

Bohrovo ograničenje deskriptivne metafizike i tumačenje kvantnog formalizma

KREŠIMIR AGBABA

19. siječnja 2008.

Sažetak

Despite broad grounds the title settles with, the paper gives an overview of some of the most fundamental philosophical problems quantum mechanics implies (especially due to the division of our ordinary language which describes ontology at the macro-level, and the subatomic world which is described by the mathematical formalism of quantum theory). An analysis is provided of the need to revise our language or (should we deem it wrong) our physical theories. In that light, the EPR experiment and the Copenhagen interpretation (along with Bohr and Heisenberg) are discussed in detail. Throughout the exposition, language will be paid greater attention, and will be shown that our ordinary language (though, strictly in terms of Bohr's limitation) is not sufficient in tackling the problems quantum phenomena demand.

Problem mjerenja jedan je od fundamentalnih filozofskih problema kvantne mehanike (u daljnjem tekstu KM), a sam problem tiče se uvelike matematičkog formalizma i njegove interpretacije. Valna funkcija, kao važan segment tog formalizma, govori da je kvadrat valne funkcije proporcionalan vjerojatnosti nekog definiranog stanja. Pojednostavljeno rečeno, valna funkcija je vjerojatnost da će čestica (elektron ili foton) biti na nekom određenom mjestu. Sama čestica u pravilu nema određeni položaj (ili spin), sve do trenutka kada je mjerenje izvršeno. Poanta je da motritelj zajedno sa mjernim instrumentom 'urušava' valnu funkciju, što vodi do određenja samog motrenog stanja.

Matematički formalizam KM predviđa 'mješovita stanja' u kojima koegzistiraju i drugi mogući oblici mjerenja.¹ No, suprotno tome, motritelj *eo ipso* zamjećuje samo jednu od pojava kvantnog stanja. Ovdje se sada javljaju prve

¹U stručnoj terminologiji ovakva 'mješovita stanja' potpadaju pod naziv 'ontologija mnogo svjetova' (eng. *the many world ontology*). Ono što je važno za 'ontologiju mnogo svjetova' jest da prema njoj ne može postojati KM teorija, na primjer, cijelog svemira budući da smo (za razliku od klasične fizike) prinuđeni na motritelja koji nije dio sustava. Jer, kada se govori o granici ili o rezu (eng. *cut*) između mikro-svijeta i makro-svijeta, motritelj koji ispituje predviđanja uvijek se nalazi na svojoj strani 'reza'. (usp. Putnam [21]. No, više o ovome malo kasnije).

poteškoće pri razumijevanju pojava u KM. Naime, postavlja se pitanje (i to s pravom), trebamo li i možemo li povući adekvatnu granicu između KM, odnosno mikro-nivoa s jedne strane, i klasične slike svijeta vođene Newtonovim zakonima, odnosno makro-nivoa s druge; ili se jednostavno trebaju proširiti dosezi KM na sve predmete i tako pripisati 'urušavanje' valne funkcije motriteljevoj svijesti, (vidi npr. Domazet [6]). Čini se kako je matematički formalizam, kojim bi se trebala opisivati kvantna stanja, a samim time i priroda općenito, adekvatan opis ukoliko težimo jednom unificiranom objašnjenju. Tumačenje formalizma ovdje je presudno.

Glavni problem koji se u tom slučaju javlja je činjenica da je formalizam u pravilu linearan sustav, te kao takav pretpostavlja superpoziciju više kvantnih stanja, odnosno, pretpostavlja se superpozicija svih mogućih položaja u kojoj se elektron može naći. Takva pojava nedvojbeno proturječi našoj logici (pod 'našoj' mislim sa klasičnu logiku) koja je između ostaloga i temeljno oruđe običnog jezika kojim opisujemo predmete i stanje stvari na makro-nivou.

Ovdje se čini da smo u neugodnoj poziciji, jer smo se primorani odlučiti za jedno od toga. Hoćemo li prihvatiti matematički formalizam sa svim svojim nedostacima (i prednostima), te zahtijevati reviziju svakodnevnog jezika, ili ćemo (ma koliko god teško zvučalo), zahtijevati reviziju dane fizikalne teorije?

Kada Quine [24] konkretno razmatra prijedlog napuštanja zakona isključenja trećeg u aplikaciji na rečenice KM, drži da bi moguća revizija jedne fizikalne teorije mogla biti manje štetna za našu cjelokupnu teoriju, za razliku od revizije naše logike.

No, Dummett [7] ne dijeli tu poziciju. Naime, taj nam argument naprosto ne daje za pravo pretpostaviti da bi izmjena fizikalne teorije (za razliku od logike) bila manje štetna samo zbog toga što se pokazalo da naša logika ne funkcionira najbolje unutar jedne domene diskursa.

No, unatoč ovom Dummettovom prigovoru (a možemo spomenuti i AGM teorije koje ograničavaju mogućnost revizije općenito), Quineova teorija revizije teorija nailazi na odobravanje u širim filozofsko-znanstvenim (i logičkim) istraživanjima. Revizija je u svakom slučaju notorno složen problem. U okviru Quineovog holizma koji je nešto šire poznat i pod nazivom 'Quine-Duhem teza', teorija se kao cjelina sučeljava s iskustvom, te se kasnije prilagođava našoj konceptualnoj shemi njenom revizijom. Što se same revizije tiče, mogući su različiti oblici revizije i sve je podložno reviziji, vidi Quine [22].²

1

Ipak, suočeni smo s općenitom nelagodnom koja se javlja pri procesu mjerenja. Glavni problem je taj što u samom procesu mjerenja (u svrhu ilustracije,

²Zanimljivo je također vidjeti kako se revizije teorija ponašaju u dinamičnim sustavima, no, iako interesantna tema (ali i široka), nećemo se ovdje s njome baviti. Za detaljniju diskusiju o toj temi vidi Žarnić [29]. Kao riječ upozorenja, oni 'logici nepriklonjeni' trebali bi se fokusirati na uvod i zaključak njegove ekspozicije, jer (iako je filozofijski 'natopljena' tema), strogo je formalna u svojoj strukturi.

recimo da mjerimo polariziranu zraku svjetlosti), dolazi do *poremećaja* uzrokovanog neizbježnim elementom (Planckovim kvantom), koji kada se izmjeri jedna fizikalna veličina mikroskopske čestice, narušava drugu fizikalnu veličinu. Ovo izravno proizlazi iz Heisenbergovih relacija neodređenosti:

$$\Delta x_\gamma \cdot \Delta p_\gamma \approx \frac{\hbar}{4\pi}$$

Veličina \hbar , odnosno Planckov kvant djelovanja, je jako mala, tako da se neegzaktost javlja tek pri vrlo preciznom mjerenju. Budući da $p = m \cdot v$ vrijedi, korespondirajuće relacije sa položajem (x) i momentumom (p) poprima formu:

$$\Delta x_\gamma \cdot \Delta p_\gamma \approx \frac{\hbar}{4\pi m}$$

Za čestice velike mase (dakle, za makroskopske čestice) takvo ograničenje ne vrijedi. Premda, za mikroskopske čestice poput elektrona ili fotona, čija je masa znatno manja, ograničenje postaje transparentno. Situacija s kojom smo suočeni je sljedeća; položaj (x) jedne mikroskopske čestice i momentum (p), ne mogu biti *simultano* izmjereni (ili precizno određeni). Izmjerenom jednom fizikalnom veličinom narušavamo drugu i *vice versa*.

