se nogomet ne igra s valovima nego s česticama.

To je stvarnost koju vidimo oko nas, odijeljena je strogo na čestice i na valove koji su uvijek samo čestice ili uvijek samo valovi, nikad i jedno i drugo.

A što je sa znakovitim slovom *?*? Postoje li stvari na ovom jedinom svijetu koje mogu biti i jedno i drugo, i zrnate i valovite? Postoje, to su *kvanti* koje još nazivamo mikročesticama—fotoni, elektroni, protoni, cijeli atomi pa i molekule.

Ali s obzirom da se zrno graška i nogometna lopta kao i mi sami sastoje od tih nevidljivih kvantnih bića, imamo li problem s valovitošću? Ne, moja prevladavajuća čestična strana sjedi za računalom već vrlo dugo i još se nije rasplinula po sobi.

Postoji nešto što zovemo *načelom korespondencije* klasične i kvantne fizike, makroskopska stvarnost graničan je slučaj *jedine* stvarnosti - kvantne stvarnosti. Naime da bismo se osjećali kvantno morali bismo biti maleni kao elektron ili barem kao atom. Ali mi zapravo jesmo kvanti samo je to zbog naše veličine neprimjetno. Iz tog razloga kvantna mehanika nije otkrivena ranije, od strane Starih grka primjerice.

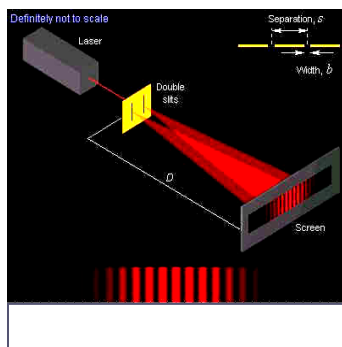


No, što je s tim predmetima koje ne vidimo, ako ih uopće možemo zvati predmetima?

Sudaraju li se, dakle, dva elektrona kao biljarske kugle ili interferiraju kao dva vala na vodi? Ili i jedno i drugo? Na to pitanje ne možemo lako odgovoriti jer su elementarne čestice nedostupne našim osjetilima. Ipak fizičari su na lukav način otkrili da elektroni nisu samo zrnati stanovnici atoma i molekula nego jasno manifestiraju i svojstva valovitosti, dva iskustveno tako protuslovna svojstva. U tome će nam pomoći čuveni Youngov pokus.

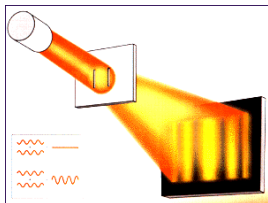
## Koji je najljepši pokus u fizici?

Čitatelji časopisa *Physics World* izabrali su da je to Youngov pokus s pojedinačnim elektronima. Između deset najljepših taj je pobijedio. Taj se pokus, popularno nazvan *pokusom s elektronom i dvije rupice*, nalazi u samom srcu kvantne mehanike, kako je to rekao R. P. Feynman. Razumijevanje kvantne teorije započinje s razumijevanjem ovog pokusa. Ali evo savjeta: da biste ga razumjeli morate biti «šokirani», a da biste bili šokirani morate uporno i tvrdoglavo ustrajavati na krivoj predodžbi da su elektroni malene tvrde, sačmaste, iako nevidljive kuglice, onako kako se to u prvom razredu iz kemije uči i crta. Pošto je to duboko ukorijenjena miskoncepcija, neće nam biti teško tvrdokorno ustrajavati na tome. Odatle dolazi šokiranost u Bohrovu smislu. I nakon, odšokiranja, što podsjeća na odštopavanje (čok-čok), ili kao da vam netko vakuum pumpom usisava ustaljene klasične koncepte iz mozga, bit ćete spremni razumjeti bit kvantne mehanike. Počnimo najprije s izvornim Youngovim pokusom sa svjetlom.



## Pokus s valovima svjetla - valovita ljepota

Thomas Young je krajem 18. stoljeća pokus izvorno izveo sa svjetlosti propustivši je u najjednostavnijem slučaju kroz dvije pukotine kao što učimo u školi. Tako je dobio dva koherentna snopa koji su iza pukotina interferirali pokazujući na zastoru poznatu sliku s nizom izmjeničnih tamnih i svijetlih područja. Htio je provjeriti Newtonovu pretpostavku da se svjetlost sastoji od finih čestica, tako sitnih da ih pojedinačne ne možemo detektirati golim okom. I Young je morao zaključiti jedino što se moglo, a to je da svjetlost nije roj sićušnih jurilica jer bi se u tom slučaju one gomilale u samo dva područja (zbog samo dva proreza). Kako je već bilo poznato ponašanje valova na vodi (ogib, interferencija), usporedbom je zaključio da je svjetlost valne, a ne čestične naravi i da tamo, na onim tamnim mjestima, gdje se dvije zrake svjetlosti susreću titrajući u protufazi, tamo zapravo ništa ne titra – dakle, tamo je: svjetlo + svjetlo = mrak. Dakle, valovito ponašanje.

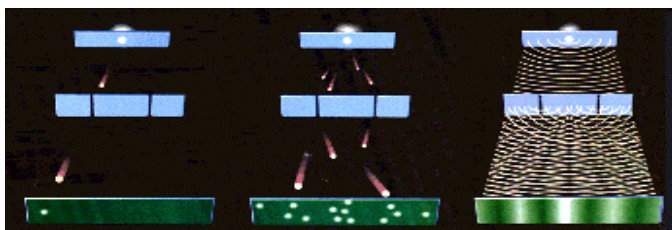
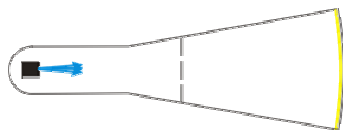


Ali, (ta riječ *ali* koja nas hvata za rukav-čekaj malo) 1905. Newtonova zamisao o svjetlosnim česticama ponovo oživljuje kroz Einsteinovo tumačenje fotoelektričnog učinka. Naime svjetlost pod određenim uvjetima može izbiti elektrone iz metala samo u žestokim međučestičnim fotonsko-elektronskim sudarima. Kasnije, 1923. godine Compton potvrđuje tu teoriju i imamo u to doba neposredno prije nastanka kvantne mehanike dvije potpuno nepomirljive teorije o prirodi svjetlosti koje će kvantna teorija uspješno ujediniti na svoj osebuju način.

## Pokus s elektronima - šokantna ljepota

A sada najljepši pokus. Prelazimo sa svjetlosti, koja nam je od školskih dana bliža kao valna pojava, na elektrone - zbog one Bohrove izjave i naše tvrdokorne zamisli o njima kao tvrdim kuglicama, zamisli koju trebamo rasplinuti. Naime, još od J.J. Thomsona 1897. naovamo riječ elektron odzvanja u našem mentalnom sklopu impaktno kao biljarska kugla. J.J. Thomson je dobio nobelovu nagradu za otkriće elektronskih kuglica. Geni i povijest zajednički su se pobrinuli da njegov sin G. P. Thomson također dobije nobelovu nagradu, opet za otkriće elektrona, ali ovaj put valovitih elektrona. Naime sin je propustio elektrone kroz neke atomske rešetke i vidio interferentnu sliku, i zaključio, kao i Young za svjetlost, da se radi o valnom fenomenu. Priča je još zanimljivija stoga što su i otac i sin bili u pravu - u kvantno-mehaničkom dualnom pravu.

