

# Od klasične do kvantne fizike

*Prof. dr. sc. Franjo Sokolić, Sveučilište u Splitu, Fakultet prirodnoslovno-matematičkih znanosti i kineziologije*  
(draft verzija 2, za internu upotrebu)

Gornji se naslov može shvatiti na barem dva načina. Prvi bi bio povijesni. U kojem se kontekstu pojavila kvantna teorija? U čemu se sastoji ta drastična novina s obzirom na prijašnju fiziku, do stupnja da se sve ono što je prethodilo proglasi klasičnom fizikom, kao antitezom kvantne? Drugi bi bio pedagoški. Već je Newtonova fizika neintuitivna, a da i ne govorimo o teoriji relativnosti. Što onda reći za kvantnu teoriju, za koju je Richard Feynman rekao da je nitko ne razumije.

Mogu se postaviti slijedeća pitanja: Da li kvantnu teoriju treba uopće predavati? Čak i ako je odgovor na ovo pitanje DA, ostaju pitanja: Kako? I kada? Zašto učiti kvantnu teoriju? Prije svega zato, jer je ona najveći intelektualni izazov pred čovjekom XXI st. i drugo, ona je osnova velikog broja tehnoloških pronalazaka suvremenog svijeta. U čemu je njen izazov? Ta je teorija potpuno različita od svih ostalih znanstvenih teorija, do stupnja da se moralo redefinirati što teorija mora biti, da bi joj se moglo pripisati atribut znanstvenosti.

Znanost je proizašla iz ljudske potrebe da objasni prirodne fenomene. Vrlo brzo ona je napustila pretenziju da kaže zašto se nešto događa i ograničila se na objašnjenje samo onoga kako se nešto događa. Kvantna teorija je napustila i tu pretenziju. Ona nije ni kauzalna, ni deterministička.

Kauzalnost znači da svakom događaju prethodi neki uzrok. Kvantna teorija predviđa koji će dio od ukupnog broja čestica doživjeti neku promjenu, ali ne može reći koja će, od dviju određenih čestica, doživjeti tu promjenu prije druge. U klasičnoj teoriji vjerojatnost je posljedica nedovoljnog poznavanja svih elemenata sistema, dok je u kvantnoj teoriji ona intrinzično svojstvo sistema, koje se ne može izbjeći.

Determinizam znači da iz danog stanja sistema znamo jednoznačno odrediti njegova buduća stanja ili stanja koja su mu prethodila. Schrodingerova jednadžba je deterministička, nedeterministički je sam akt mjerenja ili, kako se kaže, redukcija valnog paketa. Činom mjerenja sistem je projiciran u jedno od stanja u kojem mjerena veličina ima točno određenu vrijednost. No teorija ne predviđa koja će to vrijednost biti, već samo daje vjerojatnost s kojom će se ona pojaviti, što predstavlja odstupanje od determinizma.

Čin mjerenja općenito predstavlja jedan od osnovnih problema kvantne teorije. Mjerenje modificira sam sistem, nakon mjerenja on više nije ono što je bio. Prema tome mi nemamo informacija o sistemu kakav je on kad ga ne „gledamo“. Mi nemamo pristupa sistemu onakvom kakav je on sam po sebi, već samo onakvom kakav je nakon promjene koju je izazvalo mjerenje. To drastično reducira ideju koju možemo imati o objektivnosti vanjskog svijeta. Ono što nam je dostupno je samo svijet modificiran interakcijom sa mjernim instrumentom.

Ono što teorija predviđa je, kako će sistem reagirati sa eksperimentalnim uređajem, a ne što se s njim događa dok ga mi ne promatramo. Prema tome, naša je spoznaja objektivnog svijeta vrlo ograničena. Subjekt je nerazdvojni dio svakog akta mjerenja i to ne samo time što koncipira i vrši mjerenje, već i time što mjerenjem modificira objekt ispitivanja. Subjekt i objekt su povezani na nerazdvojni način, tako da je pojam apsolutne objektivnosti doveden u pitanje. Ta ideja ima duboke filozofske posljedice. Vanjski realni svijet gubi se u magli subjektivnosti, preostaje nam samo realnost naših opažanja. Kvantna teorija nam može dati predviđanja koji će biti rezultati naših mjerenja, ali samo preko vjerojatnosti mogućih ishoda. Izgubljena je jednoznačnost predviđanja rezultata.

Mnogi su znanstvenici doživjeli tu situaciju kao nešto što je fizikalno potpuno neprihvatljivo. Paradoksalno je da su među njima bili i mnogi od onih koji su značajno doprinijeli izgradnji kvantne teorije, kao što su Albert Einstein, Max Planck, Erwin Schrodinger, Louis de Broglie i Paul Ehrenferst. Najvažnije i najdubokoumnije kritike kvantne teorije, kako ju je prakticirala kopenhagenska škola oko Nielsa Bohra, dao je Einstein.

