ANαliZA

časopis za kritično misel

Letnik 13, številka 4, december 2009 · ISSN 1408-2969

KOZMOLOGIJA IN ZNANOST

Sašo Dolenc

Eksperimentalna metafizika in informacijska interpretacija kvantne fizike

Filozofska fakulteta Univerze v Ljubljani

Citiranje: Sašo Dolenc, »Eksperimentalna metafizika in informacijska interpretacija kvantne fizike«, *Analiza: časopis za kritično misel* 13, št. 4 (2009): 29–39.

To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva 4.0 Mednarodna (CC BY 4.0), https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.sl.

Izdajatelj: Društvo za analitično filozofijo in filozofijo znanosti, Ljubljana.

Elektronska različica je izvirna tiskarska datoteka številke, ki ji je bil leta 2026 dodan ta naslovni list. Strani in prelomi ustrezajo tiskani izdaji.

Sašo Dolenc
Filozofska fakulteta Univerze v Ljubljani

Eksperimentalna metafizika in informacijska interpretacija kvantne fizike

V članku obravnavamo filozofske implikacije sodobne kvantne informacijske teorije. Izhajamo iz razlike med kvantno in klasično informacijo, ki nam služi za premislek nekaterih temeljnih epistemoloških in ontoloških vprašanj, povezanih s sodobno znanostjo.

Ključne besede: filozofija znanosti, kvantna fizika, informacijska teorija, kubit.

V jedru kvantne fizike je že od samega začetka zagata, ki je nikakor ni mogoče povsem odpraviti. Mnogih eksperimentov s področja kvantnega sveta se namreč nikakor ne da povezati v enotno, celovito in razumljivo sliko, ki bi nam nazorno povedala, kaj se dejansko dogaja v mikrosvetu. Bolj natančnih formulacij, kaj je dejansko tista kost, ki se vsakič zatakne v grlu, je sicer veliko. A najbolj splošno rečeno je problem v tem, da ni mogoče zgraditi jasnega realističnega modela sveta, ki bi bil skladen z vsemi eksperimenti.

Informacijska interpretacija kvantne fizike

Avstrijski fizik Anton Zeilinger je prepričan, da potrebuje tudi kvantna fizika jasno formulirano temeljno načelo, ki bi povzelo njeno bistvo. Podobno kot so osnovna načela teorije relativnosti zelo poenostavljeno rečeno, da nič ne more potovati hitreje kot svetloba in da so zakoni narave enaki za vse opazovalce, potrebuje nekaj enako preprostega, razumljivega in univerzalnega tudi kvantna fizika.

Zeilinger predlaga, da bi temeljno idejo kvantne fizike zaobjeli v načelu, da lahko iz elementarnega kvantnega sistema iztisnemo le en bit informacije. (Zeilinger, 1999) Iz najbolj preprostega kvantnega sistema, kot je sploh mogoč, lahko z eksperimentom oziroma meritvijo razberemo le en bit informacije oziroma si odgovorimo zgolj na eno vprašanje, nato pa so vse nadaljnje meritve stanja elementarnega sistema povsem naključne. Ko iz elementarnega kvantnega sistema pridobimo en bit informacije, so vse nadaljnje meritve sistema objektivno naključne oziroma ne nosijo več nobene informacije o stanju tega

elementarnega sistema, s katerimi bi lahko bolj natančno določili njegove lastnosti. Elementarni sistem lahko torej nosi le en bit informacije.

Zeilinger poskuša bistvo kvantne fizike povezati s kvantizacijo oziroma atomizacijo same informacije. Atomizacija informacije je povezana tudi z atomizacijo samih nosilcev informacije, zato vidijo nekateri v ideji vzporednico z Russellovo teorijo logičnega atomizma:

> »Temeljno načelo, ki ga predlaga Zeilinger, je na nek način podobno logičnemu atomizmu, ki ga je vpeljal Bertrand Russell, vendar brez Russellove predpostavke, da je vse fizično na koncu zgrajeno iz materije.« (Jaeger, 2009: 236)

