

MLADEN PAVIČIĆ

# DA LI

## KVANTNO - MEHANIČKI PARADOKSI ZAISTA NISU PARADOKSI

U subotnjem broju »The New York Timesa«, od 4. V 1935,<sup>1</sup> pojavio se oduži članak pod naslovom »Einstein napada kvantnu teoriju«. Članak kojeg je dostavio, ni manje ni više već, Washingtonski Odsjek za nauku, počinje objavom da će profesor Einstein napasti, za nauku *značajnu*,<sup>2</sup> teoriju kvantne mehanike; Teoriju koje je on u neku ruku, kaže se, tvorac. Odmah zatim slijedi i pokušaj umirenja čitaoca objašnjenjem da Einstein zaključuje kako je teorija, iako »nepotpuna«, ipak »ispravna«. Što znače dva posljednja pojma objašnjava se dalje slijedećim citatom: »Fizičari vjeruju

da postoje realne materijalne stvari neovisne o našem umu i našim teorijama. Mi konstruiramo teorije i izmišljamo riječi (kao što su elektron i pozitron itd.) u nastojanju da si objasnimo ono što znamo o našem vanjskom svijetu i da si pomognemo u postizanju daljnjeg saznanja o njemu. Prije

<sup>1</sup> Vol. 84, No. 28224, str. 11, 4. stupac.

<sup>2</sup> Kurziv autorov; Podatak o izvoru članaka je dalo uredništvo u odgovoru na Einsteinovu noticu citiranu u 3.

<sup>3</sup> The New York Times, 7. V 1935, Vol 84, No. 28227, str. 21.

nego što se može smatrati zadovoljavajućom, teorija mora proći dvije provjere. Prvo, teorija nam mora omogućiti računanje činjenica prirode i ta se računanja moraju vrlo točno podudarati s promatranjem i eksperimentom. Drugo, od zadovoljavajuće teorije, kao dobre slike objektivne realnosti, očekujemo da sadrži odgovarajući dio za svaki element fizikalnog svijeta. Teorija koja udovoljava prvom zahtjevu može se nazvati 'ispravnom', dok se ako zadovoljava drugi zahtjev može nazvati 'potpunom'. A sada je, citira dalje, »dokazano da kvantna mehanika nije potpuna teorija«.

Međutim, uredništvo uglednih novina, ili, možda, Washingtonski Odsjek za nauku, nije, izgleda, bilo najzadovoljnije takvim zaključkom, pa neposredno iza članka slijedi interview s profesorom E. V. Condonom. On, prvo, spremno izjavljuje da »argumenti, u velikoj mjeri, ovise upravo o tome kakvo se značenje pridjeljuje riječi 'realnost' u vezi s fizikom«. Zatim izvještava o Einsteino-  
vom nezadovoljstvu s indeterminizmom kvantne mehanike, da bi na kraju lakonski zaključio: »U posljednjih pet godina Einstein je podvrgao kvantno mehaničke teorije vrlo kritičkom istraživanju s tog stanovišta. Bojim se, međutim, da su do sada statističke teorije (kvantne mehanike) izdržale kritiku.«

Čitalac uglednih novina, s druge strane, je do tog trenutka već svakako bio postao nestrpljiv da sazna o čemu se zapravo radi, ali tu svoju znatiželju nije mogao odmah utažiti. Štoviše, kad se tri dana kasnije u istim novinama, na 21. stranici,<sup>3</sup> pojavila

jedna notica, mogao se čak uplašiti da mu to nikad neće ni poći za rukom. Noticu je, naime, potpisao sam Einstein i u njoj se kaže: »Informacije na osnovi kojih je baziran članak 'Einstein napada kvantnu teoriju', u vašem broju od 4. V, bile su dane bez mog ovlaštenja. Moja je stalna praksa da naučne stvari diskutiram isključivo pred odgovarajućim forumom.«

Čitaočev strah se, nažalost, pokazao dvostruko opravdanim. S jedne strane, objašnjenje »nepotpunosti« se pojavio u »odgovarajućem« časopisu »The Physical Review« — čiji je nivo prosječnom čitaocu »The New York Timesa« potpuno nedostupan — i od tada postalo poznato pod nazivom Einstein-Podolsky-Rosenov paradoks.<sup>4</sup> S druge strane, većini čitalaca — sasvim uključujući i fizičare — problem nije poznat, ili barem nije jasan, niti do dana današnjega. Ovo posljednje — ne zbog toga što se problem pokazao isuviše složenim, već zbog toga što se od tada pa do danas uporno izbjegava problem sâm, onako kako je postavljen, dok se isto tako uporno serviraju sve nova i nova oficijelna tumačenja, objašnjenja i opovrgavanja (znanstvenicima putem eksperimenata, naučnih članaka i *autoriteta*, studentima putem udžbenika, predavanja i *autoriteta*, laicima putem popularnih knjiga, mass-medium-emisija i *autriteta*, financijerima putem izvještaja, obračuna i ...?). Ovdje očigledno nešto nije u redu. U tako egzaktnoj nauci kao što je fizika, ono što je jednom nedvosmisleno opovrgnuto ne pruža mogućnost za daljnje

<sup>4</sup> Einstein, A., B. Podolsky and N. Rosen: »Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?«, *Phys. Rev.* 47 (1935) 777—780.

<sup>5</sup> Dyson, F. J.: »Innovation in Physics«, *Sci. Am.* 199 (1958, Sept.) 74—75.

<sup>6</sup> Dio ih je, na današnjem mjernom nivou (ali ne u smislu današnje tehničke nerazvijenosti, već u smislu nemogućnosti koncipiranja eksperimenta), principijelno neodlučiv (v. npr.: Gardner, M. R.: »Quantum-Theoretical Realism: Popper and Einstein v. Kochen and Specker«, *Brit. J. Phil. Sci.* 23 (1972) 12—23; Ballentine, L. E.: »The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics«, *Rev. Mod. Phys.* 42 (1970) 358—381; Mayants, L. S.: »On Probability Theory and Probabilistic Physics — Axiomatics and Methodology«, *Found. Phys.* 3 (1973) 413—433), dok za one koji bi mogli biti mjerno razlučeni nikad nisu financirani eksperimenti (navest ćemo samo najnoviju literaturu u kojoj čitalac može naći detaljne reference: Vigier, J.-P.: »De Broglie Waves on Dirac Aether: A Testable Experimental Assumption«, *Lett. Nuovo Cim.* 29 (1980) 467—475; Garuccio,

A. and J.-P. Vigier: »Possible Experimental Test of the Causal Stochastic Interpretation of Quantum Mechanics: Physical Reality of de Broglie Waves«, *Found. Phys.* 10 (1980) 797—801; Lee, V. J.: »Physical Foundations of Quantum Theory: Stochastic Formulation and Proposed Experimental Test«, *Found. Phys.* 10 (1980) 77—107; Gudder, S.: »Proposed Test for a Hidden Variable Theory«, *Int. J. Theor. Phys.* 19 (1980) 163—168; Rietdijk, C. W.: »Suggestions for Experiments on Action Quanta«, *Nuovo Cim.* 63 B (1981) 541—564; Prosser, R. D.: »Quantum Theory and the Nature of Interference«, *Int. J. Theor. Phys.* 15 (1976) 181—193; — napomenimo samo da niti jedna, osim posljednje, od spomenutih ideja nije mlada od deset godina.

<sup>7</sup> Osim rijetkih izuzetaka (Landé, A.: »Quantum Mechanics in a New Key«, New York, 1973; Majanc, L. S.: »Kvantovaja fizika i prevraščeniya materii«, Moskva, 1967; Blohincev, D. I.: »Kvantovaja mehanika«, Moskva, 1981; Blohincev, D. I.: »Osnovi kvantovoi mehaniki«, Moskva, 1976; de Broglie, L.: »La Thermodynamique de la pratique isolée«, Paris, 1964).

dileme (osim eventualno pedagoških), a pogotovo ne one koje traju pola stoljeća. Pogledajmo, stoga, postepeno, o kakvoj se to dvo- ili više-smislenosti radi.