Da bi izbjegao komplikacije s difrakcijskim rešetkama kristala i slično, Feynman je prije pedesetak godina u svojim famoznim *Lectures on Physics* zbog pedagoških razloga koristio misaoni pokus s elektronom i dvije rupice. Misaoni zato, jer ga na taj način nije bilo moguće praktično izvesti. Danas je to moguće i nedavno je ekipa iz firme Hitachi uspjela u tome.



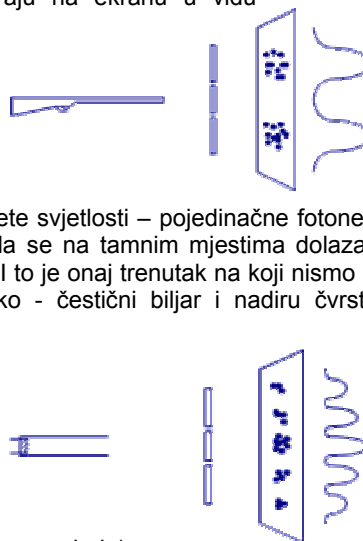
<http://www.fortunecity.com/emachines/e11/86/qphil.html>

U misaonom pokusu monoenergetski elektroni ispucavaju se duž katodne cijevi i propuštaju kroz dva uska proreza čime se razdvajaju na dva snopa koja se preklapaju i detektiraju na ekranu u vidu fluorescentnih bljeskova slično onako kako se to odvija u našim TV prijemnicima.

Ako su elektroni zrna, na ekranu bismo trebali vidjeti samo dva područja koja oni pogađaju, sliku analognu onoj koju zrna iz starog i nepreciznog kalašnjikova tvore nakon rasipanja i prolaska kroz dvije makroskopske pukotine. Ali, jao - šok! – «slika elektrona» je valovita, vidimo na ekranu čitav niz područja - interferentne pruge. (Slika je zapravo točkasto-valovita, kakva je ustvari i u Youngovu pokusu sa svjetlom, ako propuštamo malene intenzitete svjetlosti – pojedinačne fotone.) Stoga kao i u Youngovu pokusu sa svjetlošću prisiljeni smo na zaključak da se na tamnim mjestima dolazak elektrona pretvara se u ništa! Elektron + elektron = ništa! Dakle, vrlo valovito. I to je onaj trenutak na koji nismo ili ne bismo trebali biti pripravniji jer u glavi nam *a priori* odzvanja elektronsko - čestični biljar i nadiru čvrsto ukorijenjene slike iz udžbenika koje Heisenberg «zabranjuje».

No dobro, ako elektroni već interferiraju, pokušajmo to objasniti. Jedan elektron, ma što on bio, prolazi kroz jednu, a drugi elektron kroz drugu pukotinu i zatim se nekako valovito ponište na mjestu ekrana gdje je jedna od tamnih pruga.

Međutim, znatizeljni fizičari moraju sve provjeriti: što ako je izvor elektrona tako slab da ispušta jednu po jednu česticu? Ako u tom slučaju jedan elektron prođe kroz jednu rupicu, a kroz drugu rupicu ne prođe ništa, kako naša intuicija i očekuje, jer elektron je *uvijek jedno cijelo* (kako je to tata Thompson mjerio), interferencije ne može biti, jer interferenciju omogućuje prolazak kroz oba proreza istodobno – za interferenciju je potrebno dvoje. Ipak, kako se elektroni gomilaju, na zastoru (ekranu, filmu) vidimo sve više pojedinačnih



pogodaka (bljeskova) iz kojih polako počinje izranjati opet ista interferentna slika kao i u slučaju kada svi odjednom narupe na ekran. To znači da je svaki elektron u prolasku kroz uređaj morao *pojedinčno* interferirati. Ključno pitanje je sada: *Na koji način svaki usamljeni elektron interferira, s čime on interferira?*

Odgovor mora biti: Način na koji interferira je očito vrlo valovit, a *interferira sam sa sobom* i tu smo sada dotaknuli čudesno područje kvantne stvarnosti. Jer «čestica» ili bolje reći kvant koji je nedjeljiv u smislu da ga uvijek mjerimo s jednakim elementarnim nabojem i masom mirovanja mora proći kroz obje pukotine istodobno da bi mogao interferirati sam sa sobom. Pomisao da se rascijepio kako bi prošao kroz dvije pukotine u suprotnosti je sa svim pokusima koji nikad ne nalaze pola ili tričetvrt elektrona. I dodatno komplicira situaciju jer morali bismo objasniti mehanizam koji cijepa elektron (prorezi ne mogu djelovati kao oštrica noža) i ponovo ga sjedinjuje u jedno cijelo jer - na ekranu vidimo samo *jedan* točkasti bljesak, trag koji odgovara cijelom elektronu. I tako smo prisiljeni na «sablanski» (Einsteinova riječ) zaključak: Mora biti da je elektron prolazeći kroz obje pukotine bio u *istom trenutku na dva mjesta!*(?)

Provedemo li dosljedno ekstrapolaciju iz svijeta koji nas okružuje i u kojem postoje samo dvije pojavnosti, ona čestična i ona valna, što je razuman postupak, tada elektronu dolje u dubini mikrosvijeta moramo pridružiti istodobno i čestična i valna svojstva. Jedino ako je bio rasprostranjeni val mogao je proći kroz obje pukotine istodobno. I nakon toga na ekranu se pojavljuje u vidu točke, kao jedno prebrojivo cijelo - kao čestica? Ono što je Bohr mislio kada je dao svoju izjavu je upravo ovo nezamislivo svojstvo mikročestica. Zašto nam je to nezamislivo? Upravo stoga što nikad u našem iskustvu nije zabilježen takav dvostruk fenomen koji nazivamo valno - čestičnim dualizmom. Kvant nije ni čestica ni val, to je nešto što odjednom ima i čestična i valna svojstva. To je nešto treće što je nama nepredočivo. Problem je i psihološke naravi, kvant se nalazi izvan našeg uobičajenog osjetilnog iskustva kojeg smo stekli u odrastanju. Naš mozak jednostavno nije se razvijao družeći se s kvantima, nije odrastao s njima pa nemamo sliku ili predodžbu za takvo što. Kao što nikad ne ćemo moći zamisliti svijet s 4 prostorne dimenzije. Ali ga ipak možemo razumjeti, ne ustrajemo li na zornim predodžbama kao što su to u početku sasvim razumljivo činili kvantni fizičari pioniri. Danas, 80 godina poslije, kvantni pokusi ne bi nas trebali (toliko) šokirati nego jednostavno biti doživljeni kao čudesne manifestacije ljepote Prirode.