A pred iskanjem sorodnih idej je ključno, da si zastavimo vprašanje, kaj v tem kontekstu sploh je informacija in kaj je elementarni sistem. Kot povzame Zeilinger, ni informacija nič drugega kot odgovor na zastavljeno vprašanje. Bit je enota za količino informacije in predstavlja najmanjšo informacijo, ki še lahko nekaj pomeni. En bit je, denimo, velika tudi informacija, ali je neka trditev resnična. Lahko bi rekli tudi, da je bit količina informacije, ki se skriva v odgovoru na vprašanje, ki ima le dva mogoča odgovora: da in ne. V informacijski praksi en bit informacije preprosto predstavimo s pristnostjo ali odsotnostjo signala: vklopljeno ali izklopljeno lučko, magnetizacijo na delčku trdega diska, vdolbinico na površini zgoščenke.

Ko Zeilinger razmišlja o informaciji v kvantnem svetu, si zastavi tudi vprašanje, kakšna je povezava med fizično velikostjo nekega sistema in količino informacij, ki jih ta lahko nosi. Dvakrat manjši sistem lahko verjetno nosi le dvakrat manj informacij. In če neki sistem vedno znova delimo na polovico, prej ali slej trčimo ob mejo, ko lahko naš mali sistem nosi le eno samo informacijo; le en sam bit informacije. Tako je Zeilinger opredelil elementarni sistem kot nosilec enega samega bita informacije.

Ko pridemo do posameznih nosilcev informacije, za katere veljajo pravila kvantnega sveta, se začnejo pojavljati težave:

> »Kaj se zgodi, ko, denimo, svetlobni vir oslabimo do te mere, da je prenašalec v končni obliki le en kvant svetlobe oziroma en foton? Kaj lahko pričakujemo, ko preklop tranzistorja povzroči že en sam elektron? V kvantni informacijski znanosti se za nosilce informacij uporabljajo kvantni objekti ... Čeprav sta za klasični bit dovoljeni le dve možnosti ’0’ in ’1’, je lahko kvantni sistem tudi v kateremkoli stanju, ki je superpozicija teh dveh osnovnih stanj ... Vrednost takšnega bita je torej kvantnomehansko nedoločena. Opazovanje bo kot rezultat pokazalo eno od obeh vrednosti z določeno verjetnostjo. Ne pomeni takšna nedoločenost izgube informacije?« (Weinfurter, 2006: 146)

Za elementaren nosilec kvantne informacije se je uveljavil izraz kvantni bit ali skrajšano kubit [qubit]. Kubit je osnovni nosilec kvantne informacije oziroma

atom kvantnega pomena. Kubit predstavlja bit v kvantni superpoziciji in je nekakšna kvantna verzija klasičnega bita. Če lahko bit nosi le eno informacijo oziroma en atom pomena v smislu razlike da/ne, 0/1, je kubit bistveno bolj bogat. Kubit je lahko tudi v superpoziciji obeh klasičnih vrednosti bita 0 in 1.

Po Zeilingerju izvirajo težave s kvantno fiziko iz tega, da je informacija kvantizirana. O svetu ne moremo pridobiti manj kot enega bita informacije. To je absolutni minimum, ki hkrati pomeni, da je resolucija samega sveta omejena z enim bitom informacije. Iz enega kubita lahko preberemo le en bit informacije. Kubit lahko odgovori le na eno samo vprašanje. Če ga v obliki nadaljnjih eksperimentov sprašujemo še naprej, bo odgovarjal neumnosti oziroma bodo odgovori objektivno naključni, kot temu pravi Zeilinger.

Zeillinger nato svojo idejo razvija še naprej in poskuša najti nekakšno metafizično poanto oziroma bolj splošno načelo, ki ga sporoča kvantna fizika:

> »Kaj je torej sporočilo kvantov? Predlagam, da pogledamo na vse skupaj z novega zornega kota. Iz zgodovine fizike smo se naučili, da ni dobro delati delitev, ki niso osnovane – kot so pred Newtonom razlikovali med zakoni na Zemlji in zakoni, ki usmerjajo gibanja nebesnih teles. Na podoben način predlagam, da ne moremo narediti razlike med realnostjo in našim poznavanjem realnosti, med realnostjo in informacijo. Na realnost se ni mogoče naslavljati, ne da bi uporabili informacijo, ki jo imamo o njej.« (Zeilinger, 2005)

