

## EKSPERIMENTALNE VERIFIKACIJE KVANTNE MEHANIKE

Fedor Herbut

Odsek za fizičke i meteorološke nauke

Prirodno-matematičkog fakulteta u Beogradu

Kvantna mehanika, kao i druge grane savremene fizike, razvijala se veoma intenzivno teorijski i eksperimentalno. Iako je jedva starija od pola veka, kvantna mehanika je uspešno eksperimentalno proverena u širokom dijapazonu svojih raznovrsnih aspekata.

Ja ću govoriti o jednom specifičnom idejnom aspektu kvantne mehanike, na kom je mnogo radjeno teorijski i eksperimentalno poslednjih desetak godina. Radi se o tzv-oj nelokalnosti u daljinskim korelacijama.

Sve je to počelo još 1935. godine sa slavnim člankom Einsteina, Podolskog i Rosena (EPR).<sup>1</sup> To je bio pokušaj da se dokaže da je kvantna mehanika, kako se to kaže, nekompletna. To će reći, da ona ne kazuje sve o fizičkim objektima što je moguće iskazati: da ispod njenih statističkih predikcija leži jedna kauzalna (tj. deterministička) subkvantna mehanika budućnosti, koja je danas u hipopetičkoj formi poznata pod nazivom "teorija skrivenih parametara".

Sve do pojave poznatog rada Bell-a 1965. godine,<sup>2</sup> dakle punih 30 godina, misaoni eksperiment EPR o nekompletnosti bio je mnogo puta opovrgavan na nivou čisto akademske diskusije. U pomenutom radu Bell je izveo jednu nejednakost iz pretpostavke tzv-e lokalnosti. Kvantna mehanika ne zadovoljava Bell-ovu nejednakost. Einstein i njegovi saradnici smatrali su lokalnost za nešto sasvim očigledno nužno u prirodi.

Pretpostavka lokalnosti se sastoji u sledećem: ako su dve čestice toliko udaljene jedna od druge da se može smatrati da ne interaguju, onda rezultati merenja na jednoj od njih ne zavise od toga da li se nešto meri i šta se meri na drugoj. Nelokalnost je suprotna pretpostavka.

Dakle, iz Bell-ovog rezultata je proizašlo da je kvantna mehanika nelokalna. Veliki broj uglednih fizičara bio je spreman da poveruje da ovog puta kvantna mehanika nije u pravu. Nelokalnost je u oštroj suprotnosti sa našom fizičkom intuicijom, školovanom na učenjima klasične fizike (tj. nerelativističke i relativističke fizike kakva je bila do pojave kvantne mehanike).

I Bell-ov rezultat se odnosio na misaoni eksperiment. Clauser i saradnici su 1969. godine<sup>3</sup> uspeali da izvedu Bell-ovu nejednakost za realan eksperiment. To je utrlo put za nešto što se zove experimentum crucis, tj. odlučujući eksperiment. Izvršili su ga Freedman i Clauser 1972. godine.<sup>4</sup>

Radi se o kaskadnoj deekscitaciji Ca atoma:  $(J=0) \rightarrow (J=1) \rightarrow (J=0)$ . Dva izračena fotona lete u suprotnim smerovima i njih love dva simetrično postavljena optička uređjaja. Svaki od tih uređjaja sastoji se iz sočiva, filtra za talasnu dužinu, linear-nog polarizatora koji može da se rotira i može da se ukloni i iz detektora pojedinačnih fotona. Meri se  $R(\phi)$ , broj koinecidenci koje se sastoje od detekcije oba fotona iz pomenutog para i to pri uglu  $\phi$  uzajamne zarotiranosti polarizacionih ravni polarizatora u levom i desnom uređjaju. Takodje se meri  $R_0$ , broj koinecidenci (tj. detektovanih parova fotona) kada je polarizator uklonjen iz oba uređjaja. Dakle,  $R(\phi)/R_0$  je relativna frekvenca dogadjaja da su se ravni polarizacije dva kaskadna fotona pokazala zarotirana za ugao  $\phi$  jedna u odnosu na drugu. U graničnom slučaju  $\lim_{R_0 \rightarrow \infty} R(\phi)/R_0$  je verovatnoća gornjeg dogadjaja. Ona se može izračunati iz kvantne mehanike, a Bell-ova nejednakost daje za nju graničnu vrednost.