Možemo li odavde izvući pedagošku pouku? Teško se odričemo onog što se protivi našem iskustvu kojeg oblikujemo tijekom djetinjstva i mladosti, teško se ljudi odriču načina razmišljanja koji ih je predugo vremena uspješno vodio. Teško se odričemo stečenih navika. To je kao krivo naučeni prstomet u sviranju klavira, bolje je da učenik ništa ne zna nego da pogrešno «zna». Možda nije čudno što je kvantna fizika znanost dvadesetogodišnjaka. Heisenberg je imao samo 25 godina kada je otkrio matricnu kvantnu mehaniku, Pauli i Dirac su bili njegovi vršnjaci, Bohr je bio student kada je objavio svoj model atoma, Einstein je kao 16-godišnjak došao do zaključka da ništa ne može biti brže od svjetlosti, a s 26 godina je objasnio fotoučinak i objavio teoriju relativnosti itd. Možda je potreban sasvim drukčiji pristup učenju fizike. Kvantna fizika odmah u prvom razredu gimnazije? Mislim da je to ipak pogrešno i da moramo ponoviti cijelu povijest fizike u sažetom obliku želimo li zadržati pozitivno čuđenje i svježinu «paradoksa» koji nas navode na pitanja o suštini. Samo ako smo prošli ili ponovo prošli put od paradoksa do razrješenja, možemo svjedočiti ljepoti fizike.

### **Kolaps valne funkcije**

Vratimo se elektronu i dvostrukoj pukotini. Onog trenutka kada je elektron ispucan iz elektronskog topa bio je čestičan s dobro definiranim položajem. Nakon toga se valno rasplinjava po prostoru prema pukotinama, delokalizira se kao što to čine svi valovi. Zatim prolazi kroz obje pukotine još uvijek kao val, interferira kao val u području između pukotina i ekrana i napokon se na ekranu iz tog prostora pojavi kao čestica - u nekoj točki nastaje sićušan bljesak.

I sljedeći je problem u tome da ne znamo u kojoj točki ekrana će se pojaviti, ni kada će «izroniti» iz svoje valne rasprostranjenosti. Zapravo prema minimalističkom Kopenhagenškom tumačenju elektron ne izranja iz svog vala nego se ono što nazivamo elektronskim valom trenutno skupi ili kolabira iz šireg prostora u točku. Pretvori se iz valnog bića u čestično biće. Tu misterioznu pojavu nazivamo *kolapsom valne funkcije (kvantnim skokom u točkasti volumen)*. Naime elektron kao i druge kvante opisujemo valnim funkcijama, rješenjima čuvane Schrödingerove valne jednačbe koja je preuzela ulogu Newtonovih zakona u opisu gibanja mikročestica.

### **Elektron se «pretvara» u česticu – samo kad ga pogledamo**

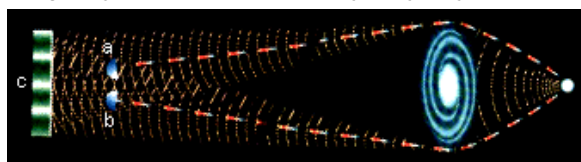
Kako objasniti tu misterioznu pojavu kolapsa iz rasprostranjene (nevidljive) valne funkcije u vidljivi trag čestice, to još nitko sasvim točno ne zna. Jednako ponašanje elektron izvodi pri prolazu kroz dvije pukotine. Nakon prolaska će interferirati, ali samo pod uvjetom da ga nismo promatrali. Jer čim ga pogledamo, eto njega na jednom mjestu – kolabira u jednu pukotinu! I razvoja interferencije na ekranu više nema! Kako je moguće da naš pogled na pukotine (pogled kao općenito detekcija - možemo ga snimiti i kamerom pa pogledati kasnije) može uništiti pruge na ekranu koji može biti proizvoljno dalek? Kako je moguće da čin promatranja pukotina potakne elektron da se pojavi u jednoj od pukotina kao jedno cijelo, a negledanje pukotina (odsutstvo detekcije) omogućuje prolazak cijelog elektrona kroz obje pukotine? Očito, elektron se pred nama pojavljuje, iskazuje uvijek samo kao čestica i to samo onda kada ga mjernim uređajem na to prisilimo. Što reći nego čudesni kvantni svijet! Osjećate li se dovoljno šokirani? Ako da, onda smo na pravom putu.

### **Interferometar čestica – kvantna superpozicija**

Interferometri su naprave koje ističu način na koji jedna čestica (dakako, kvant) može putovati po dvije udaljene «staze» istodobno, da bi nakon ponovnog «sjedinenja» interferirala sama sa sobom. Postoje interferometri za fotone, elektrone ili neutrone. Youngov uređaj koji smo opisali također možemo smatrati interferometrom budući

da elektron prolazi kroz obje pukotine istodobno. U svakom takvom uređaju kvant je suočen s izborom kojim će od dva moguća međusobno udaljena puta krenuti. U slučaju fotona takav se izbor lako nudi stavljanjem poluprozirnog zrcala na put fotonu. Vjerojatnost da će proći odnosno reflektirati se od njega iznosi 50%. Kvantna mehanika nam kaže da sve dok ne gledamo, (ne pokušavamo utvrditi kojim je putem kvant krenuo), valna funkcija kojom opisujemo kvant sastoji se od dva dijela, tj. *kvant se nalazi u superpoziciji dva stanja: stanja prolaska jednim putem i stanja prolaska drugim putem*. Drugim riječima valna funkcija putuje objema stazama istodobno, te na kraju puta interferira što dokazuje da je elektron ili foton putovao dvama putovima.

Ti putovi mogu biti proizvoljno udaljeni, kao u izvedenom međugalaktičkom pokusu gdje se jedan za drugim hvataju fotoni odaslani s dalekog kvazara nakon što su prošli s obje strane goleme galaktike. Ono što sigurno znamo je to da je svaki elektron ili foton koji prolazi dvama udaljenim stazama, dakle se nalazi na dva mjesta istodobno, opisan jednom cjelovitom valnom funkcijom, iako se ona sastoji iz dva superponirana dijela. Drugim riječima kvantna čestica je uvijek cjelovita kao i njezina valna funkcija.



Kao što elektron ne možemo zamišljati kao kuglicu nego mu možemo samo ponekad pridružiti neka «kugličasta» svojstva, tako je i sa zamišljanjem elektronskog vala kao primjerice zvučnog vala. Zvučni val se može rascijepiti na dva odvojena dijela i dva

<http://www.fortunecity.com/emachines/e11/86/qphil.html>

motritelja mogu odvojeno čuti zvuk svakog od njih. No, u slučaju elektronske valne funkcije *samo jedan od dva udaljena motritelja može detektirati cijeli elektron*, dok onaj drugi tada detektira ništa. Cijela rasprostranjena valna funkcija, *sastavljena od dva dijela u jednom cijelom*, kolabira u stvarnu česticu kod jednog od motritelja. Interferentna slika se tada izgubi kao i u slučaju motrenja pukotina u Youngovu pokusu. To je posebnost kvantne superpozicije. Iz dva superponirana stanja činom motrenja nastaje kvantni skok (kolaps) u jedno od njih i pojavi se čestica, ili bolje reći, lokalizirani prebrojivi trag čestične strane kvanta. Naravno treba spomenuti da se kvant može nalaziti i u superpoziciji više energija, impusa ili brzina i da isto tako čin mjerenja izdvaja česticu s jednom vrijednosti tih veličina.

Usporedimo to s titranjem klavirske žice. Slušajući jedan ton proizveden na jednoj žici mi ustvari slušamo cijeli niz tonova, kako osnovni ton tako i njegove više harmonike – slušamo zapravo superpoziciju harmonijskog niza jedne žice. Međutim, kada bi klavirska žica bila kvantni titrajni sustav mi bismo činom slušanja (mjerenja) uvijek i neizbježno izdvojili iz tog niza samo jedan čisti ton – jedno stanje iz superpozicije mogućih stanja. Nikada ne bismo čuli bogatstvo timbra glazbenog instrumenta nego bismo jednom čuli samo prvi harmonik, drugom prilikom treći harmonik ili katkada osnovni ton, a nikada superpoziciju tonova kao što to inače čujemo. Tako bi svirao kvantni instrument – kvantno skokovito, tj. u kolapsu jednog stanja.