Kao slikovitiji primjer, možemo se pozluziti jednim misaonim eksperimentom.³ Zamislite mačku zatvorenu u kutiju sa, recimo, kapsulom cijanida koja će prsnuti ukoliko se Geigerov brojač aktivira. Ovo će se dogoditi ukoliko se atom u radioaktivnoj supstanci raspadne (i postoji 50% šansi da se to dogodi unutar jednog sata), u protivnom, mačka je živa. Problem je u tome što se sustav nalazi u *neodređenom* stanju. Valna funkcija cijelog sustava je superpozicija stanja u potpunosti opisana vjerojatnošću događaja. Kada pogledamo u kutiju, vidjeti ćemo da je mačka ili živa, ili mrtva. Zbog 'urušavanja' ne možemo reći prije otvaranja kutije je li mačka živa ili mrtva.

Odmah valja postaviti i određena ograničenja. Postoje različita tumačenja matematičkog formalizma KM koja, osim omogućavanja uspješnog predviđanja, nude i tumačenja koja posjeduju eksplanatornu vrijednost. No, cilj ovog članka nije analizirati sva tumačenja (ili 'glavne pravce'). Za potrebe ovog članka, ključno će biti pozabaviti se s Bohrovim tumačenjem formalizma KM. Nadalje, pokušat će se ponuditi prikaz Kopenhaškog tumačenja (koji je u velikoj mjeri pod utjecajem Bohra i Heisenberga) koje, ukoliko uzeto za sebe, u bitnome ističe Bohrovo razumijevanje kvantnih fenomena.

EPR eksperiment, kao jedna izravna protupozicija Bohru i Kopenhaškom tumačenju KM biti će analiziran u kontekstu Bohrovog programa, putem čega će se moći vidjeti koja je narav problema koji se javljaju pri pokušaju razumijevanja mikro-procesa. Ukratko ćemo se osvrnuti na tzv. 'Everettovo' tumačenje koje nudi pokušaj rješavanja problema 'urušavanja' isprepletenih stanja u jedno. U svjetlu toga, ostaje nam promišljanje metafizike svakodnevnog jezika kao važne eksplanatorne komponente fizikalne teorije.

U okviru *Kopenhaškog tumačenja*, Bohr i Heisenberg smatrali su da su rečenice (rečenice koje izjavljuju položaj i momentum mikroskopskih čestica),

³Misaoni eksperiment je poznat pod nazivom 'Schroedingerova mačka' kojeg je formulirao Schroedinger [25].

besmislene, *simpliciter*. Bohrovo tumačenje formalizma KM sastoji se od dvije glavne teze: (1) Spoznajna situacija može se razumijeti samo ukoliko je opisana klasičnim terminima i (2) Mikroskopska pojava može se precizno odrediti jedino u sklopu cjelokupne spoznajne situacije.⁴ Bohr ovdje zahtjeva jedno općenito ograničenje naše metafizike. Naime, iako zbog je Planckovog kvanta spoznaja zbilje na mikro-nivou drastično različitija od spoznaje na makro-nivou, Bohr ostaje pri opisu kvantnih procesa uz svakodnevni jezik. U Bohrovom riječniku, fizikalne veličine (ili svojstva) tih čestica su *komplementarna*. U kontekstu valno-čestičnog dualizma (kojeg ćemo se dotaknuti nešto kasnije), to bi značilo da se adekvatan opis ne može postići niti valnim, niti čestičnim opisom. Zajedno, oni tvore potpuni (komplementarni) opis. Ovako Bohrovu poziciju ocrtava Petersen [20]:

U kvantnoj fizici koristimo iste pojmove [kao i u klasičnoj fizici], prema tome, i iste mjerne alate, no... razlika između mjernih alata postaje od izuzetne važnosti. Ovdje [u kvantnoj fizici] ne možemo kombinirano koristiti različite tipove instrumenata. Ne možemo kombinirati podatke o sustavu koje dobivamo iz jednog tipa instrumenta s podacima koje dobivamo iz drugog. Dakle, kvantno-fizikalni fenomen karakteriziran je tipom korištenog mjernog instrumenta. Fenomene koje dobivamo motreći isti sustav s dva različita tipa instrumenta, *međusobno su isključivi*.⁵

Upotreba termina 'položaj' i 'momentum' izraženi u klasičnim terminima pretpostavljaju pojedinačnu spoznajnu situaciju i povezani su s valno-čestičnim, komplementarnim modelom opisa. No, zbog nezanemarive razlike svojstava mikro-predmeta i opažajnih predmeta,⁶ svojstva mikroskopskih čestica određuju se u pojedinačnoj spoznajnoj situaciji (uvjeti za upotrebu klasičnih termina određena je eksperimentalnim ishodom prema Bohru).

2

Sukladno s Bohrovom, Heisenbergova [16] filozofija zahtjeva pojam značenja termina svojstava kvantnih fenomena, koje svoje mjesto također zadobiva kroz integraciju cjelokupne spoznajne situacije:

Ako netko želi biti na čisto sa značenjem riječi 'položaj objekta', na primjer elektrona (u danom referentnom sustavu), trebao bi specificirati određene eksperimente s kojima želimo mjeriti 'položaj elektrona; u *pro-tivnom*, te riječi nemaju značenje.⁷

Heisenberg nudi dodatne uvjete u svrhu povezivanja formalizma KM s eksperimentalnim događajem. Dodatni uvjeti sastoje se od *predodredbe* mjernog instru-

⁴Za ovakvu karakterizaciju Bohrove filozofije, usp. Hughes [17], Petersen [20], Albert [1] ali i Domazet [6].

⁵Citirano u Hughes [17], kurziv moj.

⁶Brzina gibanja makro-predmeta znatno je sporija od brzine svjetlosti.

⁷Citirano u Wheeler and Zurek [27], kurziv moj.

menta, zatim uloge motritelja i sl.⁸ Subjekt-objekt relacija jedna je od temeljnih teorija Kopenhaškog tumačenja. Problem mjerenja i simultanog određenja položaja i momentuma mikroskopske čestice (koji smo tematizirali ranije), proizlazi upravo iz Heisenbergovih relacija neodređenosti koje su jednostavno nejednakosti parova varijabli koje se dobivaju iz jednadžbi koje opisuju ponašanje kvantnog sustava.

U okviru Kopenhaškog agnosticizma, Heisenbergovo stajalište je da se ne može u svakom slučaju reći postoji li elektron (budući da se do njegove 'postojanosti' dolazi 'urušavanjem' valne funkcije), već da taj pojam proizlazi iz samog epistemičkog čina.