Tako kot temelji posebna teorija relativnosti na nezmožnosti razločevanja med inercialnimi opazovalci (načelo relativnosti) in splošna teorija relativnosti na nezmožnosti razlikovanja med gravitacijo in pospeševanjem (načelo ekvivalentnosti), tako naj bi kvantna teorija temeljila na nezmožnosti razlikovanja med resničnim svetom in informacijo o njem: »Naravni zakoni ne smejo ločiti med resničnostjo in informacijo.« (Zeilinger, 2005: 164)

Klasična in kvantna informacija

Ko Zeilinger govori o informaciji, ima v mislih klasično informacijo, ki jo lahko shranimo v bitih. Težava, na katero naletimo ob poskusih interpretacije njegove »metafizične« poante kvantne fizike, pa je, da ne omenja danes že ustaljene oblike razlikovanja med klasično in kvantno informacijo.

Klasično informacijo lahko zapišemo v obliki bitov in njena najpomembnejša značilnost je, da jo lahko podvajamo oziroma kopiramo. Klasična informacija je neodvisna od svojega materialnega nosilca. Brez težav jo preberemo in zapišemo na drug nosilec. Informacije se med prepisovanjem ne spremeni. V domeni klasične informacije je kopija povsem enaka originalu in tudi originalu se nikjer ne pozna, da smo informacijo prebrali.

Za kvantno informacijo pa veljajo povsem drugačna pravila. Kvantne informacije ne moremo kopirati (klonirati), ne da bi jo pri tem spremenili. Prav tako kvantne informacije ne moremo uničiti oziroma izbrisati, lahko pa jo teleportiramo, kar z drugimi besedami pomeni, da jo na daljavo prestavimo iz enega kraja na drugi. »Kvantna teleportacija omogoča prenos kvantnih lastnosti in rekonstrukcijo kvantnega objekta na oddaljenem kraju.« (Weinfurter, 2006: 166) S pomočjo kvantne informacije lahko tudi bistveno izboljšamo kriptografske metode, saj lahko zaznamo, če nam je kdo slučajno prisluškoval. »Kvantna kriptografija je prvi način, kako sporočanje naredimo absolutno varno.« (ravno tam)

Kot smo že omenili, se je za temeljno enoto kvantne informacije prijelo ime kvantni bit ali kubit. Kubit nikoli nima hkrati določenih svojih kinematičnih in dinamičnih lastnosti. Njegovo kvantno stanje, ki ga opisuje valovna funkcija, je lahko tudi v stanju, ki ga predstavlja superpozicija osnovnih stanj 0 in 1. Kubit je hkrati enota kvantne informacije in najmanjši kvantni sistem, ki še lahko nosi informacijo. In prav v tem pomenu bi lahko razumeli Zeilingerjevo načelo, da med informacijo in realnostjo ni razlike. Med kubitom kot nosilcem informacije in kubitom kot enoto kvantne informacije ne more biti razlike. Velika in pomembna razlika pa je med klasično in kvantno informacijo.

Morda to ujemanje najbolj nazorno ilustrira primer kvantnega računalnika. Značilnost kvantnih računalnikov, ki temeljijo prav na manipuliranju kubitov, je, da jih sploh ne moremo razločiti od resničnega sveta. Med simulacijo procesa na kvantnem računalniku in samim procesom v resničnem svetu ni razlike. To pomeni tudi, da je vesolje kvantni računalnik, ki računa svoj lastni razvoj v času: »Simulacija vesolja na kvantnem računalniku je nerazločljiva od samega vesolja.« (Lloyd, 2007: 154) Med kvantnim računalnikom in resničnim svetom ni razlike, in v tem smislu razumemo tudi Zeilingerjevo načelo, da ni razlike med informacijo in dejanskostjo.