Danas fizičari nazivaju kvante elementarnim česticama iako to nisu čestice, a opisuju ih valovima (valnim funkcijama ili psi-poljima) iako ih ne smatraju ni valovima. Kvanti imaju samo osobine, ponekad čestične, a ponekad valne, ali ne istodobno i čestične i valne. (Pokušajte nešto «lakše», zamisliti biljarske kugle koje ne mogu istodobno biti bijele i okrugle.) Jednostavno znaju o čemu govore kad pogrešno govore, jer ni naš govor nije razvijen u suradnji s kvantima. Sigurno tlo pod nogama im daje savršen matematički formalizam koji funkcionira na način «*šuti i računaj*», kako je kazao šaljivi Feynman.

Većinu fizičara uopće ne zabrinjava problem fizikalnog tumačenja pozadine kvantno-mehaničkog stroja za računanje. Izračunati podaci podudaraju se s izmjerenim podacima i to je dovoljno. Ipak postoji i druga vrsta fizičara koju ne prestaje opsjedati tumačenje pozadine diferencijalnih jednačini. Oni smatraju da je to jedini put napretka. Zato danas imamo mnoge interpretacije kvantne mehanike. Gotovo da svatko ima svoju. Neke od njih uvode paralelne svjetove, mnoge povijesti, neke skrivene varijable, ali sve pokušavaju pomiriti logički «nepomirljivo». Tako je nastala i nova vrsta logike - naravno kvantna logika: «Idem ovim putem ili onim putem» zamijenjeno je «mogu ići i jednim i drugim putem istovremeno», kao što to čini elektron u prolasku kroz dvije ili više pukotina.

## Kopenhagenska interpretacija – što se događa dok ne gledamo?



Kad ne gledamo, onda smo zaokupljeni računanjem valne funkcije-prema Feynmanovoj preporuci-*šuti i računaj!* Za veliku većinu fizičara u ovoj šali istina je cijela.



Velika većina fizičara usvojila je Bohr-Heisenberg-Bornovu ili Kopenhagensku interpretaciju. Dobro, bilo je tu još i drugih, ali ova su trojica najzaslužniji dečki. Ukratko, oni su više čestični nego valni fizičari. Oni kažu da prije mjerenja «nema smisla pitati» se gdje je bila elektronska «čestica» jer osobine elektrona postaju stvarne tek samim činom detekcije. Tako «nema smisla» pitati se kroz koju je rupicu elektron prošao, jer da bismo to saznali moramo postaviti mjerni uređaj blizu rupice i vidjeti je li kroz nju prošao. Naime, prema Heisenbergu gibanje elektrona ne možemo promatrati kao što promatramo gibanje automobila na cesti, a da drastično ne promijenimo njegovo stanje gibanja. Za određivanje položaja elektrona moramo ga obasjati barem jednim fotonom. No elektron slične energetske veličine kao i foton biva pogođen i odbačen sa staze. Ali koje «staze»? Ne možemo utvrditi stazu jer bismo ga trebali stalno obasjavati duž «staze». Tako ne može postojati staza elektrona. Jednostavno ne možemo znati što je «on» radio kad ga nismo gledali.



Što se, dakle, događa kada ga ne gledamo? Ništa se ne događa, imamo vremena rješavati valnu jednačinu i računati valne funkcije. Valna funkcija ili vektor stanja samo je matematičko pomagalo,

kaže Bohr.

Ne možemo motriti kvantni sustav, a da ga ne promijenimo. Na pitanje što i kakvo je bilo prije, nema načina da saznamo jer opažamo samo ono s čime smo trenutno u interakciji! Nadalje, prema Bornovu tumačenju unaprijed ne možemo proračunati gdje će elektron završiti na ekranu, možemo odrediti samo i jedino vjerojatnost da se negdje na ekranu pojavi. Tamo gdje su svijetle pruge ta je vjerojatnost povećana, a tamo gdje su tamne pruge nije vjerojatno da se pojavi. Tek nakon što se pojavio znamo gdje je pogodio ekran.

Kako se uklapaju valna svojstva elektrona u tu interpretaciju? Na ekranu je valna slika koja tumači ono što se zbiva u prostoru između pukotina i ekrana i ona određuje razdiobu vjerojatnosti nalaženja elektrona. Ali i prije dolaska do ekrana, dok još nisu detektirani, zamišljamo njihov valni aspekt-valnu funkciju koju ne vidimo, ali je možemo proračunati iz «konfiguracije terena» kojim elektroni prolaze. Naime, geometrija pukotina određuje valnu funkciju, a Schroedinger je nekim kreativnim čudom našao jednadžbu iz koje

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + U(x)\Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t}$$

nakon matematičke obrade proizlaze valne funkcije kao finalni proizvod. (Možemo li to nazvati misterioznom povezanošću kvantnog fizičara i Svemira?)

Važan pojam superpozicije ovdje se koristi na slijedeći način: elektron se nalazi u superpoziciji dva kvantna stanja: stanja 1, prolaska kroz jednu pukotinu i stanja 2, prolaska kroz drugu pukotinu. Prolazak kroz obje pukotine istodobno (kad ne gledamo!) opisuje se linearnom kombinacijom ova dva stanja, kao i kod svakog interferometra:

$$|\psi(1,2)\rangle = c_1 |\psi(1)\rangle + c_2 |\psi(2)\rangle.$$

Koeficijenti  $c_1$  i  $c_2$  (iako kompleksni brojevi) određuju vjerojatnosti prolazaka kroz pojedinu pukotinu; ako su pukotine jednake širine, izgledi su izjednačeni,  $|c_1|^2 = |c_2|^2 = 1/2$ . Međutim, motrimo li pukotine, nastaje kolaps  $|\psi(1,2)\rangle \rightarrow |\psi(1)\rangle$  ako smo elektron našli, primjerice, u pukotini 1. Tada je također i vjerojatnost «skočila» s  $1/2$  na 1 (sigurno je u pukotini 1) odnosno 0 (nije u pukotini 2).

Ova interpretacija smatra vjerojatnosno tumačenje fundamentalnim, dakle ne kao nedostatak znanja nego kao jedino moguće znanje.

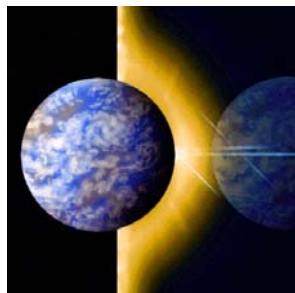
Naime, prema Heisenbergu kvanti su negdje između mogućnosti i stvarnosti, a prema Bohru oni ne postoje prije nego ih opazimo. Tako je motritelju pridružen povlašten status. Motritelj svjedoči o postojanju čestice koja prije mjerenja nije ni postojala. Odnosno, nema smisla ništa tvrditi o elektronu unaprijed jer mi o «njemu» ništa ne znamo prije negoli ga uhvatimo. Prema Bornu unaprijed možemo računati samo vjerojatnosti da elektron upadne u neko maleno područje. Tko je maštovitiji, ova trojka s početka 20. stoljeća ili pisci znanstvene fantastike?