Ovdje se, međutim može postaviti pitanje gdje postavljamo granicu između onoga što je realno, dakle *izravno* opažljivo i onoga što je *teorijski* postulirano? Na primjer, ono što možemo vidjeti ili mjeriti mikroskopom može se s različitim pozicija protumačiti kao da je izravno motreno ili da je 'optička iluzija' koja je produkt instrumenata konstruiranih po uzoru na neku teoriju. Ili pak, je li uspjeh u predviđanju elektrona dovoljan razlog da vjerujemo u elektrone i fotone?⁹

Spoznajni subjekt (prema gornjem odsječku) samim time više nema ulogu pukog elementa opažanja, nego upravo subjekt sudjeluje u interakciji. Prema Kopenhaškom tumačenju, (imajući pritom na umu samo Bohra i Heisenberga), valna funkcija, u skladu s prijašnjom diskusijom, uzima se kao puka mentalistička konstrukcija koju um proizvodi (zajedno sa svojim klasičnim predodžbama), kako bi se na kraju iskristalizirala predodžba naše spoznaje.

Postoji, međutim, još jedna vrlo važna uloga subjekt-objekt relacije; ona s jedne strane ocrtava jasnu razliku između makro-svijeta i mikro-svijeta, jer u makro-svijetu element subjekta nije presudan (i nimalo ne utječe na stanje stvari), dok u mikro svijetu, motrenje mikroskopske čestice može biti 'kobno'¹⁰ za njegovo gibanje. Samim time, pitanje fotona kao supstancije se unutar Kopenhaškog tumačenja uzima u svim trenucima i kao val i kao čestica. Ovo nedvojbeno zvuči paradoksalno, te smo prinuđeni postaviti pitanje:

Kako se svjetlost (odnosno u tom slučaju foton) tumači čestičnom i valnom slikom?

U ovom slučaju (naoko iskrivljene teorije), dualnost svjetlosne prirode rješava

⁸Na gotovo sličan način funkcioniraju i Carnapova [4] 'pravila mjerenja', koja služe za specifikaciju određenih međudjelovanja s objektima koji posjeduju svojstva, te nam na taj način govore kako pripisati vrijednost (u Carnapovom slučaju je to broj) 'stupnju' ili 'količini' svojstva koje objekt posjeduje.

⁹Čisto kao jedna pedagoška napomena, postojanje određenih entiteta na može biti odbačeno osim ukoliko može biti pokazano kako govor o njima može biti nadomješten novom teorijom koja ih ne uključuje, ne s druge strane, na adekvatan način služi istoj općoj svrsi. Uz svaku od ovih tvrdnji vezana je ekstenzivna debata. Bilo kako bilo, rasprava o realizmu i anti-realizmu je preveliki zalogaž za potrebe ovog članka, premda ćemo je se djelom dotaknuti malo kasnije.

¹⁰Ovdje ne želim reći da motrenje može nekim čudom *uništiti* elektron (iako izraz može imati takve konotacije), već motrenje elektronu poremećuje smjer nakon što foton u njega udari. U trenutku kada foton padne na elektron, mi ga uočavamo.

se upravo međudjelovanjem čestice s mjernim uređajem. Onog trenutka kada se eksperimentalnim načinom ustanovi njezina priroda (koju opažamo rezultatom eksperimenta), tada će se danu česticu u 'tom tonu' i interpretirati.¹¹ Čestica je upravo ono kako se ponaša kada je izvršeno mjerenje, jer su 'eksperimentalne cjeline' koje doprinose komplementarnosti motrenja međusobno isključive.

Ovdje se daje naznaka 'kontekstualizma'¹², koji je doduše i semantičkog karaktera. Ono što, dakle, radimo jest da navodimo svjetlost kao teorijski entitet unutar danog konteksta (ili preciznije: unutar danog moda pojavljivanja), koji se očituje promjenom svjetlosne naravi. Zbog znanstvene/filozofijske parsimonije (ne želeći više entiteta na Nebu i Zemlji nego je potrebno), ekonomija nam nalaze da poistovjetimo predmet s klasom njegovih modova pojavljivanja.

Rasplet ove isprepletene (da ne kažem proturječne) situacije, može se riješiti Russellovskom parafrazom, eliminirajući opise što dovodi do svođenja rečenične forme na egzistencijalnu kvantifikaciju, čime je ponuđeno riješenje pitanja kako neki (nedvojbeno problematični izrazi) poput 'Sadašnji Francuski kralj' (koji, normalno, referiraju ni na što) ipak uspijevaju biti smisleni. Tako svojstva reprezentirana varijablama mogu biti smisleno pripisane mikro objektu, no samo i isključivo u relaciji s nekim aktualnim eksperimentalnim ishodom.¹³ U klasičnoj (možemo reći i pred-relativističkoj) fizici, ta se svojstva pripisuju objektima bez obzira motrimo ih ili ne.¹⁴

Ovo je upravo i Bohrovo gledište. U pogledu običnog jezika istinitosni uvjeti rečenica koje pripisuju određene vrijednosti mikroskopskom objektu, zavisne su o posredujućem mjernom instrumentu na gotovo takav način da istinitosni uvjeti moraju uključivati i referenciju na eksperimentalno uređenje kao i na zbiljski ishod eksperimenta.

Ovdje se vraćamo na Bohrov pojam komplementarnosti. Komplementarnost čestice i vala sada se primjenjuje, ne ontološkom fotonu, već *fenomenu*. Iz ovoga se jasno vidi kako jedna generalna ontološka teorija kvantnih fenomena nije moguća. No, glavna komponenta načela komplementarnosti seže još dalje. Prema Bohrovom tumačenju [2], Bohrova pretpostavka komplementarnosti implicira da će upotreba komplementarnih parova neprecizno definiranih pojmova biti nužna za detaljni tretman svake domene koja će se ikad istraživati.¹⁵

¹¹Numerička vrijednost E , energije u čestičnoj manifestaciji bila je u odnosu s frekvencijom ν , dok je u valnoj manifestaciji ona označena Einsteinovom relacijom $E = h\nu$. Numerička vrijednost (p) momentuma u čestičnoj manifestaciji je također bila u odnosu s valnom dužinom λ uz pomoć de Broglie relacije $p = h/\lambda$. Za detaljniju diskusiju vidi Bohm [2].

¹²'Kontekstualizam' ne u smislu Bellovih formulacija skrivenih varijabli (kao *contextuality*), nego kontekstualizam čisto semantičke naravi.

¹³Napominjem kako je Russellova Teorija Opisa moji dodatak pri pokušaju razumijevanja Bohrove filozofije. Bohr nigdje ne spominje (barem ne koliko ja znam, a niti sam vidio kod ostalih autora) eksplicitno ovakvu metodu, premda jedna dublja analiza može pokazati kako bi Russellova metoda bila u potpunosti kompatibilna s Bohrovim programom. Na žalost, zbog opširnosti te teme, (premda se nadam, pokrenute u skoroj budućnosti), nećemo detaljnije ulaziti u tu raspravu.