Vendar pa s takšno interpretacijo v resnici ničesar nismo pojasnili. Vse težave z interpretacijo kvantne fizike smo prevedli na odnos med kvantno in klasično informacijo. Ravno ta odnos med kubitom in bitom, med kvantnim sistemom in meritvijo njegovega stanja, med valovno funkcijo in njenim sesutjem, med kvantno superpozicijo in odsotnostjo njene makroskopske implementacije (primer Schrödingerjeve mačke) je tista osrednja neodpravljiva težava, na katero vedno znova naletimo, če se še tako trudimo, da bi se ji nekako izognili.

Problem substancialnosti

Videli smo, da na področju kvantne informacije bistveno zbledi razlika med nosilcem informacije in samo informacijo, ki je na nosilec zapisana. Za zapis kubita imamo sicer več možnosti (polarizacija fotona in podobno), vendar je kvantna informacija skorajda nerazločljiva od njenega nosilca. Za kvantne sisteme je namreč značilno, da niso individui. Dva enaka kvantna sistema ni mogoče razločiti. Sta povsem enaka. Kvantnega sistema tudi nikakor ni mogoče kako označiti in mu slediti skozi čas. Elementarni kvantni nosilec informacije

namreč ne poseduje dodatnih lastnosti poleg teh, ki jih ima sam kubit, oziroma kvantna informacija, ki jo nosi. Na področju kvantne informacije ni razlike med vednostjo, ki jo prenaša posamezni kvantni nosilec informacije, in samo informacijo, ki jo imamo o njem samem kot nosilcu.

Vsa informacija o elementarnem kvantnem sistemu, ki je nosilec atoma kvantne informacije, je že shranjena v kubitu. Kvantni sistem je informacijsko izolirana enota. Ker pa je kvantna informacija po svojem bistvu drugačna od klasične, nastopijo težave, ko poskušamo na kvantni nivo aplicirati kategorije mišljenja, ki so v svojem bistvu klasične.

Zaradi nezmožnosti razločevanja med informacijo in nosilcem informacije na nivoju kvantnega sveta, nastopijo težave tudi z aplikacijo splošnih kategorij, kot je, recimo, substanca, na kvantne sisteme. S pojmom substance tradicionalno označujemo tisto, kar nosi lastnosti objekta. Substanc je lahko veliko (Aristotel) ali pa je samo ena (Spinoza), odvisno od zasnove posamezne metafizike. Težava pri kvantnem svetu pa je, da informacija sovpade z njenim nosilcem. Atributi oziroma lastnosti elementarnega kvantnega sistema, ki jih povzema kubit, so hkrati že vse, kar lahko o tem sistemu vemo. Dodatna težava je tudi, da še teh lastnosti ne moremo poznati natančno. »Posebnost kvantne teorije je, da čisto kvantno stanje natančno določa vrednosti samo polovice fizičnih lastnosti sistema, ki ga opisuje.« (Jaeger, 2009: 1)

Značilnost posamezne substance je tudi, da je neodvisna od drugih substanc, kar v kvantnem svetu ne velja. Kubit lahko sestavimo tudi v obliki dveh prostorsko ločenih, a kvantno povezanih delcev. V jeziku kvantne informacijske teorije imenujejo tako oblikovan par delcev, ki skupaj nosita le en kubit kvantne informacije, ebit. To je ime za osnovno kvantno enoto prepletenega kvantnega stanja [entanglement].

Obstoj ebitov oziroma nelokalnih kubitov predstavlja za razumevanje kvantne fizike še dodatno težavo, saj so po načelu, da ne moremo razlikovati med nosilci kvantne informacije in samo kvantno informacijo, tudi sami nosilci informacije nelokalni oziroma so lahko njihove lastnosti odvisne tudi od zelo oddaljenih delcev, s katerimi so kvantno prepleteni. Podobno kot posamezni kubit sta tudi dva kvantno prepletena delca nekakšna monada, saj ju skupaj opisuje le en sam kubit informacije.

Problem realnosti kvantnega sveta

V razpravah teoretikov kvantne fizike je problematika substancialnosti kvantnih objektov obravnavana v okviru razprave o realizmu. Razčiščevanje bistva zagate s kvantno mehaniko se je na osnovi Einsteinovih sugestij v letih pred drugo svetovno vojno preusmerilo na problem nelokalnosti. Einstein je bil namreč prepričan, da bo prav z dokazom, da kvantna fizika ni hkrati lokalna in realistična teorija, pokazal, da v njeni formulaciji nekaj manjka, da teorija ni popolna.