Determinizam nije potpuno (ili uopće nije) izgubljen nego se sastoji u tome da i dalje isti eksperimenti daju iste rezultate. A koji je konačan ishod našeg Youngova ili sličnih pokusa? To je uvijek jedna te ista interferentna slika na ekranu i to je ono što je predvidljivo. No, kako kopenhagenovci objašnjavaju misteriozni kolaps ili kvantni skok elektrona u točku? Nikako, to ostaje problem, ali oni to ne smatraju problemom dokle god je vjerojatnost fundamentalni pojam. Valovi nisu mjerljivi nego samo određuju vjerojatnost nalaženja po prostoru. Postoje samo čestice koje se mogu pojaviti tu ili tamo. Schroedinger je ovdje odustao i nikad se nije složio s takvim minimalizmom. Nerazjašnjeni «prokleti kvantni skokovi» udaljili su ga od daljnje potrage za kvantnom istinom.

## Everettovi mnogi svjetovi



Godine 1957. američki fizičar Hugh Everett III izložio je najekstravagantniju (za sada) interpretaciju kvantne mehanike pod nazivom *interpretacija relativnog stanja* ili poznatija kao *mnogi svjetovi*. Ona je slobodna od problema mjerenja koji muči Kopenhagensku interpretaciju gdje se motritelju pridaje povlašten status koji omogućuje postojanje elementarnih čestica. No, Everett zahtijeva od nas da živimo ni manje ni više nego u beskrajno mnogo paralelnih svjetova. Odmah recimo da je



to ozbiljna teorija koja u temelju sadrži cijeli konzistentan matematički aparat kvantne mehanike, samo želi na neprotuslovan način objasniti što se događa s kvantima. Osnovna ideja je sljedeća: Kada je kvant suočen s izborom prolaska kroz dvije ili više pukotina, njegova valna funkcija nije u superpoziciji stanja nego se cijeli svemir ili svijet tada razdvaja, cijepa na onoliko stvarnosti koliko kvant ima opcija na raspolaganju. U jednom od tih svjetova čestica (ovaj put zaista čestica) proći će jednom pukotinom, a u drugom paralelnom svijetu ona će proći kroz drugu pukotinu. Svjetovi se preklapaju samo u području gdje dolazi do interferencije dok traje tzv. *dekoherencija*, tj. kratkotrajno prijelazno stanje superpozicije. Nakon toga

[www.hedweb.com/everett/](http://www.hedweb.com/everett/)

se svjetovi s česticama razdvoje na neovisne stvarnosti. To je to. I ne postoji proces mjerenja niti valna funkcija ikada više kolabira ili izvodi kvantni skok u pojedino stanje. Mi kao motritelji također se udvajamo u dva motritelja od kojih jedan motri prolazak kroz jednu, a drugi od nas prolazak kroz drugu pukotinu. Nadalje, kako u svakom od ta dva svijeta elektron može pogoditi bilo koju svijetlu točku na ekranu, svjetovi se dalje razdvajaju u beskrajna mnoštva - u svakom od njih elektron pogodi jednu točku na ekranu. Što je s onim tamnim prugama? Na tim mjestima elektron se ne pojavljuje što znači da su se tamo dva čitava svemira od njih mnogo međusobno destruktivno poništila. I naše kopije također. Dalje neka radi mašta.

Treba reći i to da paralelni svjetovi, iako mogu interferirati, ipak ne mogu međudjelovati. Naime dva vala koja interferiraju, nesmetano prolaze jedan kroz drugog što je poznata posljedica linearnosti valnih jednadžbi. Neki fizičari tvrde da je to jedina «prava» interpretacija, međutim Everett je svojedobno bio obeshrabren manjkom podrške svojih kolega, posebice oštrom kritikom samog Bohra. Spomenimo Oxfordskog fizičara Davida Deutscha,

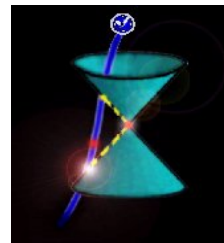
jednog od autora zamisli o kvantnim računalima. Deutsch je predložio provjeru Everettove interpretacije, a koja zahtijeva daljnji razvoj umjetne inteligencije, tj. takvog kvantnog računala koje bi nam znalo reći događa li se (unutar njega) kolaps valne funkcije ili ne. Kvantna računala bila bi kudikamo brža s obzirom da bi rješavala zadaće u superpoziciji velikog broja stanja.

Što još ima na tržištu? Na predavanju sam izložio pregršt interpretacija, ali zbog manjka vremena gotovo sam samo uspio reći kako je ova prekrasna, a ona predivna pa to ovdje iz sličnih razloga ne bih ponavljao.

### Nelokalnost. EPR-«paradoks»



Zamislimo bacanje dvaju kocaka. Jednu bacate vi, a drugu vaš prijatelj i rezultati se uvijek poklapaju (3,3), (1,1), (6,6), (5,5)... Zaključit ćete da tu postoji nešto više od slučajnosti, pogotovo ako ste međusobno tako daleko da čudesne kocke nisu mogle komunicirati signalima brzine svjetlosti. To je ono što bi Einstein nazvao «sablasnim djelovanjem na daljinu». Ako kocke ipak «komuniciraju» onda kažemo da to čine *nelokalno* odnosno superluminalno. Iako je potpuno nevjerovatno za kocke, ipak to postoji i karakteristično je za kvantnu mehaniku neovisno o interpretaciji.



[www.physics.syr.edu/LIGHTCONE](http://www.physics.syr.edu/LIGHTCONE)

Godine 1937. Einstein, Podolsky i Rosen (odatle kratica EPR) smišljaju misaoni pokus koji će pokazati da kvantna teorija ne može opisati stvarnost bez unutarnjih proturječja. Posebice se to odnosi na problem mjerenja. Imamo li na početku dva elektrona ili dva fotona s ukupnom količinom gibanja nula, tada, nakon što su simetrično upućeni na suprotne strane svijeta, ali ne znamo na kojem pravcu, znat ćemo samo to da njihov zbroj količina gibanja uvijek ostaje nula, zbog njihova suprotna gibanja. Odavde slijedi da mjerenjem jednog od njih utvrđujemo istodobno i na daljinu količinu gibanja onog drugog, iako on može biti svjetlosnim milenijima daleko, na drugom kraju galaktike čak. To je suprotno onom što tvrdi Bohr da je za mjerenje osobina čestice potrebno izravno međudjelovati s njom. Dakle, paradoks. Međutim Bohra taj argument uopće nije uznemirio. Jer čestice su povezane jednom nedjeljivom, uvezanom valnom funkcijom i mjerenjem jedne čestice nastaje kolaps cijele, zajedničke valne funkcije. Na taj način je trenutno dobiven podatak i o drugoj čestici, iako je ona izvan dosega signala koji se prenosi brzinom svjetlosti, prema posebnoj teoriji relativnosti, najvećom mogućom brzinom prijenosa signala. Kažemo da su takve čestice kvantno uvezane.