Konkretno, Bell-ova nejednakost daje

$$|R(\pi/8) - R(3\pi/8)|/R_0 \leq 0.25, \quad (1)$$

a kvantno-mehanička vrednost je

$$\left[ R(\pi/8)/R_0 - R(3\pi/8)/R_0 \right]_{KM} = 0.301 \pm 0.007. \quad (2)$$

Eksperiment Freedmana i Clausera je dao sledeći rezultat:

$$\left[ R(\pi/8)/R_0 - R(3\pi/8)/R_0 \right]_{\text{eksp}}^{(FC)} = 0.300 \pm 0.008. \quad (3)$$

Dakle, eksperiment je potvrdio kvantno-mehaničku predikciju. Time bi ideja lokalnosti bila definitivno prognana iz moderne fizike da se nisu pojavile sumnje zbog drugih eksperimenata sa suprotnim rezultatom.

Holt i Pipkin<sup>5</sup> izvršili su sličan eksperiment sa dva kaskadna fotona iz izotopa <sup>198</sup>Hg atoma. Oni su dobili

$$\left[ R(3\pi/8)/R_0 - R(\pi/8)/R_0 \right]_{\text{eksp}}^{(HP)} = 0.216 \pm 0.013, \quad (4)$$

što zadovoljava Bell-ovu nejednakost (1), a u suprotnosti je sa kvantno-mehaničkom predikcijom (2). Ovaj rezultat ostavio je znatno manji utisak na fizičarsku javnost nego gornji suprotni rezultat Freedman-a i Clauser-a pre svega zbog toga što čak nije ni objavljen; samo je razaslan u vidu preprinta zainteresovanima. To je bio siguran znak kolebanja samih autora u pogledu ubedljivosti rezultata.

Ipak, posejano je seme sumnje i nemirni duh eksperimentatora doveo je do novih zanimljivih merenja. Sam profesor Clauser izvršio je merenje<sup>6</sup> na skoro istom atomu, bio je to izotop spina nula <sup>202</sup>Hg. Dobičen je rezultat

$$\left[ R(3\pi/8)/R_0 - R(\pi/8)/R_0 \right]_{\text{eksp}}^{(C)} = 0.2885 \pm 0.0093. \quad (5)$$

Dakle, opet je potvrđena kvantno-mehanička predikcija, a opovrgnuta lokalnost.

Fry i Thompson su takodje izvršili merenje<sup>7</sup> linearne polarizacije fotona sa jednog sličnog atoma, sa <sup>200</sup>Hg. Njihov rezul-

tat glasi

$$\left[ R(3\pi/8)/R_0 - R(\pi/8)/R_0 \right]_{\text{eksp}}^{(\text{FT})} = 0.296 \pm 0.014, \quad (6)$$

opet u korist kvantne mehanike.

Radi kompletnosti ovoga prikaza moram da napomenem da navedeni eksperimenti nisu bili sto-po-sto odlučujući. Precizna analiza pokazuje<sup>8</sup> da tu postoji još jedna, za sada nemerena, pretpostavka bez koje ne dolazi do protivurečnosti između kvantne mehanike i Bell-ove nejednakosti. Pretpostavka o kojoj je reč je toliko verodostojna da do sada nije bilo dovoljno motiva da se pokuša eksperimentalno proveriti.

Jedna druga grupa eksperimenata sastojala se u analognim merenjima na paru fotona dobijenih iz anihilacije pozitrona i elektrona. Tu je pre svega eksperiment Faraci i saradnika.<sup>9</sup> Oni su se koristili sa<sup>22</sup>Na kao izvorom pozitrona. Dobili su rezultat koji je potvrdjivao Bell-ovu nejednakost, a opovrgavao kvantno-mehaničku predikciju. Oni su svoj rezultat objavili, ali u veoma sažetoj formi.

Kasday i saradnici su se u sličnom eksperimentu koristili sa<sup>64</sup>Cu kao izvorom pozitrona, a anihilacija sa elektronima se odigravala u bakru.<sup>10</sup> Njihov rezultat je bio u korist kvantne mehanike. Slične eksperimente su još izvršili Wilson i saradnici<sup>11</sup> i Bruno i saradnici.<sup>12</sup> Obe ekipe su potvrdile kvantnu mehaniku.