¹⁴Obično se makro predmetima pripisuju *primarna* i *sekundarna* svojstva.

¹⁵Konačno, moguće je tvrditi (u Bohrovom kontekstu), *simpliciter*, da kvantna teorija uopće nije *ontološka* teorija. Formalizam se ne tiče svjetlosti i čestice *per se*, već naprosto stvara statistička predviđanja o motrenim eksperimentalnim ishodima.

Zbog toga Bohr insistira na običnom jeziku pri objašnjavanju dualne prirode svijetlosti, jer upravo se upotrebom običnog jezika ontološka proturječja izbjegavaju, ne krše se više zakoni klasične logike, niti ima govora o kakvoj kategorijskoj pogrešci (u Ryleovskom smislu riječi). No, koliko god se robusnom može ovakva koncepcija činiti u ophođenju s egzemplarnim problemima, još uvijek se čini da tek ocrtava dublje fizikalne probleme objašnjavanja pojmova i predmeta koje 'projiciramo' u prirodni svijet.

3

Bohrov 'program' nalaže nam jednu općenitu restrikciju mikro-procesa na pojedinačnu spoznajnu situaciju, međutim za razumijevanje je potrebna cijelokupna spoznajna slika. Izgleda da Bohrov *konzervativizam* na taj način, ne samo da prihvaća metafiziku običnog jezika koju imamo – ne uvodeći novu, već postavlja dodatnu restrikciju (odnosno, dodatno ograničenje) na onu metafiziku koju smo dosada posjedovali. S druge strane, Einstein, Podolsky i Rosen [11] su 1935. godine postavili misaoni eksperiment kojim su argumentirali kako postoje veliki problemi u Bohrovom i Kopenhaškom shvaćanju KM.

U grubim crtama, eksperiment uzima u obzir dvije čestice (dakle, radi se o sustavu sa dvije čestice za razliku od od prijašnje situacije) koje se nalaze u početnom, isprepletenom (eng. *entanglement*) stanju u odnosu na položaj i momentum. Pretpostavimo sada da je veličina A izmjerena; sustav S_1 podliježe narušavanju valne funkcije, te se nalazi u *čistom stanju*. Iz toga znamo koja je valna funkcija prvog sustava. Prema tome, mjerenjem A i B drugog sustava dopušta precizno određenje C i D drugog sustava S_2 . Međutim, S_2 više nema interakcije sa S_1 , tako da proces mjerenja ne poremećuje S_1 .

Sada smo, čini se, prinuđeni prihvatiti da dvije ne-komutirajuće fizikalne veličine C i D imaju *simultanu realnost*. No, budući da formalizam KM takvu pojavu ne dopušta, Einstein, Podolsky i Rosen zaključuju da je formalizam KM nepotpun, te nadopunjuju postojeći formalizam dodatnim, skrivenim varijablama. One u jednoj varijanti, ili određuju ishode mjerenja fizikalnih veličina, ili fiksiraju vjerojatnost mjernih ishoda.¹⁶ Prema tumačenju EPR-a, to znači da su veličine čestica uspostavljene u vrijeme njihovog početnog stanja. U tom kontekstu možemo postaviti pitanje:

Kako je moguće određenje položaja i momentuma prije mjerenja?

Einstein, Podolsky i Rosen [11] postavili su sljedeći uvjet potpunosti koji bi

¹⁶Općenito govoreći, matematički formalizam KM sadrži karakteristike koje su podložne prigovorima. Ovo je podložno restrikcijama koje slijede iz Kochen-Specher teorema [19]. Teoremom se tvrdi da u slučaju KM sustava s Hilbertovim prostorom s tri ili više dimenzija, postoje konačni skupovi fizikalnih veličina za koje ne postoji pridavanje vrijednosti, ukoliko je pridavanje potrebno za očuvanje odnosa između veličina koje stoje u korist njihove reprezentacije kao linearnih operatora u prostoru. Iako postoje problemi teorije skrivenih varijabli, nastojimo ovdje pokazati kako Bohrovo tumačenje ispunjava uvjete koje KM postavlja, te da EPR eksperiment ipak nudi ontološki prihvatljiviji opis.

ponudio predodžbu fizikalne realnosti:

Ako, bez ikakvog poremećaja [kvantnog] sustava, možemo sa sigurnošću predvidjeti (tj. s vjerojatnošću jednakom jedinstvenosti) vrijednosti fizikalne veličine, onda postoji element fizikalne realnosti koji korespondira toj fizikalnoj veličini.

Međutim, u KM fizikalna veličina koja korespondira s ne-komutirajućim operatorima ne može biti simultano izmjereno. U drugu ruku, ukoliko bismo prema mjerenju utvrdili vrijednost fizikalne veličine na jednoj od čestica (i uz pomoć matematičkog formalizma) predvidjeli ishod na drugoj čestici, čini se kako postoji realnost koja korespondira fizikalnoj veličini.¹⁷

Poruka koju EPR šalje je jasna: KM ne može biti cijela priča. Premda, iz Bohrovog kuta gledišta, temelji na kojima je eksperiment sazdan, definitivno je prijeporan. Izraz 'fizikalna realnost' koju EPR koristi, prema Bohru [3] je izveden iz *a priori* koncepcija:

Mjera u kojoj se dvoznačnost može pripisati takvom izrazu kao što je 'fizikalna realnost', ne može sigurno biti izvedena iz *a priori* fizikalnih koncepcija, već mora biti utemeljen na izravnom prizivu eksperimenata i mjerenja.

Ono što Bohr zamjera EPR-u jest to da unatoč ispunjenom *nužnom* uvjetu za postavljanje kriterija realnosti, nije ispunio i *dovoljan* uvjet, u smislu da ne može na zadovoljavajući način objasniti kako fizikalna veličina može biti izmjerena *prije mjerenja*. Do poremećaja mora doći samim odabirom prve fizikalne veličine koju odlučujemo mjeriti; predviđanja bez poremećaja nema.

Međutim, pretpostavka o lokalnosti, u pravilu, implicitno se nalazi u metafiziци svakodnevnog jezika kojim opisujemo opažajne predmete na makro-nivou. Čini se da EPR dopušta svakodnevni jezik za opisivanje kvantnih fenomena. Sada ćemo ili prihvatiti Bohrovo tumačenje formalizma KM, te tako zahtjevati neplauzibilnost EPR teze, ili, ukoliko prihvatimo svakodnevni jezik (čime prihvaćamo pretpostavku lokalnosti), Bohrov 'program' ide kroz prozor. No, još jedna situacija je sada u igri.