Razmotrimo još i slijedeću inačicu EPR pokusa. Neka je dovoljno izolirani atom iz udaljenog međuzvjezdano prostora u nekom trenutku iz sebe izbacio foton. S obzirom da je foton bio dobro lokaliziran u malenom području veličine atoma, njegov je impuls praktički potpuno neodređen, foton se širi na sve strane, a stanje njegova impulsa je radijalno simetrična valna funkcija, dakle s potpuno ravnopravnim smjerovima gibanja (ne uzimajući u obzir stanje polarizacije). Ukupni je impuls sustava: (*atom nakon emisije + foton*) jednak nuli. I svaki podsustav, atom i foton pojedinačno, iz razloga radijalne simetrije, također ima impuls jednak nuli. Nakon vrlo dugo vremena, recimo 100 godina, jedan sićušan dio rasprostranjenog kružnog elektromagnetskog vala polumjera 100 svjetlosnih godina dolazi do nas na Zemlji u naš detekcijski uređaj. Ali, kao što znamo, «klik» našeg detektora ne znači da smo uhvatili dio nego cijeli foton. To je ono što smo nazvali kvantnim skokom u točku – trenutnim kolapsom kvanta iz područja polumjera 100 svjetlosnih godina u točku. Kako je cijeli foton udario u naš uređaj koji ga je uhvatio iz određenog smjera, detektor je otrpio trzaj na smjeru atom-detektor. Sada, da bi zakon očuvanja impulsa bio sačuvan, mora biti da je «istodobno» (očito ne u smislu posebne relativnosti) atom doživio jednak trzaj na suprotnu stranu. Kako je atom «znao» da treba trznuti kad je prošlo 100 godina od emisije fotona? To znači da su atom i foton opisani jednom zajedničkom kvantno uvezanom valnom funkcijom. Kolaps se morao dogoditi i kod detektora i kod atoma istodobno kao da prostor i vrijeme između njih uopće ne postoji.

Iako je Einstein jedan od utemeljitelja kvantne fizike, poznato je da se on nikada nije mogao pomiriti s Kopenhagenskim tumačenjem nego je imao svoju - *statističku interpretaciju*, što će reći da je po njemu kvantna fizika samo prijelazna teorija. Uloga Einsteina je bila važna jer je svojim beskrajnim raspravama s Bohrom pridonio bistrenju pojmova, a osim toga nikad ne treba zanemariti mišljenje znanstvenika takve goleme intuicije kakvu je imao Einstein. Tko zna što će donijeti budućnost. O EPR paradoksu se i danas raspravlja.

### Schroedingerova mica-maca



[www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org)

Ni Schroedinger nije htio «kupiti» Kopenhagensku interpretaciju. On je odustao zbog «prokletih kvantnih skokova», no prije toga je smislio paradoks *kvantne mačke* kako bi pokazao da je kvantna mehanika beznadno pogrešna kada je interpretiraju Bohr i Heisenberg. Mačka je smještena u kutiju s radioaktivnim uzorkom koji s vremena na vrijeme ispušta alfa čestice. Alfa čestice mogu aktivirati otrov koji će ubiti mačku. No, alfa raspad događa se nasumično, recimo da se unutar sat vremena u prosjeku raspadne jedna alfa, ali ne znamo

kada, u prvoj minuti ili možda u 37. minuti. Ako kutija nije prozirna, ne znamo je li nakon nekog vremena mačka u njoj živa ili mrtva. Schroedinger se pitao kako je moguće da mačka bude istodobno i živa i mrtva ovisno o superpoziciji stanja jezgre? Mačka može biti ili jedno ili drugo, ali ne i jedno i drugo istodobno. Bohrov odgovor je bio jasan. Mi to ne znamo dok ne otvorimo kutiju i tako izazovemo kvantni kolaps mačke u jedno od ta dva stanja. A to da je mačka istodobno živa i mrtva prije otvaranja to je više stvar izračunavanja vjerojatnosti za jedno ili drugo, i nije toliko povezano sa stvarnošću. Zanimljivo je Everettovo tumačenje mnogim svjetovima. Onog

trenutka kada se kutija otvori, svijet se cijepa na dvije paralelne stvarnosti. U jednu od njih odlazi živa mačka zajedno s motriteljem, dok u drugoj završi mrtva mačka zajedno s kopijom motritelja i svim ostalim. Primijetimo da je sve to ekvivalentno problemu elektrona s dvije pukotine odnosno udvajanja stanja u interferometru čestica.

### **Nova varijacija na staru temu?**

*Nikada nitko nije dao prihvatljivo objašnjenje za čudesnu pojavu identiteta svih čestica iste vrste. Taj identitet ne može biti trivijalnost nego se mora uzeti u obzir kao središnji misterij fizike.*

— C.W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler

Koja je uloga «pojednog» elektrona u pokusu s dvije pukotine? Njegova je uloga da sudjeluje u izgradnji interferentne slike i da ostane pritom bez identiteta kao termiti u izgradnji termitnjaka ili kao Borg s kolektivnim *ja* iz Zvezdanih staza. Elektron ima i manje od toga, uopće se ne može govoriti o nekom elektronu, a da se ne govori o svim elektronima. Wheeler je jednom rekao Feynmanu: «Znam zašto svi elektroni imaju jednak naboj i masu. Zato što su svi elektroni jedan elektron.» Kada uhvatimo jedan elektron na zastoru možemo li tom elektronu pripisati identitet? Elektron je ostavio trag, ali trag nije elektron. Iz činjenice da postoji prostorno vremenska podudarnost - u nekoj točki u neko vrijeme pojavio se elektron - uopće ne slijedi da je «on» dobio identitet. Identitet ima svjetska točka traga  $(x,y,z,t)$  u mreži drugih točaka na ravnini ekrana koji se sastoji od nizova atoma koji tvore tu mrežu. Naime, ako se elektron pojavi sada i negdje u našoj sobi pa se zatim pojavi kasnije negdje drugdje u sobi, odakle znamo da se radi o istom elektronu? Nemogućnost praćenja staze elektrona onemogućuje nam da tvrdimo o «tom i tom» elektronu u razna vremena. Praćenje staze objekta znači označavanje, a elektron ne možemo označiti, recimo, priljepiti mu broj. Dva su elektrona i više nego jednaka tijela ( $A=B \rightarrow A=A$ ), dva u jednom ili jedan udvojen (umnogostručen).

Ne postoje dva jednaka kamena, svaki ima svoj identitet. Čak i kada bismo našli dva identična kamena s istim rasporedom atoma znali bismo koji je koji, jer jedan je ovdje, a drugi je tamo. Mogli bismo definirati dva identična objekta na taj način da kažemo: ako njihovom zamjenom fizikalni proces ostaje nepromijenjen, onda su to identični objekti. Dva elektrona ne možemo fizikalno čak ni zamijeniti jednog s drugim. Niti ne trebamo, oni uvijek izgrađuju jednu te istu interferentnu sliku na ekranu (ako ne pogledamo kroz koju je rupicu prošao). Imaju kolektivnu valnu funkciju koja je postojana u tom smislu da je određena zadanim rubnim uvjetima (geometrijom dvije pukotine) i oblikom valne jednadžbe.