### Pozadina

#### Einstein-Podolsky-Rosenovog paradoksa

Smatra se, nažalost, još i danas normalnim da upoznavanje s kvantnom mehanikom — za razliku od klasične — teče na slijedeći način: »(U početku se student) počinje brinuti, jer ne razumije što radi. Taj period traje šest mjeseci ili duže, i on je naporan i neugodan. Tada, sasvim neočekivano, ... student kaže samom sebi ...: 'Sad razumijem da se nema što razumjeti...' Kod svake nove generacije studenata ima sve manje otpora koji treba biti slomljen prije nego što prihvate kvantne ideje.«<sup>5</sup>

Postoje dva razloga koji uvjetuju ovakvu situaciju i potrebu za »slamanjem«. Prvi, manje važan, jer običaj da se na budućeg znanstvenika nahrupi formalnim aparatom i pripadnim algoritmima. On tada traži opravdanje za evidentne neobičnosti u komparaciji s klasičnim aparatom i svakodnevnim načinom zaključivanja. Međutim, takva opravdanja nisu čisto empirijske prirode i on to osjeća, ali obično pripisuje svojoj nesposobnosti ili svom neznanju. Naime, objektivno postoji nekoliko mogućih i konzistentnih formalnih interpretiranih aparata koji su na današnjem mjernom nivou eksperimentalno međusobno neodlu-

čeni,<sup>6</sup> iako je, naravno, oficijelna standardna formulacija (formulacija na tzv. Hilbertovom prostoru uz Kopenhagenku interpretaciju) algoritamski najrazvijenija. No, kandidatu se tada ne kaže da je aparat kojim ga se podučava najrašireniji, da se većina njime služi, da se praktički svi udžbenici drže njega<sup>7</sup> itd., itd., i da svakako — i jedino pouzdano — nije u suprotnosti s empirijskim činjenicama, već ga se nastoji uvjeriti u jedinstvenost i neprikosновенost tog aparata i to misaonim pokusima, interpretativnim zaključcima i paradigmama koji, međutim, ili nisu točni ili nisu eksperimentalno odlučivi. Ovo posljednje je drugi, puno važniji razlog, razlog potrebe za »slamanjem«. Pri tome se misli na slijedeće čuvene pokuse, paradigme i zaključke, koji se mogu naći u gotovo svakom udžbeniku, popularizatorskoj publikaciji ili sveučilišnom predavanju, tako da ćemo referirati samo onu literaturu koja se bavi njihovom kritikom ili opovrgavanjem: Heisenbergov mikroskop (nije odlučivo),<sup>8</sup> kvantni prijelaz: sistem nakon mjerenja ostaje u svojstvenom stanju određenom izmjerenom svojstvenom vrijednošću mjerene opservable (općenito netočno),<sup>9</sup> filtracioni pokus (nije točno),<sup>10</sup> Bohrove vrijeme-energija relacije neodređenosti (npr. u eksperimentu interferencije ili procesu raspada) (nije točno),<sup>11</sup> objašnjenje relacija neodređenosti nekontroliranim disturbancijama (nije točno),<sup>12</sup> izvedivost relacija neodređenosti iz principa komplementarnosti (nije točno),<sup>13</sup>

<sup>5</sup> Roychoudhuri, G. T.: »Heisenberg's Microscope — A Misleading Illustration«, *Found. Phys.* 8 (1978) 845—849; Angelidis, Th. D.: »Momentum Conservation Decides Heisenberg's Interpretation of the Uncertainty Formulas«, *Found. Phys.* 7 (1977) 431—449; Bunge, M.: »Survey of the Interpretation of Quantum Mechanics«, *Am. J. Phys.* 24 (1956) 272—286; Popper, K. R.: »Logik der Forschung«, Wien, 1935: §§ 73—76 — oprez: § 77 sadrži krucijalnu pogrešku ali ne utječe na prethodnu argumentaciju; Popper, K. R.: *Quantum Mechanics without 'The Observer'»* u Bunge, M. (ed.): »Quantum Theory and Reality«, Berlin, 1967, stre.: 7—44 (6. teza).

<sup>9</sup> Park, J. L.: »The Concept of Transition in Quantum Mechanics«, *Found. Phys.* 1 (1970) 23—33.

<sup>10</sup> Park, J. L. and W. Band: »Mutually Exclusive and Exhaustive Quantum States«, *Found. Phys.* 6 (1976) 157—172. (Članak daje statističku (ansambalsku) reinterpretaciju svih najvažnijih pojmova i algoritama u kvantnoj mehanici).

<sup>11</sup> Sorkin, R.: »On the Failure of the Time-Energy Uncertainty Principle«, *Found. Phys.* 9 (1979) 123—128; Bunge, M.: »The So-Called Forth Indeterminacy Relations«, *Can. J. Phys.* 48 (1970) 125—128; Aharonov, Y. and D. Bohm: »Time in Quantum Theory and the Uncertainty Relation for Time and Energy«, *Phys. Rev.* 122 (1961) 1649—1658; Mayants, L. S. W. Yourgrau and A. J. van der Merwe: »Some Methodological Problems in Quantum Mechanics«, *Ann. der Phys.* (7. Folge) 33 (1976) 21—35 (§ 4).

<sup>12</sup> Brown, H. R. and M. L. G. Redhead: »A Critique of the Disturbance Theory of Indeterminacy in Quantum Mechanics«, *Found. Phys.* 11 (1981) 1—2.

<sup>13</sup> Lahti, P. J.: »Uncertainty and Complementarity in Axiomatic Quantum Mechanics«, *Int. J. Theor. Phys.* 19 (1980) 789—842; Bugajski, S. and P. J. Lahti (1980): »Fundamental Principles of Quantum Theory«, *Int. J. Theor. Phys.* 19 (1980) 499—514.

valno-čestična dualnost na interferacionom eksperimentu s dva proreza, odnosno dvije rupe (nije odlučivo),<sup>14</sup> svođenje principa superpozicije na princip komplementarnosti, odnosno dualnosti, i obratno (općenito nije točno, iako se principi ne mogu tako reformulirati da to bude točno),<sup>15</sup> inkomezuralnost (istovremena nemjerljivost) komplementarnih observabli (koje odgovaraju nekomutirajućim operatorima-observablama) (eksperimentalno nije odlučivo za konfrakcična mjerenja izvan standardnog formalizma, točno unutar standardnog formalizma, ali je moguće formulirati teoriju vezanih observabli),<sup>16</sup> nepostojanje putanje (nije odlučivo),<sup>17</sup> akazualnos ti čuveni indeterminizam (nije odlučivo),<sup>18</sup> nemogućnost formuliranja tzv. »skrivenih varijabli« unutar standardnog formalizma (nije točno),<sup>19</sup> eksperimentalna opovrgnutost »skrivenih varijabli« (nije točno jer praktički niti jedna teorija skrivenih varijabli nije onog tipa koji je opovrgnut i za koji se dobiva utisak da je formuliran samo zato da bi bio opovrgnut; osim toga eksperimenti implicitno koriste kontra-faktičnu određenost što je u suprotnosti sa standardnom interpretacijom formalizma),<sup>20</sup> itd., itd.

Većina navedenih kritika ne koristi neke nove i neobične pretpostavke ili modele, već uglavnom ostajući u okvirima standardne matematske formulacije rigorozno dokazuje da su uvedeni pojmovi neosnovana interpretativna proširenja te formulacije; Odnosno, da na relaciji činjenice-model-

-predviđanja, tj. na relaciji empirija-spoznajeračunanje, spomenuti pojmovi i paradigme ne igraju presudnu ulogu i da je prirodoslovna slika svijeta nategnuta na jednu sasvim nefizikalnu stranu. Takva situacija, naime, može imati podlogu u mjerno-empirijskim specifičnostima mikrosvijeta u kojem mnoge razrade i ograničenja nisu ni provjerljivi ni opovrgljiviji; Ali da li samo u njima kad spomenuti neodlučivi elementi nimalo ne utječu na krajnje rezultate konkretnih računanja?

Nameće se, dakle, centralno pitanje: Zašto je sve to uvedeno i zašto opstojava? I da li su dodatna interpretativna proširenja integralni i nezaobilazni dio »puta nauke« samog po sebi ili su uvjetovana vanjskim, čak društvenim i ekonomskim faktorima?<sup>21</sup>

Odgovor, nažalost, mora biti nekategoričan. Ili, da postavimo problem objektivnije, na pitanje postavljeno u ovom obliku se zapravo ne može odgovoriti. Ne postoji, naime, ničija »intencija« uvođenja određene interpretacije, niti su »put nauke« i društveni okviri razvoja nauke jasno povezani. Društveni okviri neke prirodne nauke svakako ne mogu direktno odrediti njen razvoj, ali to još uvijek ne znači, kao što se za prirodne nauke često ističe,<sup>22</sup> da je nauka u svom konkretnom razvoju izolirana od vanjskih — neobjektivnih utjecaja.<sup>23</sup> Razvoj pojedinih modela unutar neke nauke je historijski proces i pripadne paradigme ovise ponajviše o vrsti reducirane predodžbe kojom su znanstvenici uspjeli

<sup>14</sup> Duane, W.: »The Transfer in Quanta of Radiation Momentum in Matter«, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. 9 (1923) 158—164; Born, M., W. Biem and A. Landé: »Dualism in Quantum Theory« & »Dialog on Dualism«, Phys. Today 21 (1968, Aug.) 51—56 (sadrži diskusiju za /Landé/ i protiv); Ballentine cit. u 6; Prosser cit u 6; Thankappan, V. K. and P. G. Nambi (1980): »A Modified Set of Feynman Postulates in Quantum Mechanics«, Found. Phys. 10 (1980) 217—236.

<sup>15</sup> Cit. pod 13; Lahti, P. J.: »Characterization of Quantum Logics«, Int. J. Theor. Phys. 19 (1980) 905—23 (§ 6).