Uzmemo li da je lokalnost pretpostavka fizikalnog jezika, koji je prema Dummettu [8] samo ekstenzija svakodnevnog jezika, izgleda da je Bohrov program *inkonzistentan*, jer osim što ograničava postojeću metafiziku, krši (prema Einsteinu) jedan intuitivan kriterij koji je u velikoj mjeri važan za razumijevanje prirode (držeći temeljna načela neke teorije istinitom, uključuje predanost istinitosti njezinim logičkim posljedicama).¹⁸

Pritom je važno istaknuti kako odvojivost često nailazi na prepreke, pogotovo kada se radi o Specijalnoj Teoriji Relativnosti (STR). STR je prema Hughesu [17], jedna od najčvršćih teorija moderne fizike, i trebali bismo biti vrlo kritični prema korelacijama EPR-a koje narušavaju STR. U Bellovom slučaju, dakle,

¹⁷Zključujući, naravno, da je element nastao eksperimentalnim ishodom na razdvojenoj (lokalnoj) mikroskopskoj čestici.

¹⁸Posebno je pitanje, u koje ovdje, u žalost, ne možemo ulaziti, zašto bi bilo koja teorija pristala na ovako gotovo *samo*-ograničenje?

postavljanje jednog mjernog aparata utječe na ishod drugoga. Premda, i sam Bell tvrdi (vidi ponovo Hughes [17]), da takva pojava ne krši izravno STR.

(Ovdje dopuštam sebi prijeći preko argumenata koji idu u prilog neodvojivosti, jer interakcije koje spominje Bell krše odvojivost u jednom smislu, naime, da mjerni aparati nebi mogli funkcionirati jedan nezavisno od drugoga, čak i ako bi aparate razmjestili na različite krajeve svemira). No, 'Einsteinova odvojivost' ostaje netaknutom, zbog toga što se interakcije mogu vršiti i manjom brzinom od brzine svijetlosti, te izvršiti svoj učinak prije nego se mjerenje uspostavi.¹⁹

Einstein [10] je znao da zaključak EPR-a leži na pretpostavci potpune nezavisnosti dva sustava nakon interakcije, no, pretpostavka (ne-)odvojivosti ili nelokalnosti koja je predložena od strane 'ortodoksnog' tabora, za njega je neprihvatljiva, zbog toga što se odbacivanjem pretpostavke odvojivosti generalno onemogućava, ne samo klasično razumijevanje znanosti i prirode, nego i oblikovanje i testiranje samih prirodnih zakona. Ovdje Bohrova teza neodvojivosti (eng. *inseparability*) gubi na snazi.²⁰ Premda će s Bohrove strane ponovo zahtijevati cijelokupna spoznajna situacija (i time ponovo uspostavljanje uvjeta smislenog diskursa), ono što Bohr ne nudi jest jednu kauzalnu teoriju korelacija.

I ne samo to; komplementarnost kvantnih fenomena postaje besmislenom, budući da je komplementarnost primjenjiva samo na motrene entitete koji su međusobno isključivi. Ipak se čini da možemo steći uvid u obje fizikalne veličine u njihovom početnom, isprepletenom stanju, što nam, u konačnici dopušta konstrukciji jednog potpunog opisa kvantnog stanja.

Ovdje se sada dovodi u pitanje element poremećaja koji je bio neizbježan sastojak motrenog procesa. Planckov kvant ovdje ima ulogu nominalne vrijednosti kao pukog faktora jednog *tumačenja* matematičkog formalizma, a ne učinka određene djelatnosti mjernog aparata.

4

Harrison [15] u svojem članku "Against Quantum Logic" piše: "Uvijek sam pretpostavljao da, prema kvantnoj teoriji, ... [ako] je određen položaj čestice, neistinito je da posjeduje ijednu od brzina specificiranu [na iscrpnom popisu brzina]." To bi značilo da ukoliko izmjerimo položaj čestice i ustanovimo (rezultatom mjerenja) da joj je A položaj, tada bi popis svih mogućih momentuma čestice $B_1 \vee B_2 \vee \dots \vee B_n$, bio neistinit. No, to nije točno. Iskaz $A \wedge \lceil B_1 \vee \dots \vee B_n \rceil$ je istinit; međutim iskaz $\lceil A \wedge B_1 \rceil \vee \dots \vee \lceil A \wedge B_n \rceil$ nije istinit zbog toga što, kako Dummett [7] tvrdi, zakon distribucije ne vrijedi.

Kochen [18] s druge strane smatra da je skup mogućih svojstava podjeljen u Booleovske podalgebre, te se svaka od njih sastoji od skupa dostupnih svojstava. Koja od svojstava su dostupna, određeno je interakcijom kojoj je sustav

¹⁹Premda Sklar [26] tvrdi da su događaji u prostornoj odvojivosti u potpunosti imuni od našeg epistemološkog kontakta, a upravo ta činjenica u STR vodi do doktrine o konvencionalnosti i istovremenosti.

²⁰Samo jedno terminološko upozorenje. 'Lokalnost' (eng. *locality*) je sinoniman s 'odvojivosti' (eng. *separability*). Isto tako 'nelokalnost' (eng. *nonlocality*) je sinoniman s 'neodvojivostu' (eng. *inseparability*). Kod različitih autora može se naći različita terminologija.

podlijegao, tj. svaka interakcija daje sustavu skup dostupnih svojstava, što nadalje Kochen naziva strukturom 'interakcijske algebre' (eng. *interaction algebra*). Kao primjer, možemo navesti Hughesov [17] koji uzima u obzir česticu spina- $\frac{1}{2}$. Interakcijske algebre su opskrbljene smjerom α u fizikalnom prostoru i svaka ima tek četiri elementa:

$$\{\emptyset, (S_\alpha, +\frac{1}{2}), (S_\alpha, -\frac{1}{2}), (S_\alpha, \pm\frac{1}{2})\}$$

Svaki skup je skup mogućih svojstava. Prema tome, (neka Σ_p predstavlja jedan skup mogućih svojstava), $A \models B$ akko je B istinit u svakoj točki vrednovanja Σ_p u kojoj je A istinit. No, iako neodređena čestica sa spinom- $\frac{1}{2}$ može, u pravilu, imati aktualna svojstva, *epistemički* uvijet nije zadovoljen.²¹ Sljedeći takvu tehničku ekspoziciju, ostaje nam implicitna poteškoća što smo ovime prinuđeni prihvatiti 'Everettovo' tumačenje, koje se temelji na 'ontologiji mnogo svijetova' (spomenuto u fusnoti 1.) u kojoj se aktualnost pripisuje svakom od pojedinih kvantnih stanja u njihovim isprepletenim ishodima mjerenja.²² Time su svi rezultati koje matematički formalizam predviđa aktualni u istoj mjeri, premda je svaki od tih stanja povezan s po jednim motriteljem.²³

Iako se ovo *prima facie* doima kao riješenje problema 'urušavanja' mješovitih stanja u samo jedno, ovakvo se 'gotovo Lewisovsko štampanje svemira kao na traci', (te s implicitnom pretpostavkom da postoji odrediv skup svijetova na koje se *predmjerni* svijet dijeli), čini preskupom teorijom s obzirom na beneficije koje nosi, što nikako nije u skladu s našom ontološkom predanošću (eng. *ontological committment*). Na taj način, samo postavljamo binu za beskonačni regres objašnjenja kvantnog stanja.²⁴