Jedan jedini eksperiment izvršen je sa masenim česticama i to sa protonima. Lamhi-Rachti i Mittig izvršili su merenje korelacije spinskih projekcija dva protona koji su rasejanjem jednog na drugom dovedeni u nisko-energetsko S stanje.<sup>13</sup> Njihov rezultat je takodje potvrdio predviđanje kvantne mehanike.

Najnoviji rezultat o nelokalnosti dolazi iz Pariza. Alain Aspect se koristio modernom laserskom tehnikom i izvršio je merenje na dva fotona sa rezultatom koji ima veoma ubedljivu statistiku. I on je potvrdio kvantno-mehaničko predviđanje.<sup>14</sup> Možda je

ovo kraj dileme da li je priroda nelokalna ili su Holt-Pipkin i Faraci sa saradnicima izvršili loše eksperimente.

Zanimljiv je i jedan drugi eksperiment Aspect-a, koji je u toku <sup>15</sup> i koji rešava jednu suptilniju dilemu na granici fantastičnog. Naime, u svim gornjim eksperimentima postoji logička mogućnost da jedan uređaj "komunicira" rezultat svog merenja drugom (putem nepoznatog mehanizma) preko signala koji bi se kretao brzinom manjom od brzine svetlosti. U Aspect-ovom eksperimentu obezbeđen je mehanizam (neki ultrasonični talasi na površini kristala) koji automatski "donosi odluku" koja će se linearna polarizacija (od dve moguće) meriti. Na taj način merenja dva uređaja su dva događaja koje razdvaja prostorni interval (relativistički gledano). Ako eksperiment potvrdi predikciju kvantne mehanike, kao što se veruje da će biti slučaj, onda će jedna jača, relativistička forma lokalnosti, tzv. Einstein-ova separabilnost, biti opovrgnuta. Definicija Einstein-ove separabilnosti glasi: ako se nešto događa (neko merenje na primer) na jednoj od dve udaljene i neinteragujuće čestice, onda događaji (merni rezultati) na drugoj koji su prostornim intervalom u prostoru Minkowskog odvojeni od prvih događaja, ne mogu da zavise od ovih prvih događaja. Kao što je poznato, Einstein-ova separabilnost je jedna od premisa specijalne teorije relativiteta.

Pored ustoličenja pomalo mističnog i intuitivno teško shvatljivog pojma nelokalnosti i verovatno i Einstein-ove neseperabilnosti postoji još jedan dramatičan vid opisanih rezultata. Radi se o ničem manjem nego o verovanju fizičara u samu realnost sveta. To će najbolje da ilustruju dva tipična citata. Prvi potiče iz zaključka preglednog članka Clauser-a i Shimony-ja <sup>8</sup> (to je po mom mišljenju najbolji pregled cele problematike i ja sam se najviše koristio njime u pisanju ovog prikaza): "Primorani smo ili da napustimo jaku verziju EPR kriterijuma realnosti - što se svodi na napuštanje realističkog pogleda na svet (možda ako niko ne čuje

kako se drvo ruši u šumi, ono ipak ne proizvodi zvuk) - ili da prihvatimo neku vrstu delovanja na rastojanje".

Drugi citat je podnaslov članka koji je o ovim problemima napisao profesor d'Espagnat u časopisu Scientific American:<sup>16</sup> "Ispostavlja se da je doktrina da se svet sastoji iz predmeta čije je postojanje nezavisno od ljudske svesti u protivurečnosti sa kvantnom mehanikom i sa činjenicama koje su eksperimentalno ustanovljene".

Medjutim, i pored iznenadjujuće jakih formulacija veoma uglednih fizičara, ovakvi zaključci ne slede nužno iz izloženih činjenica. Da se u celoj problematici uopšte ne radi o pitanju realističkog (to znači materijalističkog) pogleda na svet, već samo o lokalnosti jasno i nepobitno je pokazao Stapp.<sup>17</sup> Ja sam od početka pošao od njegove pozicije, koju smatram jedino ispravnom.