<sup>16</sup> Park, J. L. and H. Margenau: »Simultaneous Measurability in Quantum Theory«, Int. J. Theor. Phys. 1 (1968) 157—172; de Muynck, W. M., P. A. E. M. Janssen and A. Santman: »Simultaneous Measurement and Joint Probability Distribution in Quantum Mechanics«, Found. Phys. 9 (1980) 71—122; Prugovečki, E.: »Fuzzy Sets in the Theory of Measurement of Incompatible Observables«, Found. Phys. 5 (1975) 557—571; Agarwal, G. S. and E. Wolf: »Calculus for Function of Noncommuting Operators

and General Phase-Space Methods of Quantum Mechanics«, Phys. Rev. D 2 (1970) 2161—2225.

<sup>17</sup> Prosser cit. u 6; Mayants cit. u 6 i 7; Mayants, Yourgrau i van der Merwe cit. u 11; Thankappan i Nambi cit. u 14; Rosen, N.: »A Classical Picture of Quantum Mechanics«, Nuovo Cim. 19 B (1974) 90—98; Ghirardi, G. C., C. Omero, A. Rimini and T. Weber: »The Stochastic Interpretation of Q. M.«, Riv. Nuovo Cim. 1, No 3 (1978) 1—34.

<sup>18</sup> Bohm, D. and J. P. Vigier: »Model of the Causal Interpretation of Causal Interpretation of Quantum Theory in Terms of a Fluid with Irregular Fluctuations«, Phys. Rev. 96 (1954) 208—216; Garuccio, A. and J. P. Vigier: »Description of Spin in the Causal Stochastic Interpretation of Proca-Maxwell Waves: Theory of Einstein's 'Ghost Waves'«, Lett. Nuovo Cim. 30 (1981) 57—63; v. također posljednje autore cit. u 6; v. Ghirardi et al. cit. u 17.

<sup>19</sup> Gudder, S. P.: »On Hidden-Variable Theories«, J. Math. Phys. 11 (1970) 431—436; Bub, J.: »What is a Hidden

obuhvatiti sve bitne osobine neke prirodne pojave, i s te strane su vanjski utjecaji manje-više zanemarivi. Međutim, materijalne činjenice se redovito mogu obuhvatiti različitim predodžbama ili, iskrenije, analogijama, koje vode do formalno i interpretativno različitih, iako jednakovaljanih, modela, a isto se tako mogu obuhvatiti različitim predodžbama koje vode do formalno ekvivalentnih ali interpretativno različitih modela. Društvena određenost »put nauke« se tako svodi na izbor, favoriziranje i razvijanje jedne od više jednakomogućih teorija. Pri tome je, naravno, uzeto, kao samo po sebi razumljivo, da model ne smije biti u kontradikciji s eksperimentalnim činjenicama da bi uopće mogao ući u »uži izbor«, odnosno da je svaka od rivalitetskih teorija Popperovski neopovrgnuta, ili Kuhnovski — oslobođena krucijalnih kontraprimjera. I u tome se smislu, dakle, Kuhn zapravo ne bavi strukturom naučnog razvoja kao takvog, već samo strukturom razvoja općeprihvaćenih i stimuliranih teorija i njihove paradigmaticizacije — onoliko ukoliko se može povijesno pratiti kroz *oficijelne* sveučilišne udžbenike. Kuhn kaže: »Ne jednom je dokazano da se na dani skup podataka može postaviti više od jedne teoretske konstrukcije... No, to smišljanje zamjena upravo je ono što znanstvenici rijetko poduzimaju, osim tokom 'predparadigmatičnog' stadija razvoja njihove nauke i u vrlo specijalnim prilikama tokom njene daljnje evolucije.«<sup>24</sup> To, međutim, samo izgleda tako ako pod

»paradigmom« podrazumijevamo »favoriziranu paradigmu«. Prateći povijest prirodoslovnih obrada pojedinih problema, mi ćemo u većini slučajeva moći otkriti više jednako-perspektivnih modela od kojih bi se svi mogli razviti — promatrano izolirano-teoretski — u jednako uspješan i onaj koji je konačno odabran, i svaki od kojih već sadrži skup svojih paradigmi. Promatrano povijesno-društveno, neki su modeli apsolutno nerazradivi u danom trenutku ili čak objektivno besperspektivni, ali je tim potrebnija razrada alternativa za uvid u pravu strukturu naučnog razvoja. Aristotel, npr., referirajući neke svoje, nepoznate, suvremenike i njihova razmatranja gibanja tijela u praznom prostoru kaže da se tijelo jednom stavljeno u gibanje u praznom prostoru ne bi nigdje zaustavilo i da bi tijelo u praznom prostoru »ili mirovalo ili se nastavilo gibati u beskonačnost, osim ako ga u tome nešto ne bi omelo.«<sup>25</sup> A to nije ništa drugo nego prvi Newtonov aksiom. Aristotel ga, međutim, kategorički odbacuje kao nerealnu besmislicu. U njegovo vrijeme takvog praznog prostora naprosto nije bilo i uvijek je nešto »ometalo« tijelo u »eventualnom« gibanju po pravcu. Newton je, s druge strane, bio u sasvim drugoj situaciji. U njegovo je vrijeme jedan od najvažnijih zahtjeva koje je društvo (Engleska kao pomorska velesila) postavljalo na nauku bilo rješavanje osnovnog navigacionog problema za dugu plovidbu: određivanje geografske

Variable Theory of Quantum Phenomena?«, *Int. J. Theor. Phys.* 2 (1969) 101—123; Bub, J.: »Hidden Variables and the Copenhagen Interpretation«, *Brit. J. Phil. Sci.* 19 (1968) 185—210.

<sup>20</sup> Bohm, D. J. and B. Hiley: »On the Intuitive Understanding of Nonlocality as Implied by Quantum Theory«, *Found. Phys.* 5 (1975) 93—109; v. sve članke cit. u 18 i 19; Bub, J.: »On the Possibility of a Phase-Space Reconstruction of Quantum Statistics: A Refutation of the Bell-Wigner Locality Argument«, *Found. Phys.* 3 (1973) 29—44; Bub, J.: »Randomness and Locality in Quantum Mechanics«, u Suppes, P. (ed.): »Logic and Probability in Quantum Mechanics«, Dordrecht, 1976, str.: 397—420; Suppes, P. and M. Zannotti: »On the Determinism of Hidden Variable Theories with Strict Correlation and Conditional Statistical Independence of Observables«, u prethodnoj knjizi str.: 445—455; Lochak, G.: »Has Bell's Inequality a Gene-

ral Meaning for Hidden-Variable Theories?«, *Found. Phys.* 6 (1976) 173—184; Herbert, N. and J. Karush: »Generalization of Bell's Theorem«, *Found. Phys.* 8 (1978) 313—317; Fine, A.: »On the Completeness of Quantum Theory«, *Synthese*, 29 (1974) 257—289; Fine, A.: »How to Count Frequencies: A Primer for Quantum Realists«, *Synthese* 42 (1979).

<sup>21</sup> Pavičić, M.: »A Demarcation in the Ontology of the Naturalistic World-View«, u štampi.

<sup>22</sup> Suppe, F.: »Afterword 1977«, u Suppe, F.: »The Structure of Scientific Theories«, Urbana, 1977, str.: 617—730 (str. 649).

<sup>23</sup> Pavičić, M.: »Wittgenstein, malograđani i nauka«, *Theoria*, XXI, 1—2, Dometi, XII, 6 (1979) 105—118.

<sup>24</sup> Kuhn, T. S.: »The Structure of Scientific Revolution«, Chicago, 1962, § VIII.

<sup>25</sup> Aristotel: »Fizika«, 215a 20.



duljine iz gibanja nebeskih tijela.<sup>26</sup> (On sam se dugo bavio geografijom i navigacijom.)<sup>26</sup> Dakle, riješiti problem »neometanog« gibanja tijela u praznom prostoru (1. aksiom), a zatim uvesti »jednostavno ometanje« (gravitacionu silu). U primjeni na »zemaljske« probleme (čime se »Principia« ne bavi) uvodi se daljnje »konkretno ometanje« (trenje). I time se, u principu, otvara mogućnost spajanja Aristotelovog i Newtonovog pristupa, iako sa sasvim oprečnom filozofskom pozadinom i interpretacijom. Naime, Aristotelovo razmatranje (ili možda, prije, njegovih spomenutih suvremenika) realnog, »zemaljskog«, gibanja moglo je (pod uvjetom da nije bilo »ometano« Rimljanima) dati jednakovrijednu obradu s druge, neidealne, strane (tj. bez Newtonovog zakona gravitacije). Osnovna razlika ta dva pristupa mogla bi se tada sastojati u tome što bi Grci svaku redukciju (u krajnjoj liniji i »Newtonove« aksiome) smatrali pojednostavljenjem (neke opće ili nezanimljive ili nespoznatljive zakonitosti) potrebnim za tehnološku i strojnu primjenu, dok su moderni građani XVIII-og i XIX-og stoljeća, da bi se oslobodili pritiska i utjecaja crkve, podigli spoznaju idealnih »neometanih« zakonitosti na nivo samoodređenja.<sup>27</sup>