Realizem lahko najbolj preprosto definiramo kot dejstvo, da meritve razkrivajo lastnosti sveta, ki obstoji tudi neodvisno od same meritve. Z drugimi besedami, kvantni delec sam zase zmeraj že ve, kako se bo vedel ob določeni meritvi, čeprav mi tega ne vemo. Delec obstaja z svojimi lastnostmi neodvisno od meritve oziroma opazovanja. Lokalnost pa pomeni, da rezultat meritve na nekem kraju v določenem trenutku ne more biti odvisen od hkratnega dogajanja nekje daleč stran od kraja meritve.

Ključni dogodek, ki je pripomogel k pomembnemu napredku pri razumevanju bistva kvantnega sveta, je bila ugotovitev Johna Bella, da lahko za vse fizikalne teorije, za katere velja predpostavka realizma in lokalnosti, napove rezultate eksperimentov, ki so drugačni, kot jih napove kvantna fizika. Tako se je vzpostavila možnost, da eksperimentalno razločimo med teorijami, ki so lokalno realistične, in vsemi drugimi, med katere spada tudi kvantna fizika.

Prepričljivo je bilo takšen eksperiment težko izvesti, zato je trajalo kar nekaj časa, da je večina fizikov začela verjeti rezultatom poskusov, ki so preverjali Bellovo neenakost. Danes so vsi ugovori oziroma eksperimentalne luknje, ki bi še nekako omogočale drugačno interpretacijo poskusov, zaprte, vendar za zdaj le posamično, ne pa tudi vse naenkrat. Vseeno pa je skorajda nemogoče, da bi izvedba eksperimenta, v katerem bi bilo hkrati poskrbljeno za vse možne ugovore hkrati, dala kak drugačen rezultat kot to, da je Bellova neenakost kršena.

Iz rezultatov eksperimentov na osnovi Bellove neenačbe lahko sklepamo, da za kvantni svet ne velja hkratna predpostavka lokalnosti in realizma. A sama Bellova neenačba ne pove nič o tem, kateri od obeh predpostavk se moramo odpovedati oziroma ali se moramo morda odpovedati kar obema.

V tej zvezi je zanimivo delo ameriškega nobelovca za fiziko Anthonyja Leggetta, ki se med drugim ukvarja tudi s problemi temeljev kvantne fizike. Leta 2003 je v tradiciji Bellove neenakosti prišel do nove ugotovitve, s katero bi lahko eksperimentalno razločili med možnimi nelokalnimi realističnimi teorijami in napovedmi kvantne fizike. Pokazal je, da lahko iz predpostavke nelokalnosti in realizma izpelje napoved za rezultat eksperimenta, ki se razlikuje od napovedi kvantne fizike. To pomeni, da bi z eksperimentalno potrditvijo, da ima prav kvantna fizika in ne nelokalne realistične teorije, dokončno izločili idejo realizma iz možnih opcij za interpretacijo kvantnega sveta. Prvi rezultati eksperimentov, s katerimi poskušajo realizirati Leggettov predlog, so že pokazali, da veljajo tudi v tem primeru napovedi kvantne fizike.

> »Na osnovi teh eksperimentov sta jasni dve zadevi. Kot prvo je še prezgodaj, da bi se povsem odpovedati lokalnosti. Kot drugo pa se lahko odpovemo vsaj konceptu naivnega realizma, po katerem imajo delci določene lastnosti (v našem primeru polarizacijo), neodvisno od opazovanja.« (Zeilinger in Aspelmeyer, 2008: 27)

Prav za takšna in podobna eksperimentalna preverjanja realizma in podobnih splošnih značilnosti, ki se nanašajo na samo bistvo realnosti, se je začelo uporabljati poimenovanje »eksperimentalna metafizika«.