Epistemologija (ili znanje) time postaje jednom od glavnih prepreka koja se javlja u KM, a i u ostalim sektorima znanosti i filozofije. Problem nemogućnosti predviđanja druge fizikalne veličine (u trenutku kada znamo prvu), proizlazi iz nemogućnosti susretanja epistemičkih zahtjeva, te u konačnici, metafizike nedostatne eksplanatorne vrijednosti. Tako se Bohrov epistemološki kriterij

²¹Postoji, međutim, široki spektar rasprava unutar filozofske tradicije o tome što smatramo *aktualnim* entitetima, nasuprot još *ne*-aktualiziranim entitetima. Quine [23] je skeptičan prema takvoj 'prenapučennoj' ontologiji jer, krši mogućnost identifikacije, u smislu, da uzevši bilo koji od (u Quineovom žargonu) 'neaktualiziranih mogućnosti' – dakle, mogući entiteti koji nisu aktualizirani – onemogućeni smo pripisati istovjetnost entiteta sa samim sobom i različitost spram ostalih u nizu *mogućih*. Takvi entiteti poprimaju neke protuintuitivne vrijednosti – oni su naime, beskonačni jer se istovjetnost pripisuje diskretnim objektima. Čestice (ili elektroni) imali bi beskonačna svojstva, što bi dalje vodilo u još puno kontroverznije posljedice. Primjerice, kako mi je Sandro Skansi istaknuo, ukoliko bi elektron imao beskonačnu brzinu (koju dobiva iz momentuma), vrijedilo bi da bismo lokalizacijom, odnosno određivanjem položaja, elektron izbacivali iz vremena, dajući mu na taj način beskonačnu brzinu i time ga oslobadali temporalne ovisnosti za dolaženje do određenog mjesta (ili bi ga se pak vraćalo unatrag kroz vrijeme za nekog drugog motritelja.)

²²Korak od formalnih zahtjeva KM do ove teorije nije tako direktan, ali je put dobro utjeran tako da ga ovdje ne treba detaljno elaborirati.

²³Ono što 'ontologija mnogo svijetova' nudi jest opis bez skrivenih varijabli jer je sve objašnjeno 'maksimalnim stanjem'.

²⁴Još bi se moglo postaviti pitanje na koji način bi se tumačio pojam 'predviđanja' ukoliko bi svako od mogućih stanja bilo jednako aktualno. Ovo pitanje postavlja i Putnam [21].

uzdiže na razinu ontološkog, time što ga određuje kao kriterij koji postavlja značenje, iako se ovdje radi o dijametralno suprotnim problemima.

Iz ovoga se implicitno može iščitati glavna razlika između 'Bohr i Einstein i sur. debate'. Einstein, Podolsky i Rosen tvrde da se trebaju otkrivati objektivna svojstva nezavisne zbilje, dok Bohr ovdje uvodi jedno novo ograničenje koje se tiče epistemologije, odnosno, ograničenja teorijskog znanja potpuno racionalnog znanstvenog istraživača kojim smo prinuđeni na jedno neplauzibilno shvaćanje zbilje.

5

Prihvaćamo li da je EPR eksperiment ponudio potpuni opis mikro-procesa, čini se da Bohrov program ima poteškoće. S druge strane, smatrajući Teoriju skrivenih varijabli neplauzibilnom (u svijetlu Bellovog i Kochen-Speckerovog teorema), Bohrovo ograničavanje metafizike, u najmanju ruku djeluje protuintuitivno. Bilo kako bilo, ipak nam još preostaje analizirati Bohrovo *načelo korespondencije* izraženo gore u (1). U tu svrhu možemo postaviti pitanje kojim ćemo se pozabaviti u ovom odsječku:

Trebamo li revidirati naš jezik kako bi dobili jednu jaku teoriju svojstava kvantnog sustava?

Ukoliko je odgovor "ne", prinuđeni smo se hrvati s novim pojavama te s korelacijom značenja klasičnih pojmova koja postoji u odnosu na KM. Bohrovo stajalište (izraženo ranije terminom korespondencije) je da se spoznajna situacija može razumjeti samo ukoliko koristimo klasične pojmove, te da su to pojmovi kojim se nova fizikalna teorija mora i objasniti. No nije teško vidjeti kako takva metoda sadrži neke antinomije.

Naime, iz svakodnevnog jezika *nije moguće 'izvući' neko novo tumačenje koje već nije dano tim terminima, jer tumačenje proizlazi iz njih*. Ekstenzija tog jezika (ili bolje rečeno: njegova 'rehabilitacija') morala bi uključivati, u prvom redu, promjene u značenju logičkih konstanti koje se javljaju u formulama i iskazima klasične logike – s time još, kako Dummett [8] tvrdi, *pravila* značenja moraju biti jasna kao i teorija koja tu promjenu zahtjeva.

Svakodnevni jezik ima mogućnost interpretacije pojmova poput 'položaj' ili 'momentum', pitanje *vrjednosti* tih fizikalnih veličina nema značenja. Ukoliko bi se konstrukcija metafizičkog objašnjenja odvijala u tom smjeru, postavlja se pitanje koliko je ono utemeljeno u običnom jeziku, jer bi to pretpostavljalo *ipso facto* da bude sastavni dio naše pojmovne sheme koja je utemeljena na ontologiji makro-predmeta.

Ovo djelom proizlazi iz Bohrovog i Heisenbergovog odbijanja mogućnosti da elektron može imati determiniranu stazu između dva mjerenja. U duhu Berkeleyja, Macha i Bečkog kruga, pretpostavlja se da pojam predmeta čije postojanje ne može biti empirijski verificirano,²⁵ nema značenja. Teorije značenja veliki su

²⁵Ovdje se, naravno, misli na rezultat eksperimentalnog ishoda.

zalogaj, a verifikacionizam u tom pogledu ne predstavlja iznimku. Naime, nije ga moguće formulirati na način da izbjegne problem *samoprovjere* (jer ukoliko je istinit, tada budući da se ne može empirijski potvrditi je besmislen, odnosno, neistinit).

Ukoliko bi tvrdili da je iskaz 'Elektroni se gibaju po determiniranim stazama između mjerenja' besmislen, jer nije empirijski provjerljiv, onda ne samo da se nebi mogao smisljeno postaviti, već se ne bi mogao niti smisljeno opovrgnuti. Bohrov program se upravo temelji na principu verifikacije, budući da čestica 'nastupa' u postojanje tek činom mjerenja (nakon kojeg se, s obzirom na referenciju eksperimentalnih uređaja, uspostavlja smisljen diskurs). Garola i Sozzo [13] zastupaju ovakav stav, te argumentiraju da verifikacionizam implicira 'neobjektivizam' u pogledu svojstava. Prema njima, takav nedostatak mogao bi se zaobići usvajanjem Tarskijeve Korespondencijske Teorije Istine (KTI) koju smo se spomenuli u gornjem odsječku.