Vraćajući se u XX-o stoljeće, bit će nam možda razumljivije da se onog trenutka kad neka teorija postane »paradigmatična« u Kuhnovom smislu, usmjeravanja bavljenja pooštruju i sekundarne paradigme naprosto ostaju bez znanstvenog potencijala koji bi ih jednako razvio do stupnja (promatrano čisto teoretski i formalno) do kojeg stižu »odabrane« i »paradigmatične« teorije. Međutim, u ovom XX-om stoljeću imamo jednu olakšavajuću činjenicu u spoznaji tog procesa, a to je da se određeni broj znan-

stvenika (da li bi tako bilo i s Aristotelovim suvremenima?) ipak nastavlja baviti i sekundarnim paradigmatama. Štoviše ovakav sekundarni, paralelan tok omogućuje daljnji razvoj nauke kad se favorizirana paradigma iscrpi na neposrednim problemima i stigne do novih koje više nije u stanju svladati. Naime, često neka od paralelnih teorija razvija upravo one slabe točke favorizirane teorije koje se iskazuju u sukobu s novim problemima, ali na način koji je u početku, za prvobitnu primjenu, bio ili prekomplikiran ili interperativno neprihvatljiv.<sup>28</sup> Zbog svega toga bismo, za objektivnan uvid u strukturu naučnog razvoja, trebali zapostavljene teorije analizirati jednako intenzivno kao i favorizirane, a zatim nastojati utvrditi mehanizam na osnovi kojeg su favorizirane teorije postale favorizirane. Drugim riječima, mi bismo naše centralno pitanje trebali preformulirati tako da glasi:

Zašto je između svih mogućih i postojećih formulacija i intepretacija poklonjeno gotovo apsolutno povjerenje upravo standardnoj, Københavnskoj interpretaciji i, naravno, zašto se ta interpretacija podržava i nesmanjeno stimulira i pored paralelnog razvoja i usavršavanja novih alternativnih formulacija?

Pitanje je, dakle, uvelo jednu činjenicu: postojanje alternativnih interpretacija. Mi ćemo se u daljnjem, zbog prostorne ograničenosti, zadržati samo na dvije: standardnoj i statističkoj, dok ćemo od ostalih samo nabrojiti najvažnije: stohastičku formulaciju,<sup>29</sup> formulaciju na faznom prostoru s negativnim kvazivjerojatnostima,<sup>30</sup> formulaciju na »razmazanom« faznom prostoru,<sup>31</sup> »klasičnu« interpretaciju,<sup>32</sup> interpretaciju skrivenim varijablama,<sup>33</sup> realističku inter-

<sup>26</sup> Rosenfeld, L.: »Social and Individual Aspects of the Development of Science«, u »Problemi teoretičke fizike«, Moskva, 1972, str. 106—114.

<sup>27</sup> Napomenimo, međutim, da je sam Newton bio duboko religiozan i da mu je životni cilj bio spoznaja plana po kojem je bog uredio svijet (Rosenfeld u 26 str. 111); O »ideološkom« opredjeljivanju društva za čak slabije argumentiranu od teorija (povijesno obrađeno) v. u Feyerabend, P.: »Against Method«, London, 1975.

<sup>28</sup> Sjetimo se Newton-Huygensovog svjetlosnog dualizma, raznih atomističkih nagađanja, možda i spomenutih Aristotelovih suvremenika, antropoloških vrludanja oko

missing-linka iz Swartkransa, preuranjene Leibnizove logike i Peresove semantike, modela nuklearne fizike itd., itd. O općenitom stavu, najbližem ovdje iznesenom, v. u: Feyerabend, P.: »Consolations for the Specialist«, u: Lakatos, I. and A. Musgrave (eds.): »Criticism and the Growth of Knowledge«, Cambridge, 1970; također v. Feyerabend, P.: »Against Method. Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge«, London, 1975.

<sup>29</sup> V. pregled u Ghirardi et al. u 17 i u Lee 6; Vigier et al 6, 18; Yause, K.: »Stochastic Quantization: A Review«, Int. J. Th. Phys. 18 (1979) 861—91.

pretaciju,<sup>34</sup> razne logičke,<sup>35</sup> algebarske i kvaternionske formulacije, itd., itd.

*Priprema  
za Einstein-Podolsky-Rosenov paradoks*

Nabrojili smo mnoštvo interpretacija kvantnog objekta i spomenuli razmimoilaženja u vezi s njima. I takvo bi mnoštvo svakako bilo pretjerano za jedan i isti mjerno obradivi, poznati objekt. Međutim, nama objekt zapravo nije poznat. Ili da budemo precizniji, nama je kvatni objekt daleko manje poznat od klasičnog. Naime, strogo govoreći, teorije se općenito nalaze u cirkularnoj situaciji da moraju dati model objekta koji se može definirati tek na osnovi uspjeha modela, tj. tek na osnovi podudaranja s mjernim podacima. A budući da sve spomenute alternative zadovoljavaju taj uvjet, definicija objekta postaje vrlo osjetljiv problem. Pogledajmo stoga što znače mjerni podaci i mjerenje nekog pojedinog, tzv. »individualnog«, objekta u kvantnoj mehanici.

Prema shemi na sl. 1 (*vidi prilog*) postavljen je slijedeći eksperiment. Iz izvora se emitira jedan po jedan foton (najmanja moguća količina — »kvant«-svjetlo) i to tako da je vrijeme između dvije neposredno slijedeće emisije veće od vremena koje je potrebno fotonu da, od izvora, »stigne« do detektora (na način koji će biti objašnjen u daljnjem tekstu). Fotoni prvo nailaze na polupropusno zrcalo kroz koje prolaze u 50% slučajeva, a od kojeg se odbijaju u preostalim 50% slučajeva.<sup>36</sup> Fotoni zaim nailaze na potpuna zrcala II i III, od kojih se u potpunosti odbijaju (tj. 100%-tno reflektiraju). Na ta zrcala su priključeni vanredno osjetljivi instrumenti koji registriraju refleksiju

(udar) svakog pojedinog fotona. Instrumenti rade na principu mjerenja odboja zrcalâ, tj. registracije njihovog pomaka unatrag (pri čemu zrcala ostaju okomita s obzirom na staze II, odnosno III, v. sl. 1) u trenutku udara fotonâ.

Kao rezultat mjerenja ćemo dobiti slijedeće podatke:

1. instrumenti su registrirali da se 50% fotona odbilo od potpunog zrcala II, a 50% od potpunog zrcala III;

2. instrumenti su registrirali da se nikad foton nije istovremeno odbio i od zrcala II i od zrcala III;

3. detektor (na kraju staze IV, (v. sl. 1) je registrirao 50% fotona iz svake od dvije navedene (pod 1) podskupine fotona, dakle 50% svih emitiranih fotona.

Drugim riječima, u dobivenom rezultatu nema još ničeg »čudnog« ili »ne-klasičnog«. Foton, naime, polazi stazom I i dolazi do polupropusnog zrcala; tada ili prolazi kroz njega (u 50% slučajeva) i nastavlja se gibati stazom III, ili se reflektira od njega (u preostalim 50% slučajeva) i nastavlja se gibati stazom II — nikad oboje istovremeno (što znamo po tome da kad instrument zabilježi udar u zrcalo III onda instrument zrcala II ne bilježi ništa i obratno); dalje, foton nakon refleksije od potpunih zrcala II i III ponovo dolazi do polupropusnog zrcala: ako je došao stazom II onda se u 50% slučajeva reflektira od njega, polazi stazom I i biva izgubljen za detekciju detektorom na kraju staze IV, a u 50% slučajeva prolazi kroz polupropusno zrcalo, polazi stazom IV i biva detektiran detektorom na

<sup>30</sup> V. Agrawal and Wolf u 16.

<sup>31</sup> Twareque Ali, S. and E. Prugovečki: »System of Imprimitivity and Representations of Quantum Mechanics on Fuzzy Phase Space«, J. Math. Phys. 18 (1977) 219—228; v također Prugovečki u 16.

<sup>32</sup> Duane i Landée u 14, Landée u 7, Rosen u 17.

<sup>33</sup> V. članke u 19, Gudder u 6; Cerofolini, G. F.: »Quantum and Subquantum Mechanics«, Nuovo Cim. 58 B (1980) 286—299; Bohm, D. and J. Bub: »A Proposed Solution of the Measurement Problem in Quantum Mechanics

by Hidden Variable Theory«, Rev. Mod. Phys. 38 (1966) 453—469.

<sup>34</sup> V. Fine u 20; Popper u 8; Gardner u 6.

<sup>35</sup> V. Lahti u 13 i 15.