Postmodernistična epistemologija pri kvantnih fizikih

Filozofinja in zgodovinarka znanosti Mara Beller, ki se je veliko ukvarjala prav z obdobjem nastajanja kvantne mehanike, je v odmevnem članku o razvpiti Sokalovi potegavščini predstavila nekaj zapisov očetov kvantne fizike, ki bi jih prav lahko napisali tudi kak »postmodernistični« filozofi. (Beller, 1998) V nasprotju s Sokalovo poanto, da naj bi nekatere veje sodobne filozofije izgubile stik z realnostjo in zagovarjale subjektivistične pozicije glede obstoja objektivnega sveta, je sklep Bellerjeve ravno obraten: »Nasprotniki postmodernističnih kulturnih študij znanosti iz Sokalove afere samozavestno sklepajo, da 'cesarji ... nimajo obleke'. A kdo natančno so ti goli cesarji? Komu se pravzaprav smejimo?« (ravno tam) Če si pobliže pogledamo, kaj vse so o kvantni fiziki in njenih »filozofskih implikacijah« zapisali sami fiziki, potem se ob Sokalovi aferi ne bomo več smejali le nekaterim »postmodernističnim« filozofom.

V interpretaciji zgodovine fizike dvajsetega stoletja se po mnenju Bellerjeve neprestano ponavlja nekaj predpostavk, ki nimajo temelja v dejstvih. So nekakšna za nazaj vzpostavljena spontana zgodovina in filozofija znanosti, ki je namenjena predvsem temu, da se sami znanstveniki dobro počutijo in živijo v zmotnem prepričanju, da so nekateri pereči problemi razrešeni, čeprav v resnici niso.

Ena od takšnih napačnih predstavitev zadeva Alberta Einsteina v času njegove polemike o osnovah kvantne fizike z Nielsom Bohrom. Pogosto ga predstavijo kot naivnega realista, ki je prepričan, da mora fizikalna teorija predstavljati nekakšno neposredno sliko realnosti. Bellerjeva dokazuje, da je bila takšna ideja realnosti Einsteinu povsem tuja:

> »Einstein se je popolnoma zavedal, da se nam svet ne prikazuje dvakrat: najprej takšen, kakršen je, nato pa še takšen, kot je opisan v znanstveni teoriji, da bi lahko primerjali teoretično 'kopijo' s 'stvarjo samo'. Dostop do sveta imamo le enkrat in to skozi naše najbolje znanstvene teorije. Zato se je Einsteinu zdelo nujno, da koncept objektivne realnosti utemelji v invariantnih lastnostih naših najboljših znanstvenih teorij.
>
> Utemeljitelji kvantne mehanike – Bohr, Born, Pauli in Heisenberg – so napačno predstavljali in se posmehovali Einsteinovemu 'naivnemu' prepričanju v objektivno in od opazovalca neodvisno realnost. Za Bohrovo načelo komplementarnosti so trdil, da neizogibno implicira, da ni več mogoče zgraditi enotne, objektivne, od opazovalca neodvisne predstave fizikalne realnosti.« (ravno tam)

Očetje kvantne fizike so se zelo sproščeno poigravali z razmisleki o ukinitvi ideje objektivne realnosti, kar je bila Einsteinova glavna kritika. Bellerjeva namiguje, da je prav ta pretirana lahkotnost opuščanja ideje objektivne realnosti pri kvantnih fizikih dodatno podžgala kasnejši razcvet postmodernistične

epistemologije. »Ko je Sokal v svojem članku za Social Text zapisal, da Bohrovo 'nakazovanje postmodernistične epistemologije nikakor ni slučajno', je imel bolj prav, kot je mislil, da ima.« (ravno tam)

Po mnenju Bellerjeve »filozofske izjave Bohra in drugih utemeljiteljev kvantne fizike niso le anahronistična posebnost«. (ravno tam) Zato si velja najprej malo bolj natančno pogledati zgodovino problemov razumevanjem tega, kaj sploh je realnost na nivoju atomov.

Zgodovina kvantne informacije

Sredi dvajsetih let dvajsetega stoletja so bili takratni fiziki soočeni z zahtevno nalogo. Nova kvantna mehanika, kot so poimenovali teorijo, ki je znala zelo dobro napovedati rezultate poskusov z atomi, je na ravni matematičnega formalizma odlično delovala, nikakor pa se na njeni osnovi ni dalo zgraditi primernega modela realnosti oziroma predstave tega, kaj se v svetu atomov dejansko dogaja.