Uzmimo elektron u slobodnom prostoru. Zašto bi elektron u slobodnom prostoru bio u nekoj određenoj točki, a ne u nekoj drugoj? Sve su točke ekvivalentne. Za to se «brine» valna funkcija koja je jednoliko rasprostranjena po prostoru u kojem nema nikakvih ograničenja (potencijala). Prema tome je razmišljanje o elektronu koji je istodobno svugdje (za Bohra i Heisenbega - nigdje) prirodnije (čuva simetriju prostora) nego narušiti tu simetriju isticanjem jedne točku u kojoj boravi elektron kao klasična čestica za zadanim početnim uvjetima. Narušavanje simetrije dolazi onog trenutka kada se motritelj uključi u stvarnost i poremeti je svojom nazočnošću ili činom mjerenja. Tada se stječu uvjeti za kršenje simetrije, za kvantni kolaps u točku. S obzirom da je elektron uvijek cjelovit u smislu da se pojavljuje s invarijantnim nabojem, masom i spinom to je i razlog zašto nastaje kolaps. Kad cjelovitost identičnih elektrona ne bi bila očuvana, kada bi se elektron mogao rascijepiti na dijelove, ne bi bilo kolapsa valne funkcije i mi bismo tada mjerili dio energije elektronskog vala kako je to slučaj u klasičnoj slici valova na vodi ili valova zvuka.

Pritom je svejedno gdje na ekranu nastaje kolaps jednog elektrona jer elektroni posjeduju *permutacijsku simetriju* (zamjena dva elektrona ne daje ništa novo), a ona slijedi iz jednakosti svih elektrona (u odnosu na prostor i vrijeme nalaženja njihovih tragova-posljedica interakcije). Osnovno je, dakle, načelo apsolutne jednakosti svih elektrona uvezano s permutacijskom simetrijom. Ako permutacija dva elektrona ne daje ništa novo, tada je svejedno gdje će «koji od njih» ostaviti trag. I da nije tako ne bismo dobivali niz pruga nego samo dva područja, jer bismo uvijek bili u stanju znati koji je elektron prošao kroz koju pukotinu s obzirom da bismo ih mogli u načelu razlikovati (označiti). Ako interferentna slika nastaje od mnogih pojedinačnih tragova, onda nije bitno gdje će nastati pojedinačni trag, bitno je da je slika konačno takva kakva je, određena i unaprijed predvidljiva.

Odatle se može objasniti i Heisenbergovo načelo neodređenosti. Ako smo zapazili elektron u nekoj točki slobodnog prostora, nakon toga će elektron imati na raspolaganju svaki smjer i iznos brzine kako bi se nakon mjerenja svim točkama prostora ponovo vratila ravnopravnost, naime elektron će biti opisan kružno simetričnom valnom funkcijom analogno valu na vodi koji nastaje iz točkastog izvora i putuje na sve strane izotropno. Ukoliko, u suprotnoj krajnosti, činom mjerenja ustanovimo određen smjer i brzinu gibanja elektrona, tada gubimo bilo kakav podatak o položaju elektrona jer vektor brzine elektrona je *klasa svih usmjerenih dužina s počecima u svim točkama prostora*. Iz pravilne matematičke definicije pojma vektora slijedi neodređenost položaja. Za razliku od brzine Newtonove čestice za koju bismo prije mogli reći da je usmjerena dužina s početkom u položaju čestice nego vektor, vektor brzine u kvantnoj mehanici je zbilja matematički vektor koji odražava ravnopravnost točaka prostora. Negdje između ove dvije krajnosti nalazi se pokus s dvije ili jednom pukotinom. Širina pukotine nije točka i zato vektor impulsa nije potpuno neodređen iz čega proizlazi difrakcijski učinak.

Profesor Rubčić je na predavanju postavio pitanje što se događa na samo jednoj pukotini. Jednostavno možemo odgovoriti: kako elektron nema identitet tako ni ne može krenuti jednom od staza u difrakcijskoj kutnoj širini impulsa. Ako ga prisilimo da se pojavi negdje na toj širini nismo sigurni gdje će kasnije pogoditi ekran jer ne znamo o kojem se elektronu radi kasnije, čak ne možemo ni postaviti to pitanje jer su «svi elektroni kao jedan elektron». David Bohm je vjerovao da postoji dublja, subprostorno - vremenska stvarnost i da percepcija mnoštva identičnih elektrona dolazi na neki način kao projekcija u prostor-vrijeme, nešto kao odraz u mnogim zrcalima. Profesor Babić je s pravom primijetio da nisam spomenuo korespondenciju s klasičnom mehanikom. Treba, dakako, napomenuti da je učinak interferencije toliko sićušan da ga gotovo ne primjećujemo. Crteži i slike iz



pedagoških razloga prenaplaćavaju širinu interferentnih pruga. Elektronski snop prolazeći kroz pukotine ostaje uzak u smislu klasične staze. Pruge su mikroskopskih dimenzija. Kvantni pokus je izvanredno profinjen.

### Nešto o kvantnom determinizmu

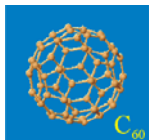
Zamislimo da su proton i elektron klasične čestice. Kako bismo od njih sastavili atom vodika. Postoji bezbroj različitih početnih uvjeta i namještanja položaja i brzine elektrona. I kada odaberemo i uskladimo sve to u jednu orbitu ona je vrlo osjetljiva na okolne smetnje. Još imamo i neprekidno zračenje što dovodi do pada na proton. Nasuprot tome kvantno oblikovanje atoma je vrlo jednostavno. Uzmemo proton i elektron stavimo ih zajedno i atom je tu. Kvantno usklađivanje se spontano odvija. Dozvoljene energije i sve ostalo samo se oblikuje i nema klasičnog usklađivanja početnih uvjeta. Uvijek dobijemo jednake atome i molekule s očuvanjem kvantne simetrije. Kako bismo izgradili molekulu DNK na klasičan način? Nikako.

Kad govorimo o determinizmu klasične mehanike upadamo u zamku. Naime reći, kad bismo znali početne uvjete gibanja mogli bismo proračunati budućnost čestice, gdje se ona nalazi u svakom budućem pa i prošlom trenutku, znači upravo to da ih ne možemo odrediti jer je upitno baš to znanje o početnim uvjetima, pa prema tome ne znamo kojom će putanjom čestica otići u svoju budućnost. Svako mjerenje je smetnja. U gornjem primjeru gibanja elektrona u atomu, postoji bezbroj mogućnosti gibanja, bezbroj mogućnosti staza elektrona oko jezgre. Ako ne znamo početno stanje elektrona nema smisla govoriti o determiniranosti njegova gibanja. Nasuprot tome u svakom atomu kao kvantnom sustavu potpuno su determinirana njegova moguća stanja. Rješavanje valne jednadžbe uvijek za svaku vrstu atoma dobivamo ista stanja u kojima elektron može biti, koja može zauzeti. Ne može se nikad dogoditi da atom svaki put kada ga proračunamo ima drugi niz stanja. U tom smislu je kvantna mehanika ne samo jednostavnija, nego i determinističkija teorija od klasične Newtonove mehanike. Početni uvjeti su atom vodika, atom helija, molekula vode itd, to su uvijek jedni te isti entiteti.

### Može li fizičar protisnuti amebu kroz dvije rupice ili...filozofa?



Profesor Anton Zeilinger iz Beča sa svojom je ekipom uspio napraviti Youngov pokus s velikom molekulom fullerena oblika nogometne lopte koja se sastoji od 60 atoma ugljika ( $C_{60}$ ). Molekula je



veličine poprečnog presjeka molekule DNK. Možda će dan kada će fizičari biti u stanju protisnuti i cijeli organizam, recimo amebu, kroz dvije rupice i dobiti njezinu interferentnu sliku na zastoru. Međutim, prema de Broglievoj relaciji, njezina brzina prolaska kroz uređaj trebala bi biti tako malena da bi na rezultat pokusa trebalo čekati nekoliko godina. Naime, zbog relativno velike mase, brzina bi trebala biti malena kako bi valna duljina amebe bila dovoljno velika za vidljivu interferenciju. Kada se radi o protiskivanju inteligentnijeg bića, filozofa primjerice, iz istog razloga trebalo bi čekati pravu vječnost za njegove svijetle i tamne pruge, vrijeme reda veličine starosti svemira.