<sup>36</sup> »Polupropusno zrcalo« je obično optičko zrcalo koje podjednako propušta i odbija (reflektira) svjetlost. Svakodnevni primjer za njega (iako ne u omjeru 50:50 posto) je prozorsko staklo u tramvaju ili vlaku — noću; kao putnici, u njemu vidimo ostale putnike i unutrašnjost, dok ih promatrači sa stanice ili perona također vide kroz isto staklo.

njenom kraju; ako je pak došao stazom III onda se u 50% slučajeva reflektira od polupropusnog zrcala, polazi stazom IV i biva detektiran detektorom, a u 50% preostalih slučajeva prolazi kroz polupropusno zrcalo i biva izgubljen za detekciju. Pri svemu tome je dobiveni rezultat potpuno neovisan o međusobnom omjeru dužina staza II i III, tj. on ostaje neizmijenjen bez obzira na to da li je dužina staze II jednaka dužini staze III ili se one međusobno neznatno ili znatno razlikuju.

Zašto smo, međutim, toliko inzistirali na svim mogućim detaljima, zapitat će se klasični ili svakodnevni promatrač, kad se sve odvija prema klasičnom i svakodnevnom očekivanju i iskustvu?

Zato što ne radimo s klasičnim i svakodnevnim, već kvantnim objektom, koji će, pod niže navedenim, izmijenjenim, uvjetima, odjednom i sasvim neočekivano prestati zadovoljavati spomenuto klasično i svakodnevno iskustvo (i koji se upravo pod tim uvjetom iskazuje u svjetlu koje ponajviše određuje današnju prirodoslovnu sliku svijeta; sjetimo se samo »indeterminizma« i »akauzalnosti« koje odavde proizlaze).

Konkretno, uvjete pod kojima je naše klasično i svakodnevno iskustvo iznevjereno dobivamo, u gornjoj eksperimentalnoj postavi (sl. 1), jednim, često mistificiranim, pojednosavljenjem; naime, *učvršćenjem* potpunih zrcala II i III i to u takvim položajima da dužina staze II bude jednaka dužini staze III. Spomenuta mistifikacija sastoji se onda u tome da se kaže kako mi »odustajemo od mjerenja putanje kojom se kvantni objekt gibao« (stazom II ili stazom III ili možda objema). To je naravno točno, ali i dvosmisleno budući da mi ne dobivamo ništa novo ako samo isključimo instrumente, a *ne učvrstimo* zrcala II i III. Bitno je, dakle, da se ona ne mogu pomaknuti, s obzirom na polupropusno zrcalo, u trenutku udara fotona u njih.<sup>37</sup>

Sam rezultat, kojeg ovakvom postavom dobivamo, je za klasično poimanje krajnje neobičan:

— Detektor (na kraju staze IV) registri-  
ra *svaki* foton emitiran iz izvora, tj. 100%  
emitiranih fotona.

Ako, međutim, udaljimo (ili približimo)  
zrcalo II (ne mijenjajući položaj zrcala III),

uzduž staze II, za iznos jednak polovici  
valne dužine fotona (tj. polovici valne du-  
žine svjetlosti koje je promatrani foton naj-  
manja količina), onda:

— detektor neće registrirati *nit* jedan  
od fotona emitiranih iz izvora, tj. registri-  
rat će 0% emitiranih fotona.

Ukoliko zatim mijenjamo razliku dužina  
staza II i III unutar spomenutih vrijedno-  
sti, onda će:

— detektor registrirati broj fotona (ne  
prema zakonima klasične mehanike čestica  
već) prema zakonima *valnog* gibanja (pri-  
čemu će iznos vjerojatnosti registracije fo-  
tona za pojedine položaje zrcalâ biti odre-  
đen pomoću tzv. »valne funkcije«).

U svjetlu ovog posljednjeg, zaključujemo  
da se radi o interferenciji, s ekstremnim  
pojačavajućim (100%-tna registracija) i po-  
ništavajućim (0%-tna registracija) slučaje-  
vima.

Kako??! Interferencija s jednim jedinim  
fotonom?

Da! Slikovito bismo mogli reći da foton  
interferira sam sa sobom.

Ali to nam ništa ne kaže! Zar se ne mo-  
že odgovoriti na pitanje na koji točno na-  
čin foton »interferira sam sa sobom«?

Tretiranje prirodnih pojava i njihove in-  
terpretacije imaju dva pola: mjerenje (opa-  
žanje) i teorijski model. U našem slučaju  
postoje problemi i s jednim i s drugim.  
S jedne strane, ako opažamo kojom je sta-  
zom putovao kvantni objekt, onda nema in-  
terferencije, a ako opažamo interferenciju  
(detektorom), onda nam ostaje potpuno ne-  
poznat način na koji je foton »stigao« do  
detektora.<sup>38</sup> Štoviše ta je dihotomija potpu-  
no principijelne prirode, ako se ograničimo  
samo na direktno opažanje spomenutih ve-  
ličina (staza — interferencija); odnosno, mi  
nikakvim napretkom tehnologije ne možemo  
doći do direktnog mjernog odgovora na  
postavljeno pitanje.<sup>39</sup> S druge strane, kao  
što smo već spomenuli, postoji niz teorija  
po kojima se s kvantnim objektom događa  
ovo ili ono, po kojima on ima ili nema pu-  
tanju (i to, ako je ima, određenu ili neod-  
ređenu), po kojima je njegovo ponašanje  
kauzalno ili akauzalno, determinističko ili  
indeterminističko, ali koje se sve slažu s



dobivenim mjernim podacima i koje su, dakle, barem za sada mjerno međusobno neodlučive, a interpretativno takve da daju potpuno dispartatne slike pretpostavljenog »stvarnog« događanja.<sup>40</sup> Dakle, »točan« način na koji foton »interferira sam sa sobom« ovisi o prihvaćenoj teoriji, a prihvaćanje teorije (ukoliko je za više njih ostvareno slaganje s mjernim podacima) ovisi o društveno-ekonomsko-tehnološkim uvjetima njenog razvoja i primjene. Standardna formulacija i pripadna interpretacija, oformljena tridesetih godina, je u danom povijesnom trenutku najprirodnije proizašla iz tadašnjeg naučnog bavljenja i zaista u potpunosti kvantitativno obradila tako reći sva poznata kvantna svojstva (nerelativističkog područja i ostavljajući po strani problem elementarnih čestica kao i nuklearnih sila) materije (klasičnim zakonitostima neobrađivih), ostavljajući pri tom najmanje mogućih dilema u koje bi znanstvenici mogli »zastraniti« u potrazi za »istinom«. Drugim riječima, standardna formulacija predstavlja »optimalnu« teoriju u kojoj formalizam »upravo« daje numeričke rezultate, dok interpretacija sve pojmove i definicije varijabli — pa tako i one naslijeđene iz klasične teorije, kao što su npr. položaj i moment (količina gibanja) — direktno i »ad hoc« prilagođava numeričkim rezultatima i mjernoj situaciji.<sup>41</sup> Pri tome »ad hoc« ne znači da se biraju proizvoljne odredbe pojmova i proizvodnje vrijednosti varijabli, već da se pojmovi i varijable koji mogu imati — i zapravo, za našu predodžbu (ili čak predrasudu) o »stvarnom« događanju i naše operativno iskustvo, ne mogu ne imati — značenje sami po sebi, definiraju isklju-

<sup>37</sup> Podsjetimo se da smo u prethodnoj postavi udar fotona o zrcalo registrirali registriranjem pomaka čitavog zrcala i da se takva registracija pomaka mogla provesti i nakon što je foton već stigao do detektora na kraju staze IV. Ako zrcalo učvrstimo mi više ne možemo registrirati udar fotona o zrcalo.

<sup>38</sup> To ne ovisi isključivo o »pomičnosti« zrcala, već predstavlja univerzalnu dilemu. Naime, mi i kod učvršćenih zrcala možemo detektirati foton na »povratku« (»superbrzim« ubacivanjem detektora na staze II i III, nakon odboja fotona od potpunog zrcala, a prije ponovnog dolaska do polupropusnog zrcala) i uvijek ćemo ga naći na samoj jednoj stazi — ali tada opet nemamo interferencije.

čivo na temelju formalnog opisa rezultata mjerenja i opisa mjerne situacije. Naime, formalni aparat (teorija) uključuje paralelni tretman većeg broja varijabli od onog koji se u nekom trenutku stvarno može mjeriti, čime one varijable koje u trenutku nisu mjerene ostaju u principu — unutar formalnog aparata — nedefinirane. Ali mi im — unutar formalnog aparata — ne možemo pridijeliti nikakve (a ponajmanje proizvoljne) vrijednosti, jer je, što je najvažnije, standardni formalni aparat takav da one moraju ostati nedefinirane; odnosno, čitav bi se taj formalni aparat srušio (tj. bio bi nekonzistentan, sam u sebi kontradiktoran) kad bi ih se definiralo. Formalni aparat kao takav ne možemo odbaciti jer on »bez problema« reproducira sve moguće empirijske rezultate (sjetimo se samo da taj formalizam potpuno »glatko« reproducira čitav periodni sistem elemenata). Međutim, mi možemo govoriti o smislu svih pojmova i varijabli, izvan standardnog formalizma, tj. potpuno izvan *formalizma* koji se brine samo za reprodukciju mjerenih vrijednosti na statističan način<sup>42</sup> (a da ga pri tome ne okrnjimo) ili unutar nekog drugog formalizma.<sup>43</sup> I na to se svodi postojanje svih spomenutih teoretskih varijeteta.