Na kraju ovog pregleda želeo bih da ukratko prikažem kojim se istraživačkim problemima iz kvantne mehanike beogradski teorijski fizičari bave. Radi se o potprojektu "kvantna mehanika" u okviru istraživačkog projekta "Fundamentalni i metodološki problemi u fizici".

Zvonko Marić je okosnica tri istraživanja:

(i) Neki aspekti tzv. stohastičkog (ustvari statističkog i objektivnog) zasnivanja kvantne mehanike. Saradnik: Djordje Živanović.

(ii) Izučavanje superoperatora (tj. operatora koji deluju na operatore) u kvantnoj statističkoj fizici ireverzibilnih procesa. Saradnici: Mira Popović-Božić i Davidović

(iii) Neki problemi kvantne logike. Tu se radi o svojevrsnoj pojmovnoj strukturi koja proizlazi iz načina kako jedan kvantni događaj (ili propozicija) može da implicira drugi događaj (ili propoziciju). Saradnik: Kron.

Milan Vujičić je okosnica pet istraživanja:

(i) Proučavanje nekih vidova spajanja grupa simetrija kvantnih sistema u jednu širu grupu. Saradnici: Djordje Šijački i Fedor Herbut.

(ii) Konstrukcija tzv. linijskih grupa (grupa simetrija polimernih molekula) i konstrukcija njihovih ireducibilnih reprezentacija, neophodnih za kvantnu teoriju polimera. Saradnici: Ivan Božović i Fedor Herbut.

(iii) Izvodjenje linearno-antilinearnih ireducibilnih reprezentacija grupa simetrija fizičkih sistema. Saradnici: Zorica Papadopolos i Fedor Herbut.

(iv) Izvodjenje magnetnih linijskih grupa i njihova primena u teoriji faznih prelaza. Saradnik: Milan Damnjanović.

(v) Izučavanje opšteg fenomena EPR u okviru problematike distantnih korelacija. Saradnik: Fedor Herbut.

Igor Ivanović bavi se problemom merenja kvantnog stanja (u okviru problematike primene teorije informacije u kvantnoj mehanici). Takodje izučava neke aspekte Bell-ove nejednakosti.

Najzad da pomenem da ja, pored navedenog, proučavam i jednočestičnu strukturu kvantnih sistema koji se sastoje od identičnih čestica.

#### REFERENCE

1. Einstein A., Podolsky B. i Rosen N., 1935, Physical Review, 47, 777-80.
2. Bell J.S., 1965, Physics (New York), 1, 195-200.
3. Clauser J.F., Horne M.A., Shimony A. i Holt R.A., 1969, Physical Review Letters, 23, 880-4
4. Freedman S.J. i Clauser J.F., 1972, Physical Review Letters, 28, 938-41.

5. Holt R.A. i Pipkin F.M., 1973, preprint Harvardskog univerziteteta.
6. Clauser J.F., 1976, Physical Review Letters, 36, 1223-6.
7. Fry E.S. i Thompson R.C., 1976, Physical Review Letters, 37, 465-8.
8. Clauser J.F. i Shimony A., 1978, Reports on Progress in Physics, 41, 1881-1927.
9. Faraci G., Gutkowski S., Notarrigo S. i Pennisi A.R., 1974, Lettere al Nuovo Cimento 9, 607-11.
10. Kasday L.R., Ullman J.D. i Wu C.S., 1970, Bulletin of the American Physical Society, 15, 586.  
Kasday L.R., 1975, Nuovo Cimento, 25B, 633-61
11. Wilson A.R., Lowe J. i Butt D.K., 1976, Journal of Physics G: Nuclear Physics, 2, 613-24.
12. Bruno M., d'Agostino M. i Maroni C., 1977, Nuovo Cimento, 40B, 142-52.
13. Lamehi-Rachti M. i Mittag W., 1976, Physical Review, 14, 2543-55.
14. Aspect A., 1981, referat na Berlinskom kongresu matematičkih fizičara.
15. Aspect A., 1976, Physical Review D, 14, 1944-51:  
Aspect A., 1981, referat na Berlinskom kongresu matematičkih fizičara.
16. d'Espagnat B., 1979, Scientific American, 241, 158-81.
17. Stapp H.P., 1980, Foundations of Physics, 10, 767-95.