Werner Heisenberg je zato svojo matrično mehaniko, ki je bila matematično jedro nove teorije, interpretiral le kot nekakšen računski pripomoček, ki ne pove nič konkretnega o resničnih atomih. Enačbe so bile zanj le nekakšen inštrument, ki mu je omogočal napoved rezultata eksperimentov. Njegov pristop je bil skrajno empiristično, saj se je zavestno omejil le na tisto, kar je dejansko lahko izmeril.

Vendar drugi fiziki s takšnim skrajno empirističnim oziroma instrumentalističnim pristopom niso bili zadovoljni. Albert Einstein, ki se je pri svoji teoriji relativnosti podobno omejil le na tisto, kar je lahko dejansko izmeril o prostoru in času, je Heisenbergovem pristopu nasprotoval. Njegov ugovor je temeljil predvsem na kritiki empirizma, po kateri se je nemogoče povsem omejiti le na neproblematično neposredno izkustvo in izhajati iz takšne vednosti. Po Einsteinu smo vedno že ujeti v nekakšno interpretacijo realnosti, zato smo vedno že prisiljeni uporabljati določeno znanstveno teorijo, da sploh lahko odčitamo rezultate eksperimentov.

> »Z načelnega stališča pa je čisto napačno, če hočemo kako teorijo utemeljiti samo na količinah, ki se dajo opazovati. V resnici je namreč ravno nasprotno. Šele teorija odloča o tem, kaj se da opazovati ... Samo teorija, se pravi poznavanje naravnih zakonitosti, nam torej dopušča, da s čutnega vtisa sklepamo na dogodek, iz katerega vtis izvira.« (Heisenberg, 1977: 78)

Sočasno je Erwin Schrödinger razvijal svojo različico kvantne fizike, ki je temeljila na valovnih funkcijah. Te so kar klicale k bolj realistični interpretaciji, kot je bila, denimo, Heisenbergova matrična mehanika, a se žal tudi tokrat ni izšlo. Valovne funkcije namreč obstajajo v abstraktnem matematičnem in ne

konkretnem fizičnem prostoru, zato jih zelo težko interpretiramo kot dejansko obstoječe entitete, kot si je prizadeval Schrödinger.

Pristop Nielsa Bohra k poskusu razumevanja kvantne fizike ne izhaja, tako kot pri Heisenbergu, iz tradicije pozitivizma, ampak prej iz pragmatizma. Kaj lahko vemo, je določeno s tem, kar lahko preko eksperimentov in opazovanj izmerimo. Za Bohra lahko izvajamo poskuse zmeraj le v podobi vsakdanjega sveta, ki je sicer blizu tega, kar pravi klasična fizika, a to v resnici ni bistveno. Laboratorijsko izkustvo je določeno s samo naravo človeka oziroma z njegovimi kognitivnimi, zaznavnimi in predstavnimi zmožnostmi. Govoriti o tistem, česar se v principu ne da izmeriti, je za Bohra nesmiselno. Izmerimo lahko seveda tisto, kar je moč izmeriti z inštrumenti, ki jih imamo na voljo. Kvantna fizika je tako zanj nekakšen model splošnega dojemanja sveta.

Einstein je, kot smo videli, zagovarjal tezo, da smo zmeraj že ujeti v neko znanstveno teorijo. Da jim lahko zaupamo opazovanje, jih moramo nujno interpretirati skozi določeno teorijo. Bohr pa je nasprotno dojemal vsakdanji svet drugače kot Einstein. Po Bohru nam je vsakdanji svet neposredno dan, zato za njegovo razumevanje ne potrebujemo nobene teorije. Einstein pa je nasprotno zagovarjal stališče, da teorije ne moremo zgraditi le iz neposredno opazljivih količin, ker so tudi te zmeraj že teoretsko pogojene.