Razmotrimo ukratko argumente obiju strana.

Standardna interpretacija o gornjem interferencionom eksperimentu, prema riječima njenog »oca« Niesl Bohra, zaključuje ovako: »U bilo kakvom pokušaju slikovite predodžbe ponašanja fotona mi bismo se susreli s poteškoćom: da budemo primorani reći, s jedne strane, da foton uvijek odbire jedan od dva puta, a, s druge strane,

<sup>39</sup> Indirektan odgovor koji proizlazi iz pretpostavljene teorije je, naravno, moguć i on vodi na niže navedene varijete interpretacija; v. lit. u 6.

<sup>40</sup> V. lit. u 6, 7, 17, 18, 29, 31, 32 i 33.

<sup>41</sup> U našem slučaju »prilagođavanje« teče prema slijedećem receptu: u interferencionom eksperimentu ne možemo opažati stazu (putanju) kvantnog objekta — dakle, kvantni objekt nema putanje.

<sup>42</sup> Misli se isključivo na standardni *formalizam*, a ne i na pripadnu interpretaciju.

<sup>43</sup> V. literaturu cit. u 40.

da se ponaša kao da je prešao oba puta... To otkriva nejednoznačnost pridjeljivanja uobičajenih fizikalnih atributa atomskim objektima.<sup>44</sup> »U svakoj eksperimentalnoj postavi pogodnoj za proučavanje kvantnih pojava mi imamo posla ne naprosto s nepoznavanjem određenih fizikalnih veličina, već s nemogućnošću definiranja tih veličina na nedvosmislen način.«<sup>45</sup> Isto se odnosi i na statističke zakonitosti. Ako u gornjoj eksperimentalnoj postavi (v. sl. 1) učvrstimo potpuno zrcalo II tako da dužina staze II bude za jedan dio valne dužine fotona veća od dužine staze III onda detektor može registrirati foton u npr. 90% slučajeva i to se može predvidjeti. Međutim, kad foton krene stazom I, mi ni na koji način ne možemo eksperimentalno odrediti da li će on biti detektiran ili ne (tj. da li će se nalaziti među spomenutih 90% ili preostalih 10%). To — u formalnom aparatu — nalazi odraza u čuvenom von Neumannovom teoremu<sup>46</sup> po kojem se standardni formalni aparat (koji je statističke prirode) ne može interpretirati kao klasična statistička teorija u kojoj bi se »statističnost« mogla u principu eliminirati uvođenjem novih, dodatnih (i eksperimentalno odredivih), varijabli u sam formalni aparat.<sup>47</sup> Standardna interpretacija sad nadopunjuje teorem tvrdnjom da je statističnost standardnog formalnog aparata — koji u biti predstavlja formalizaciju

mjernog postupka (kod individualnih sistema tzv. DA-NE mjerenjima)<sup>48</sup> — zapravo inherentna i ireducibilna statističnost kvantnog objekta samog po sebi, što se s gornjom tvrdnjom o nemogućnosti definiranja nemjerenih veličina, stapa u tvrdnju o potpunosti opisa svakog pojedinog (individualnog) kvantnog sistema (objekta) standardnim formalnim aparatom nadopunjenim standardnom interpretacijom. Čistoća recepta je evidentna: (kvantni) fizikalni svijet (v. početak članka) je definiran formalizacijom mjernog postupka (kvantnom teorijom),<sup>49</sup> svaki element fizikalnog svijeta je, dakle, dio teorije, i prema tome, teorija sadrži odgovarajući dio za svaki element fizikalnog svijeta, odnosno, teorija je »potpuna«. Ovakav pragmatički »dokaz« standardna interpretacija nadopunjuje slijedećim »meta-pravilima«: »Isključivi cilj (kvantno-mehaničkog formalizma) je razumijevanje opservacija dobivenih pod eksperimentalnim uvjetima opisanim jednostavnim fizikalnim pojmovima«<sup>50</sup> »Zadaća je nauke da i proširi naše iskustvo i svede ga na red.«<sup>51</sup> »Svrha našeg opisa prirode nije stvarna suština pojava, već samo iznalazjenje odnosa među raznim aspektima našeg iskustva.«<sup>52</sup> »Fizikalne ideje bi trebalo ocjenjivati na temelju njihovog uspjeha u srediavanju fizikalnog iskustva, a ne po točnosti

<sup>44</sup> Bohr, N.: »Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics«, u Schlip, P. A (ed.): »Albert Einstein: Philosopher-Scientist«, Evanston, Ill, 1949, stre.: 201—241, str. 222.

<sup>45</sup> Bohr, N.: »Can Quantum-Mathematical Description of Physical Reality Considered Complete?«, Phys. Rev. 48 (1935) 696—702.

<sup>46</sup> Von Neumann, J.: »Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik«, Berlin, 1932, 4. Kap., 1. und 2. Abt.

<sup>47</sup> Originalno teorem nije bio postavljen u navedenom obliku. Naime, von Neumann ga je formulirao puno šire ali on u tom obliku ne stoji. V. Zinnes, I. I.: »Hidden Variables in Quantum Mechanics«, Am. J. Phys. 26 (1958) 1—4; Schulz, G.: »Kritik des von Neumannischen Beweises gegen Kausalität in der Quantenmechanik«, Ann. der Physik 3 (1959) 94—104; Jammer, M.: »The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective«, New York, 1974, str. 293; Bub, J.: »The Interpretation of Quantum Mechanics«, Dordrecht, 1974, Ch. III; v. i Jauch and Piron u 49.

<sup>48</sup> Pavičić, M.: »Kritički osvrt na potpunost kvantne mehanike«, PMF (mr), Zagreb, 1981.

<sup>49</sup> Jauch, J. M. and C. Piron: »Hidden Variables Revisited«, Rev. Mod. Phys. 40 (1968) 228—229; v. Bugajski and Lahti u 13.

<sup>50</sup> Bohr, N.: »Atomic Physics and Human Knowledge«, New York, 1958.

<sup>51</sup> Bohr, N.: »Atomic Theory and the Description of Nature«, Cambridge, 1934, str. 1.

<sup>52</sup> Bohr u 50, str. 18.

<sup>53</sup> Stapp, H. P.: »The Copenhagen Interpretation«, Am. J. Phys., 40 (1972) 1098—1116, str. 1107.

<sup>54</sup> »Moć« standardne interpretacije proizlazi iz društvene potrebe za unifikacijom nauke (Pavičić u 21 i 23) i to se može dokazivati na mnogo objektivnih načina. Slikovito međutim, tu moć otkriva već društveni položaj (u ono vrijeme) njenog »oca«, Niels Bohra, u usporedbi s položajem »oca« statističke interpretacije, Alberta Einsteina. Od 1941. god. nadalje je Einstein bio izoliran od rada (i znanstvenikâ) na atomskoj bombi (koji je započeo još puno prije Einsteinovog čuvenog pisma američkom predsjedniku F. D. Rooseveltu 1939. god.) (Holton, G.: »The Scientific Imagination: Case Studies«, Cambridge, 1978, stre.: 276—277). N. Bohr, naprotiv, ne samo da je dao (zajedno s J. A. Wheelerom) konačnu teoretsko-interpretativnu

s kojom bi mogle odražavati suštinu vanjske realnosti.<sup>53</sup>

Statistička interpretacija, za razliku od standardne, ne posjeduje onu društvenu moć,<sup>54</sup> pa prema tome ni auditorij,<sup>55</sup> koji bi bili dovoljni za edukativno ili stručno pridjeljivanje vlastite semantike formalnom aparatu; Ona nema čak niti toliku moć da uspostavi semantiku koja bi bila poznata i priznata, ako već ne oficijelno prihvaćena, kao alternativa standardnoj, premda standardna interpretacija, u odnosu na nju, nema niti jednu jedinu eksperimentalno ili teoretski dokazivu prevagu.<sup>56</sup> Zbog toga je statistička interpretacija prisiljena polaziti od kritike standardne interpretacije i stalno pledirati na demokraciju,<sup>57</sup> progres i preduvjete za daljnji razvoj nauke.<sup>58</sup>