Prof. Zeilinger je mišljenja da nije glavna svrha tražaćima za kvantnom istinom konstruirati snažniji laser, brže računalo ili nuklearni reaktor. Umjesto toga «Za mene je glavna svrha kvantnog pokusa pokazati ljudima kako je čudnovata kvantna stvarnost». «Većina fizičara je vrlo naivna, još uvijek vjeruju da postoje stvarni valovi i čestice.»

### Nick Herbert i kvantna stvarnost iza naših leđa

Kao što smo rekli, ono što vidimo uvijek je čestična strana kvanta. Kvantne valove nikad nećemo vidjeti, ali znamo da su tu negdje gdje su se pojavili elektroni, ili pak atomi od kojih je načinjen zid. Nick Herbert je "kvantni" pisac i znao je reći da uvijek ima neki čudan osjećaj valovitosti iza svojih leđa. Kao da kvantna stvarnost iza njegovih leđa izvodi nešto čudno – valovito, rasplinjavajuće. Koliko god se brzo okrenem, trenutni kvantni skok-kolaps još je brži. I zid je opet materijalan, tvrd i na mjestu. Ali čim ga ne gledam imam osjećaj kvantne juhe iza sebe. Zaista, kvantna mehanika nas uči da je stvarnost čestična dok je gledamo, a dok je ne gledamo stvarnost je valna (ili to samo tako zamišljamo). Kako riješiti slijedeći problem mjerenja? Recimo da vi gledate zid iza mene kojeg ja ne vidim. Možete mi reći: ne morate se okretati da biste vidjeli čestičnu stvarnost, ja vam mogu to priopćiti. Dakle, zid je tvaran, a ne valovit. Tko je u pravu? (Šifra: kolektivni motritelj.)

### «Kvantni» život

Mislim da je Heisenberg jednom figurativno izjavio: «Dokaz pudinga je njegov okus.» Zaista ne možemo znati unaprijed kakav je puding i da li je to što vidimo uopće puding. Tek u interakciji spoznajemo stvarnost. «Kvantna» izjava je i ovo: Dokaz formule 1 je sjesti u nju i voziti je. Uopće ne znamo što je to formula 1 dok ne isprobamo

«zvijer». Dakle, ukoliko želimo proživjeti život kako valja, moramo ga konzimirati na kvantni način, a ne možda na virtualan TV način! Pedagoška poruka je: budimo igrači, a ne statičari, ubacimo se u zbivanje i naučimo nešto! Još nešto, ako imamo odgovor na sve moguće životne «kvantne» skokove, «superpoziciju» svih mogućih ishoda, onda iznenađenja na sutrašnji dan ne bi trebalo biti. Kvantno mehanički način razmišljanja pomaže nam predvidjeti sve (ili gotovo sve-u stvarnom životu) moguće ishode, iako ne znamo unaprijed koji od njih će se i ostvariti. Prije nekoliko stoljeća, pod utjecajem uspjeha Newtonove mehanike stvorena je zamisao o Svemiru kao savršeno podmazanom satnom mehanizmu gdje je sve točno determinirano, pa i naša svakidašnjica. Nasuprot tome paradigma kvantne mehanike nudi nam pragmatičan način razmišljanja koji je u životu jedini moguć.

### «Kvantna» Mona Lisa



Neću zaboraviti Mona Lisu, iz estetskih razloga. Ako je netko stekao na predavanju pogrešan dojam o primjeni kvantne mehanike u slikarstvu, preuzimam odgovornost za takvu miskoncepciju. Ipak, mozak je neistraženo kvantno područje, a svaka je slika mentalna slika. Naime, slika Mona Lise kao umjetničko djelo, bez onog koji je gleda nema nikakvog smisla. Ali tom tvrdnjom nikako nisam imao namjeru braniti «ideju» o superpoziciji dva kvantna stanja na Mona Lisinom osmjehu: *|stanja radosti> + |stanja tuge>*. Leonardo je upravo to htio predočiti, iako naravno nije poznavao kvantnu teoriju.

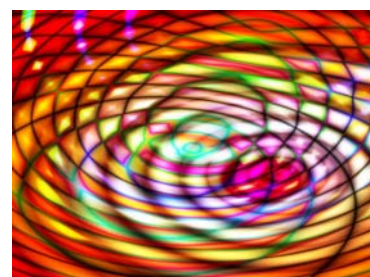
### I...potreba za mentalnim slikama u fizici

Čovjek teško može funkcionirati bez slika ili bez riječi, no u potrazi za skrivenim značenjima, tek nakon što iscrpi sve slike i potroši sve riječi, dolazi do nepredočive i neizrecive - istinske ljepote. «Najbolji je onaj dio ljepote koji ne može izraziti nikakva slika» (Francis Bacon). Možda je Werner Heisenberg osobno došao nadomak takvoj ljepoti kad je dao ovu ekstremnu izjavu: «Kvantna mehanika može postojati bez ikakvih zornih predodžbi». Odavde slijedi da je atom samo sustav diferencijalnih jednadžbi. Ipak, svatko od nas sam treba prokročiti vlastiti «slikovni» put do takvih spoznaja, inače one ne mogu biti zaokružene.

Razmišljajući o pisanju ovakvih tema koji ističu ljepotu, čudesnost ili šokantnost kvantne mehanike, čovjek pomisli da razumijevanje ovisi o emocionalnom stanju, slično onom kada konzumiramo umjetnost... Iskustvo nastavnika mi govori da se rijetko tko želi baviti nečim što je tek suhoparno jasno. Jer kada bi nam Priroda bila suviše «jasna», ne bi bila «istinita» - u skladu s Bohrovom komplementarnom opaskom. Matematički opis Prirode, ma kako uspješan ili elegantan bio, ne može biti jedini zadatak kvantne mehanike. Postoji još temeljniji zadatak, a to je: otkriti što stoji u pozadini jednadžbi, što se nalazi na samom dnu kvantne spoznaje - ako dno uopće postoji.

«Estetika je pokretačka snaga suvremene fizike. Fizičari su otkrili nešto čudesno: Priroda je, na osnovnoj razini, predivno zamišljena.» (Anthony Zee).

Na kraju, sjećanje: Festival je bio vrlo živopisan i slikovit. Razlog mog sudjelovanja je bio izazov, naučiti nešto novo i prisiliti se na djelovanje, provesti dobro vrijeme i zabaviti se. Puno sam profitirao od Festivala i siguran sam da nisam usamljen slučaj, da su svi obogaćeni. Prema tome, još jednom: Pozdrav Festivalu! Do slijedećeg podizanja zastave! A ako nam je (kvantni) svijet i dalje čudan, sjetimo se Spidera, s čime ćemo ga usporediti? A... možda nije kvantna mehanika čudna nama nego smo mi čudni kvantnoj mehanici.



goran.bozic1@zg.hinet.hr