U njihovoj interpretaciji, takav prijedlog je implicitno iznesen u EPR članku, gdje se (prisjetimo se) elementi realnosti, iako uzeti u ontološkom smislu, uzimaju kao svojstva sustava koji su semantički objektivni unutar KTI. Usvajanjem KTI povlači za sobom kritiku 'neobjektivizma'. Kritika 'neobjektivizma' (prema Garoli i Sozzi) temelji se na činjenici da je izveden iz vrlo problematičkih premisa iz fizikalnog i epistemološkog kuta gledišta, te ukoliko bi se premise napustile, 'neobjektivizam' ne može biti dokazan.

Iako se Garola i Sozzo ne upuštaju u detaljniju raspravu (što je velika šteta), može se zaključiti (ukoliko 'neobjektivizam' zaista ima problema) da prema tome usvajanje KTI nije *a priori* inkonzistentno. Dakle, ukoliko su svojstva sustava objektivna, tada je KM nepotpuna i EPR se slaže s tom tezom.

Kako onda shvatiti KM u odnosu na gore navedene teze? Da li kao tvrdnju (a) da je (po uzoru na EPR članak) KM objektivna ali nepotpuna ili (b) da je (po uzoru na Kopenhaško tumačenje) KM potpuna ali se ne može objektivno ustvrditi? No, čini se kako Kopenhaško tumačenje nudi neke protuintuitivne rezultate (naravno, odmah povlačeći pitanje 'zašto?').

U grubim crtama, vidjeli smo da Kopenhaško tumačenje nalaže da mikroskopski objekti postoje isključivo 'verifikacijom' eksperimentalnog ishoda (ili preciznije: 'urušavanjem' valne funkcije). Ukoliko i dolazi do 'urušavanja', pitanje je kada točno dolazi do toga. Sjetimo se primjera polarizirane zrake svijetlosti. 'Urušava' li se valna funkcija kada prolazi kroz kalcijev kristal, ili kada ulazi u fosforni zaslon? Ili se pak 'urušava' u trenutku kada prolazi kroz leću? Kada u tom slučaju eksperimentalni proces dovodi česticu u postojanje? Odgovor koji Kopenhaško tumačenje nudi jest da čestica 'nastupa u postojanje' kada je u konjunktiji s mjernim instrumentom. No, ovo stajalište nailazi na neznatne prepreke.²⁶

Naime, oslanjajući se na 'standardno' tumačenje, (imajući Heisenberga na umu), mjerni instrument, tehnički gledano, pripada svijetu klasične fizike. Sada, ukoliko su makroskopski predmeti sastavljeni od mikroskopskih čestica, odnosno

²⁶Na ovoj primjedbi sam zahvalan profesorima Raymondu D. Bradleyju (privatna komunikacija).

jednostavnijih predmeta (i prihvatimo li tezu da ukoliko kompleksni predmeti, koji su sastavljeni od jednostavnih predmeta, ne postoje ukoliko ne postoje njegovi sastavni dijelovi), makroskopski objekti ne postoje, ukoliko se ne vrši nikakvo mjerenje mikroskopskih čestica.

Sve se to oslanja na premise da (i) kompleksni predmeti postoje, (ii) kompleksni predmeti (ako postoje) sastavljeni od jednostavnih predmeta i da (iii) ukoliko ne postoje jednostavni predmeti (kao sastavni dijelovi), ne postoje niti kompleksni predmeti.²⁷ Čini se kako nas Kopenhaški *agnosticizam* u kombinaciji s Bohrovim (gore skiciranim kao protuintuitivnim) programom navodi na neželjene antinomije, jer cijeli proces mjerenja (sukladno s ovim gore iznesenim), ne bi mogao niti započeti, što je sada potpuno drugi par rukava. *Regressus ad infinitum*, zaista!

6

Tako se Bohrovo ograničenje metafizike čini preoskudnim da bi ponudio adekvatno objašnjenje kvantnih fenomena. (Ako bi to značilo da trebamo zadržati naš klasični pojmovni okvir za opisivanje eksperimentalnih ishoda nekome drugom, za razliku od uspostavljanja jedne teorije, čini se prihvatljivim). No, u trenutku kada je to Bohr formulirao, to je značilo opisivati kvantne pojave vokabularom koji ima onaj kapacitet značenja koji se u fizici koristio sredinom 19. stoljeća.

Ontologija u Bohrovu 'holističku' sliku ne ulazi s posebno detaljnom artikulacijom međurečeničnih veza koje su podvrgnute čvrstoj semantičkoj disciplini argumentiranja (iako, u principu, povlači provjerljive posljedice iz hipoteza), jer čim zaobidemo najtrivijalnije i artifičijalne primjere teorije, logičke veze između iskaza ovise o onome što govore o entitetima čije postojanje je izraženo samom teorijom.

Ovo se tiče problema kojeg je i Carnap [4] bio svijestan. Nemogućnost opravdanja adekvatnosti jednostavnih mjerenja u empirijskim terminima ima lošu posljedicu: Naime, *sva* mjerenja u znanosti (bez obzira koliko 'jednostavna' bila), uključuju ne-empirijske pretpostavke o danim fizikalnim relacijama (ili operacijama), pretpostavke koje se ne mogu reducirati na veličine koje motrimo. Ovakva 'teorija mjerenja' ne ograničava 'činjenični' uvoz znanstvenih teorija na motreni svijet kao cijelinu.

Premda, ukoliko bismo se odlučili za EPR interpretaciju, zbog činjenice da izbjegava Bohrovo ograničenje i gotovo protuintuitivnu pretpostavku nelokalnosti, imamo tehnički još problema sa svakodnevnim jezikom, zbog toga što svaki pokušaj objašnjavanja KM običnim jezikom pretpostavlja kompatibilizam s principom lokalnosti.

S druge strane, udaljavanje od principa lokalnosti stvara još veće probleme, čime se ponovo vraćamo pitanju revizije jezika i promišljanje metafizike. Iako

²⁷Valja pritom uočiti da su premise (i)-(iii) potvrđene sa strane atomske fizike (uzmемо li za primjer kompleksnih predmeta atom ili molekulu), te bi se s njima vjerojatno usuglasila većina znanstvenika.

je Bohrov program u velikoj mjeri logički precizan (i lijepi primjer upravljanja semantičkim tehnikacijama), problem mjerenja upravo proizlazi iz činjenice što referiramo na mikro-svijet klasičnim (Bohrovim) riječnikom. No, vratimo se sada pitanju revizije jezika koje je (velikim djelom) potaknuto Bohrovim ograničenjem.

Hacking [14] zasigurno tjera vodu od Bohrovog mlina tvrdnjom da prijelazom s jedne teorije (u ovom slučaju fizikalne), na drugu, pojmovi takvi kakvi jesu trpe drastičnu promjenu u značenju i implikacijama.²⁸ Hughes [17], sukladno tome smatra da bi se od Bohrovog shvaćanja adekvatnog jezika mogli udaljiti ukoliko bismo zahtijevali i manje drastične mjere, implicirajući prihvaćanje svakodnevnog jezika, premda nam ostaje otvorena mogućnost revizije određenih termina (čime nismo prinuđeni na *dodatno* ograničenje naše metafizike):

Bez [ikakve] nedosljednosti, no s posve visokom uvjerljivošću, mogli bi tvrditi: (i) da znati što termin znači, uz ostale stvari, jest znati eksperimentalne kontekste u kojima bi njihova upotreba bila prigodna, (ii) da u nekoj mjeri postoji očuvanje značenja između teorija i da (iii) nove teorije, i donose nove pojmove u fiziku i modificiraju značenje onih pojmova koje smo zadržali.