O interferencijom eksperimentu sa sl. 1, a na isti način i o kvantno-mehaničkim zakonitostima općenito, statistička interpretacija zaključuje (ujedno kritizirajući standardnu) na slijedeći način. Kvantno-mehanički formalizam nedvojbeno eksperimentalno točno daje vjerojatnost s kojom ćemo u određenoj eksperimentalnoj postavi polučiti određeni rezultat, tj. postotak detekcije fotona detektorom na kraju staze IV. Međutim, »što se događa s individualnim sistemom<sup>59</sup> ostaje takvim načinom razmatranja potpuno nerazjašnjeno; to zago-

formulaciju problema konstrukcije atomske bombe, već od 1943. do 1945. god. radi kao savjetnik za fizikalne probleme pri njejoj izradi. A kad je Einstein napokon odlučio apelirati na naučičku savjest konstruktorâ Bohr je »pojurio« k njemu u Princeton i preklinjao ga na šutnju da ne bi »komplicirao dužnost državnika« (ibid.). Ovdje se Hirošimski-žalosno naslućuje kako je standardnoj interpretaciji, koja ni na koji način nije mogla eksperimentalno ni teoretski dokazati opravdanost vlastitih interpretativnih dodataka na statističku interpretaciju, uspjelo zaustaviti znatiželjna vrludanja istraživačkih duhova, zavesti u njima red i usmjeriti ih na rad; I kako je Einstein postao počasni usamljenik (Einstein, A.: »Reply to Criticism« (1949) u Schilp u 44, str. 666) u svojim »nerealnim« težnjama: »Vjerovati [da nikad nećemo dobiti neki uvid u strukturu i kauzalnu povezanost individualnih kvantnih sistema] je logički moguće bez kontradikcije; ali to je toliko suprotno mom znanstvenom instinktu da ja ne mogu odustati od traženja potpunije koncepcije.« (Einstein, A.: »Physik und Realität«, J. Franklin Inst., 221 (1936) 313—347). Evidentno je teško zamisliti financijsku osnovu po kojoj bi i ostali zainteresirani znanstvenici bili mogli sebi dozvoliti da ne odustanu od daljnjeg traženja.

netno događanje je potpuno eliminirano iz reprezentacije statističkim načinom razmatranja.<sup>60</sup> Naime, ako se čovjek uspije osloboditi uvjetovanog pedagoškog pritiska, onda mu ad hoc postulirana »istina« (u standardnoj interpretaciji) da kvantno-mehaničke »statističke« zakonitosti predstavljaju potpun i iscrpljujući opis individualnih sistema,<sup>61</sup> ne može izgledati naročito uvjerljiva, a niti fizikalno plauzibilna, ili uopće potrebna.<sup>62</sup> Još manje može izgledati potrebno da se individualnim sistemima pošto-poto odrekne smisao svojstava i varijabli (npr. putanje u prethodnom interferencijom eksperimentu) koje u danom trenutku mjerenja neke druge varijable uopće i ne ulaze u formalni opis sistema i nisu mjerljive.<sup>63</sup> Za ilustraciju rečenog promotrimo urnu u kojoj se nalazi određeni broj crvenih i crnih kuglica i iz koje nasumično vadimo kuglice bilježeći broj crvenih naspram crnih kuglica. U ovom slučaju »bi se mogla postaviti analogna tvrdnja da kuglice iz urne nemaju niti dimenziju niti boju; ta se svojstva pojavljuju samo kao rezultat testa. Evidentno je da je u ovakvom obliku tvrdnja naprosto besmislena. Da bismo je korigirali, moramo njen prvi dio povezati s apstraktnim objektom »kuglica u urni«, a njen drugi dio (dimenzija, boja) s konkretnim kuglicama u toj urni... Činjenica da se svaka konkretna čestica giba po putanji ni na koji način ne protivrječi statističkim

<sup>53</sup> Podsjetimo se opet da je standardna interpretacija, barem deklarativno, prihvaćena u praktički svim udžbenicima (v. 7).

<sup>54</sup> Eksperimentalna provjera tzv. Bellovih nejednakosti ne predstavlja rezultat koji bi odlučivao u korist standardne interpretacije budući da se potrebne korelacije ni na koji način ne mogu polučiti unutar jednog mjerenja, već samo sukcesijom mjerenja i time se oslanjaju na kontrafaktualna zaključivanja koja u standardnoj interpretaciji nisu legitimna (v. Lochak /1976/ i Fine /1979/ u 20 i Pavičić u 48).

<sup>57</sup> Fine (1979) u 20.

<sup>58</sup> Einstein (1949) u 54; Prosser u 6.

<sup>59</sup> U našem slučaju: fotonom.

<sup>60</sup> Einstein (1936) u 54.

<sup>61</sup> Ballentine u 6; Ballentine, L. E.: »Comments on Stapp's 'Copenhagen Interpretation' and the Significance of Bell's Theorem«, Am J. Phys. 42 (1974) 81—83.

<sup>62</sup> Ballentine, Gardner i Mayants u 6.

<sup>63</sup> Bilo bi zanimljivo provesti psihoanalitička ispitivanja fizičara i utvrditi koliko »Freudovski profit« oni vuku iz činjenice što se bave nečim tako neobičnim i posebnim.

svojtstvima odgovarajućeg apstraktnog objekta.«<sup>64</sup> Ovdje se pod »apstraktnim objektom« misli na onaj aspekt danog objekta koji se u određenom trenutku promatra i tretira formalnim aparatom. U primjeru kuglica iz urne taj se aspekt svodi na mjereni (testirani) omjer crvenih naspram crnih kuglica pri čemu će, međutim, biti potpuno svejedno to što su kuglice upravo crvene i crne; pri čemu će, dakle, biti važno samo to da ih se može međusobno razlikovati. Samu »crvenost« ili »crnost« statistika ne uzima u obzir. Jednako tako »apstraktni (kvantni) objekt« predstavlja mjereno-statistički (valni) aspekt »konkretnog« objekta (tj. objekta samog po sebi) — dakle, formalni opis objekta ali isključivo s obzirom na varijablu koju u danom trenutku mjerimo.<sup>65</sup>

Ovdje statistička interpretacija dolazi do interpretativnog ruba standardne interpretacije i na njemu zastaje smatrajući da je formalnim opisom dan algoritam za računanje vrijednosti varijabli u pojedinim eksperimentalnim postavama, ali da time još nije ni određena ni spoznata priroda objekta samog po sebi. Standardna interpretacija naprotiv tvrdi da je takvim formalnim opisom objekt potpuno i iscrpljujuće određen. Ona to čini vezujući objekt — formalno opisan s obzirom na mjerenje jedne od varijabli — s eksperimentalnom postavom, odnosno mjernim uređajem, u kojima se vrijednosti dane varijable polučuju, a odričući realnost svim ostalim varijablama i svojstvima promatranog objekta u tom trenutku. Naravno, ako se pod realnošću podrazumijeva trenutačno upotrijebljena formalno-računska shema za dobivanje vrijednosti mjerene varijable, onda je ta tvrdnja nepobitno točna i svodi se na slijedeće: Za određivanje vrijednosti svake pojedine varijable objekta, u odgovarajućim eksperimentalnim postavama, posjedujemo zasebne računске algoritme — »realan« je, međutim, uvijek samo jedan algoritam, tj. onaj koji pripada trenutačno mjerenoj varijabli.<sup>66</sup> No, ako se pod (ne)realnošću podrazumijeva objektivno (ne)postojanje čak i mjerljivih svojstava, onda se tvrdnja teško može prihvatiti drugačije nego kao, gore argumentirani, izraz društvene potrebe (ekonomsko-hijerarhijski inducirane u samim

znanstvenicima) za unifikacijom nauke. Sâm Einstein nije zalazio tako daleko u van-fizikalne razloge. On je naprosto formalni aparat, s obzirom na izloženu situaciju, ocijenio *fizikalno* nepotpunim jer je smatrao da je, pod određenim uvjetima, fizikalno neodrživo odreći realnost (objektivnu, *fizikalnu* realnost, a ne s obzirom na formalni aparat) nekim u datom trenutku ne mjerenim varijablama. Zbog takve akcentuacije »fizikalnog« mi ćemo prije prelaska na njegovu formulaciju problema zaokružiti fizikalna i vanfizikalna opravdanja suprotstavljenih interpretacija odgovorom na slijedeće razgraničavajuće pitanje:

U čemu se sastoji razlika između statističke i standardne interpretacije — fizikalno — kad one nisu međusobno razlučive i da li se može smatrati da razlike u neku ruku i nema, tj. da je standardna interpretacija neka vrsta pedagoške sistematizacije golog mjerno-računskog postupka?

Razlika se sastoji u tome da statistička interpretacija može prihvatiti primjenu algoritama<sup>67</sup> koji eksplicitno ili implicitno uzimaju u obzir i pretpostavljaju ono čemu standardna interpretacija odriče realnost.<sup>68</sup> Pretpostavljena svojstva se doduše ne mogu direktno eksperimentalno provjeriti mjerenjem danas zamislivih varijabli, ali ostavljaju mogućnost daljnjeg teoretskog razvoja formalnog aparata, i odavde općenito uvida u Prirodu, u smjerovima koje standardna interpretacija naprosto blokira. Time statistička interpretacija ističe, za

<sup>64</sup> Mayants (1974) u 6.