Sve više povjesničara fizike [Kuhn] danas pripisuje upravo Einsteinu primat izricanja kvantne hipoteze u svom članku o fotoelektričnom efektu iz 1905. god., za koji je i dobio Nobelovu nagradu za 1921. god. Rad Maxa Plancka o zračenju crnog tijela iz 1900. god. sadrži implicite u sebi ideju kvantizacije, ali se sam Planck zdušno borio još desetak godina da ju pokuša eliminirati jer mu se činila nepotrebnom i suprotnom idejama na kojima je sazdana čitava fizika. Ovo posljednje je točno, ali i neizbježno. Plack je bio vrlo tradicionalna osoba i uopće nije želio da dobije aureolu revolucionara, što mu se na kraju dogodilo.

Put kojim je krenula kvantna teorija radovima Nielsa Bohra, Wernera Heisenberga, Maxa Borna, Wolfanga Paulia i Paula Jordana nije se svidio ostalima. Jedan od problema bile su Heisenbergove relacije neodređenosti, koje postavljaju granicu na točnost s kojom možemo odrediti određena svojstva sistema. Svojstva su grupirana u parove kao što su položaj i brzina, energija i vrijeme, orijentacija u prostoru i kutna količina gibanja. Bolje poznavanje jednog elementa iz para smanjuje stupanj poznavanja onog drugog, komplementarnog elementa. Einsteinu se to činilo toliko suprotno logici fizike da je smišljao eksperimente koji bi pokazali da to nužno dovodi do unutrašnjih kontradikcija u teoriji.

Kad su svi njegovi pokušaji da pronade unutrašnja nekoherentnost kvantne teorije, pali u vodu, Einstein je sa svojim suradnicima Podolsky-em i Rosen-om lansirao ideju da kvantna teorija nije potpuna. To je ideja skrivenih varijabli. To znači da postoje fizikalni parametri koji nisu određeni standardnom kvantnom teorijom. Potpunost neke teorije znači da varijable te teorije u cijelosti opisuju neki sistem. Pobornici kopenhavske interpretacije kvantne teorije tvrde da je ona potpuna, a von Neuman je u svom

djelu Matematičke osnove kvantne mehanike dao za to i formalan dokaz.

## Polarizacija svjetlosti kao ilustracija kvantnog ponašanja

Svjetlost je transverzalni elektromagnetski val. Ona ima dodatni stupanj slobode, koji se naziva polarizacijom svjetlosti, kojoj odgovaraju dva stanja koji mogu biti izabrani na različite načine. Jedan način je da se govori o horizontalno (h) ili vertikalno (v) linearno polariziranoj svjetlosti, što odgovara dvjema različitim orijentacijama ravnine oscilacije električnog polja u elektromagnetskom valu. Drugi način je da se govori o lijevo ili desno cirkularno polariziranoj svjetlosti, što odgovara dvjema orijentacijama spina fotona, +1 i -1. Pomoću kvantne teorije polja pokazuje se da foton ne može imati projekciju spina 0.

Orijentacija vektora polarizacije određuje se polarizatorom koji je tako izgrađen od tvari koja propušta samo svjetlost određene polarizacije. Kristal kalcita je dvolomac, što znači da ima svojstvo da nepolariziranu svjetlost dijeli na ordinarnu i ekstraordinarnu zraku, koje su međusobno ortogonalno polarizirane, vertikalno i horizontalno. Što se događa ako na dvolomac dolazi polarizirana svjetlost? Ako je ona horizontalno polarizirana na izlazu iz kalcita imat ćemo samo jednu zraku, onu koja odgovara vertikalnoj polarizaciji.

Što se događa ako je ulazna zraka linearno polarizirana pod kutom od  $45^\circ$ ? Tada ćemo na izlazu iz dvolomca imati dvije zrake sa pola intenziteta. Ako te izlazne zrake analiziramo sa polarizatorom pod kutom  $45^\circ$  i  $-45^\circ$ , tada će svaki od njih propustiti svjetlo sa pola intenziteta. To znači da je vjerojatnost da foton koji je polariziran pod  $45^\circ$  projiciran na stanje horizontalne ili vertikalne polarizacije 50%, dok je za svako od tih stanja vjerojatnost da budu projicirana na  $45^\circ$  ili  $-45^\circ$  opet 50%. Foton nakon projiciranja na stanje v ili h gubi memoriju o svom početnom stanju od  $45^\circ$ .

Ako pak nakon jednog dvolomca stavimo drugi dvolomac u suprotnoj orijentaciji on će

dvije zrake ponovo spojiti u jednu. Ako je ulazna zraka bila polarizirana pod  $45^\circ$ , tada će i izlazna zraka biti jednako polarizirana. Što to znači na nivou jednog fotona? To znači da provjera orijentacije polarizacije promijeniti njegovo stanje, no ako se ta provjera ne vrši, njegovo se stanje ne mijenja.