Pitanju o adekvatnosti običnog jezika u aplikaciji na znanstvene teorije nije jednostavno dati odgovor. Jezik nije monolitična praksa o kojoj se može lako filozofirati. Nova znanstvena teorija nedvojbeno nas tjera na promišljanje o jeziku kao i društvenoj praksi (u žargonu kasnog Wittgensteina), kao i o znanstvenom alatu. U Carnapovim [5] terminima: logiku znanosti trebamo zamijeniti sintaksom jezika znanosti. No, glavno je pitanje hoće li nam takav jezik pomoći razumjeti nove fenomene koje bi mogli kasnije stavljati u okvir naših klasičnih predodžbi?

Upravo je zbog toga i Dummett [7] uočio kako se značenje ne može shvatiti kao puko posjedovanje istinitosnih vrijednosti koje odlučno 'lijepimo' na iskaze neovisno o našem znanju. Izgleda kako su zahtjevi koje postavlja KM ugrađeni u našem pokušaju razumijevanja te teorije. Teško je zaobići ovakav stav zbog same činjenice linearnosti tranzicija stanja u teoriji, te zbog načina na koji je predočeno sjedinjenje između interaktivnih sustava u KM.

Ovo je vrlo duboko i nevjerojatno teško, pitanje teorije značenja, ono za koje nije izgledno da ćemo dati odgovor dok nećemo imati oštroumnijeg uvida u to na koji način naš jezik funkcionira (u sadašnjem slučaju, u matematičkim i kvantno-mehaničkim sektorima jezika) nego što sada imamo. Ali to je pitanje koje je nedvojbeno filozofijsko po naravi; ono čijem se odgovoru ne možemo nadati u jednom smislu, niti jednim matematičkim otkrićem, u drugom, niti otkrićem u kvantnoj mehanici.²⁹

²⁸Primjerice, dovoljno je samo sjetiti se kako je zamjena Euklidske geometrije za Riemannovsku uključivala promjenu u ekstenziji termina 'ravna crta'.

²⁹Ovdje, na žalost, nećemo dublje ulaziti u analizu Dummettove teze, jer bi se rasprava mogla nekontrolirano proširiti, (a i već sam, vjerujem, dovoljno iskoristio čitateljevo vrijeme). Ono što ovaj citat prikazuje je ozbiljnost koju Dummett pridaje problemu značenja u odnosu na KM. Kao posljednju riječ, iskoristio bih ovu priliku da se zahvalim Sandru Skansiju, Marku

Literatura

- [1] Albert, D. 1992. *Quantum Mechanics and Experience*. Cambridge: Harvard University Press.
- [2] Bohm, D. 1957. *Causality and Chance in Modern Physics*. University of Pennsylvania Press Philadelphia.
- [3] Bohr, N. 1935. Can Quantum Mechanical Description of Reality Be Considered Complete? *Physical Review* 48: 696-702.
- [4] Carnap, R. 1966. *Philosophical Foundations of Physics*, Gardner M. (ed.), Basic Books, New York.
- [5] — 2002. *The Logical Syntax of Language*. Open Court, Chicago and La Salle, Illinois.
- [6] Domazet, M. 2004. Bohrova filozofija i izmjene temelja fizikalnog jezika. *Prolegomena* 2: 135-149.
- [7] Dummett, M. 1978. Is Logic Empirical? u: *Truth and Other Enigmas*. Cambridge: Harvard University Press.
- [8] — 1979. Common Sense and Physics u: G. F. Macdonald (ed.): *Perception and Identity: Essays presented to A. J. Ayer*. London: Macmillan [pretisak u Dummett 1993.: 376-419].
- [9] — 1993. *The Seas of Language* Oxford: Calderon Press.
- [10] Einstein, A. 1948. Quantum Mechanics and Reality. *Dialectica* 2: 320-324.
- [11] Einstein, A., Podolsky, B. and Rosen, N. 1935. Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review* 47: 777-780.
- [12] Everett, H. 1957. 'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics. *Reviews of Modern Physics* 29: 454-462 [Pretisak u: Wheeler and Zurek 1983: 315-323.]
- [13] Garola, C. and S. Sozzo 2004. A Semantic Approach to the Completeness Problem in Quantum Mechanics. *Foundations of Physics* 8: 1249-1266.
- [14] Hacking, I. 1983. *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [15] Harrison, J. 1983. Against Quantum Logic. *Analysis* 43: 82-85.

Firstu i profesoru Stipi Kutleši na iznimno korisnim savjetima na ranijim verzijama ovog rada. Odgovornost za nedostatke ovog rada je moja. Profesorima Garoli i Sozzi se zahvaljujem što su se odazvali na poziv i poslali mi e-print svojeg teksta.

- [16] Heisenberg, W. 1927. Über den anschaulichen Inhalt den quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik* 43: 172-198. [Engleski prijevod dostupan u: Wheeler and Zurek 1983: 62-84.]
- [17] Hughes, R. I. G. 1989. *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*. Cambridge: Harvard University Press.
- [18] Kochen, S. 1978. *The Interpretation of Quantum Mechanics*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- [19] Kochen, S and E. P. Specker, 1967. The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics. *Journal of Mathematics and Mechanics* 17: 59-87.
- [20] Petersen, A. 1963. The Philosophy of Niels Bohr. *Bulletin of Atomic Scientists*, September 1963: 8-14.
- [21] Putnam, H. 1991. *Realism With a Human Face*. Cambridge: Harvard University Press.
- [22] Quine, W. V. 1951. Two Dogmas of Empiricism u: *From a Logical Point of View*. Cambridge: University Press.
- [23] — 1961. On What There Is u: *From a Logical Point of View*. Cambridge: Harvard University Press.
- [24] — 1970. *Philosophy of Logic*. Cambridge: Harvard University Press.
- [25] Schroedinger, E. 1935. Die gegenwertige Situation in der Quantenmechanik. *Naturwissenschaften* 22: 807-812. [Engleski prijevod dostupan u: Wheeler and Zurek, 1983: 152-167.]
- [26] Sklar, L. 1981. Time, Reality and Relativity u: R. Healey (ed.): *Reduction, Time and Reality* Cambridge: Cambridge University Press. [Pretisak u: P. Yourgrau (ed.) 1990: 247-260.]
- [27] Wheeler, J. A., and W. H. Zurek, 1983. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- [28] Yourgrau, P. 1990. *Demonstratives*. Oxford: Oxford University Press.
- [29] Žarnić, B. 2005. *U perspektivi dinamične semantike*. Hrvatsko filozofsko društvo.