<sup>65</sup> Mayants u 64 i 7; Ballentine u 61; Popper (1967) u 8.

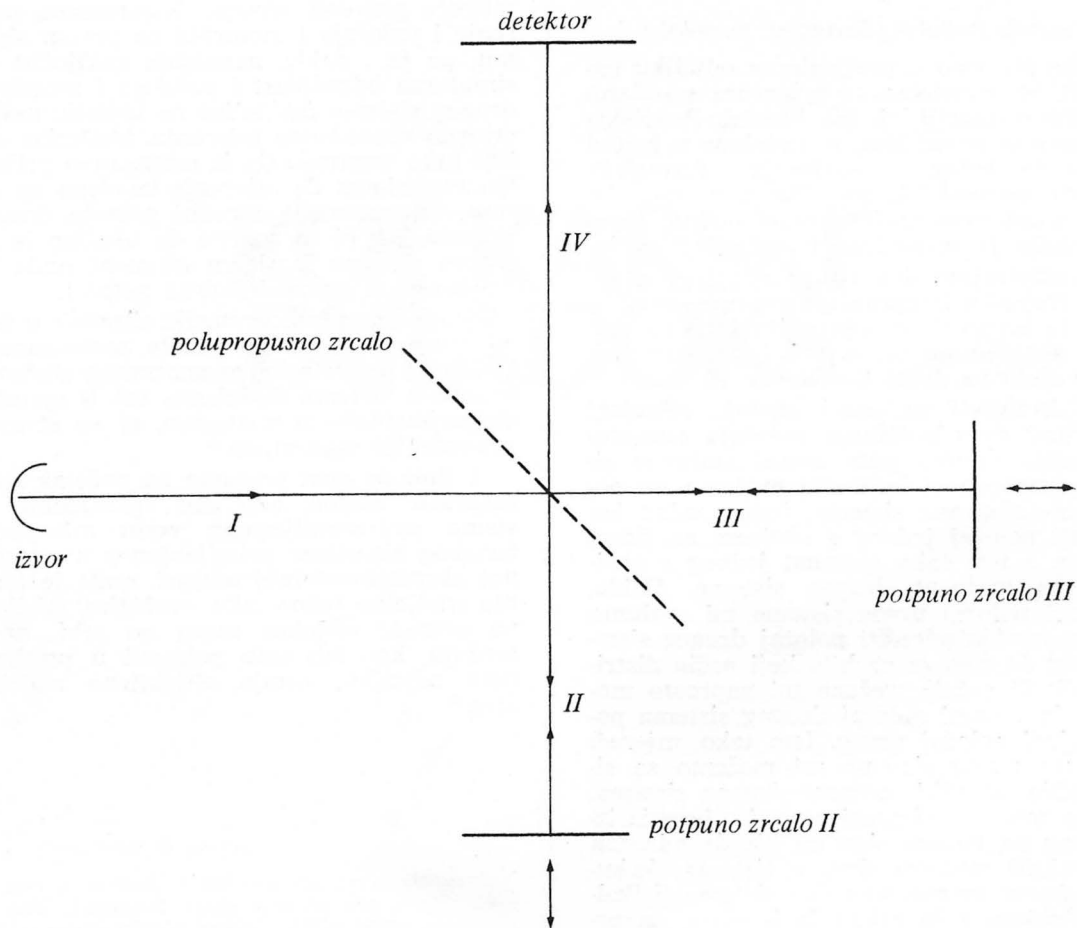
<sup>66</sup> Štoviše istovremena primjena dvaju algoritama bi dala kontradiktorne rezultate i srušila čitav formalni aparat, ali za tako nečim se nikad ne može pojaviti potreba budući da mi ni teoretski ni eksperimentalno ne možemo nemjerenim varijablama pridijeliti konkretne vrijednosti.

<sup>67</sup> Prosser u 6; Mayants u 6 i 7; Park and Margenau u 16; Thankappan, V. K. and P. G. Nambi: »A Modified Set of Feynmann Postulates in Quantum Mechanics«, Found. Phys. 10 (1980) 217—236.

<sup>68</sup> Npr. staza u interferencionom eksperimentu (Prosser u 6) ili postojeće vrijednosti inkomezurabilnih (komplementarnih) varijabli ispod Heisenbergove donje granice ali izvan formalnog aparata, tj. bez pandana u operatorima (Park and Margenau u 16).



Prilog



Slika 1

razliku od standardne koja je akrobatski skriva, činjenicu da mi ni na koji način ne možemo smatrati dokazanim da smo spoznali pravu i nenadopunjivu prirodu objekta kojim se bavimo, pa, dakle, ni Prirodu samu po sebi.

### *Einstein-Podolsky-Rosenov paradoks*

Kao što smo u prethodnom odjeljku naglasili, bit Einsteinovog prigovora standardnoj interpretaciji, tj. bit Einstein-Podolsky-Rosenovog paradoksa, je sadržana u kritici pretpostavljenog povezivanja formalnih kvantno-mehaničkih algoritama s objektivnom kvantno-mehaničkom realnošću. Argumentacija je provedena na slijedeći način.

Promatramo dva sistema koji su u nekom trenutku integrirali, a zatim se razdvojili i to toliko da mjerenje izvršeno na jednom sistemu ne može imati nikakav fizikalni efekt na drugi sistem.<sup>69</sup>

U kvantnoj mehanici postoje odvojeni algoritmi za određivanje položaja odnosno momenta (brzina puta masa) složenog sistema, na osnovi kojih mi možemo, za povoljno definirane sisteme, jednoznačno korelirati položaj jednog s obzirom na drugi sistem, a isto tako moment jednog s obzirom na moment drugog sistema. Dakle, mjereći položaj prvog sistema mi možemo sa sigurnošću odrediti položaj drugog sistema bez da smo ga na bilo koji način distribuirali, ili točnije rečeno mi naprosto možemo izračunati položaj drugog sistema poznavajući položaj prvog. Isto tako, mjereći moment prvog sistema mi možemo sa sigurnošću odrediti moment drugog sistema. Prema tome u ovisnosti o vrsti mjerenja izvršenog na prvom sistemu bit će određen položaj ili moment drugog sistema. A budući da su promatrana dva sistema fizikalno odvojena i da mjerenje izvršeno na prvom sistemu ne može utjecati na stanje drugog sistema, Einstein, Podolsky i Rosen zaključuju da su u principu odredivi i položaj i moment drugog sistema. Međutim, budući da formalni sistem ne dopušta istovremenu primjenu obaju algoritama (i za položaj i za moment) onda bismo morali zaključiti da opis objektivne realnosti takvim formalizmom nije *fizikalno*<sup>70</sup> potpun, tj. da svaki element fizikalne realnosti *ne*ma odgovarajući dio u formalnom aparatu.

Naravno, Einstein, Podolsky i Rosen su svjesni činjenice da jednom izvršeno mjerenje npr. položaja na prvom sistemu »uništava« mogućnost da na tom istom (istom — u smislu nedisturbiranosti) sistemu izvršimo i mjerenje momenta, odnosno da je nemoguće provesti *stvarno* istovremeno mjerenje i položaja i momenta na prvom sistemu, pa je, dakle, nemoguće zaključiti na simultanu odredivost i položaja i momenta drugog sistema *isključivo* na temelju nekog stvarno provedenog mjerenja. Međutim, oni isto tako smatraju da je nerazumno prihvatiti mogućnost da mjerenje izvršeno na prvom sistemu može odrediti prirodu drugog sistema, jer bi to značilo da ukoliko je na prvom sistemu izmjeren moment onda da drugi sistem nema definiran položaj.

Standardna interpretacija naprotiv u takvoj mogućnosti ne vidi ništa nerazumnoga i po njoj je priroda promatranog složenog kvantnog sistema definirana tek u sprezi s eksperimentalnom postavom, tj. sa stvarno provedenim mjerenjem.<sup>71</sup>

I time se opet vraćamo na početak naše rasprave. Naime, ako pod »prirodom« sistema podrazumijevamo vrstu mjerno-računskog algoritma primijenjenog u određenoj eksperimentalnoj postavi, onda je tvrdnja trivijalno točno. Ako, međutim, mislimo na prirodu objekta samu po sebi, onda tvrdnja, kao što smo pokazali u prethodnom odjeljku, ostaje objektivno nedokaziva.<sup>72</sup>

<sup>69</sup> Možemo zamisliti sudar dviju čestica ili raspad nekog sistema, npr. atoma, na dva podsistema.

<sup>70</sup> Dok je formalizam sam po sebi dokazivao *formalno* potpun.

<sup>71</sup> Bohr u 45.

<sup>72</sup> I vodi u novi paradoks, koji u neku ruku predstavlja proširenje Einstein-Podolsky-Rosenovog paradoksa s obzirom na podignute prigovore, tzv. Paradoks Schrödingerove mačke (Schrödinger, E.: »Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik«, Naturwiss., Heft 48 /1935/ 807—812). U njega nećemo zalaziti jer ne pridonosi ništa novo iznesenim tezama.