Tu je tudi jedro razlikovanja med Einsteinom in Bohrom. Einstein je verjel, da je objektivnost znanosti metaforično rečeno v tem, da bi tudi marsovci prišli do enakih zaključkov glede zakonov fizike kot mi zemljani. Nasprotno pa Bohr subjektivističnega elementa ni nikoli odpravil iz svoje interpretacije. Zanj je bila znanstvena resnica zmeraj relativna glede na naravo človeške kognicije in spoznavnih zmožnosti.

Klasično kopenhagensko interpretacijo kvantne fizike, ki še najbolj sledi Bohru, bi lahko preprosto povzeli v ugotovitev, da narava operira s kvantno informacijo, mi pa mislimo in svet dojemamo v obliki klasične informacije, zato prihaja do težav.

Običajno »metafizično poanto« kopenhagenske interpretacije kvantne fizike zaobjamejo v sklep, da so ovire, ki se sprva kažejo kot epistemološke, v svojem bistvu pravzaprav ontološke. Kar se zdi, da je problem omejenih možnosti našega opazovanja oziroma merjenja narave, se izkaže, da je ovira tudi za samo naravo. Nevedni nismo le mi, ampak tudi sama narava.

Grobo rečeno, glede interpretacije kvantne fizike imamo dve ključni struji. Po prepričanju prve skupine, ki so jo zagovarjali Einstein, de Broglie in Schrödinger, je jezik realnosti klasična informacija, medtem ko druga skupina (Heisenberg, Bohr in drugi) zagovarja stališče, da je jezik realnosti kvantna informacija. Za prve je bolj resnična klasična informacija, za druge kvantna.

Trenutni trendi na področju kvantnih raziskav gredo v smer vzporednega enakovrednega obravnavanja tako kvantne kot klasične informacije. Iščejo se pravila, kakšni so medsebojni odnosi obeh tipov informacij in kaj praktično lahko vse izvedemo z njunim kombiniranjem. Tako se je že razvilo področje kvantnih računalnikov in kvantne kriptografije, v prvih povojih pa so tudi ideje kvantnega interneta, kvantnih volitev in avkcij, kvantnih internetnih iskalnikov

in podobnih povsem praktičnih aplikacij, ki bi učinkovito izrabljale posebnosti kvantne informacije. (Lloyd, 2009) Za vsa področja je značilno prav to kombiniranje obeh ravni informacije oziroma neke vrste dialektika kvantne in klasične informacije.

Sporočilo kvantov: obstaja objektivna naključnost

Anton Zeilinger je bistveno poanto kvantne revolucije nedavno formuliral tudi v malo drugačni obliki. Bistvo je povzel v ugotovitvi, da obstaja objektivno naključje:

> »Odkritje, da so posamezni dogodki neodpravljivo naključni, je verjetno eno od najpomembnejših odkritij dvajsetega stoletja. Pred tem smo se lahko izgovarjali, da so naključni dogodki samo navidezno naključni, ker o naravi ne vemo dovolj. Kot primer navedimo, da čeprav je Brownovo gibanje delca videti naključno, ga vseeno lahko vzročno opišemo, če le vemo dovolj o gibanju delcev, ki ga obkrožajo. Kot je to formuliral že Werner Heisenberg, je takšno naključje klasičnega dogodka subjektivno. A za posamezne dogodke v kvantni fiziki vzrokov ne le ne poznamo, ampak jih sploh ni. Trenutek, ko radioaktivni atom razpade, ali pot, ki jo foton izbere v napol posrebrenem delivcu žarka, je objektivno naključna. Prav ničesar ni v vesolju, kar bi določalo, kako se bo dogodil posamezni dogodek.« (Zeilinger, 2005)

Zeilinger to popolno odsotnost informacije oziroma objektivno naključje interpretira kot nekaj, kar nosi pozitivno sporočilo.

> »Izid posamezne meritve ostaja zaradi končnosti informacije objektivno naključen. Menim, da je naključnost posameznega dogodka najmočnejši pokazatelj tega, da 'tam zunaj' obstaja od nas neodvisna realnost. Morda bi bila ta ideja navsezadnje všeč tudi Einsteinu.« (ravno tam)

Experimental metaphysics and the informational interpretation of quantum physics

The article addresses the philosophical implications of modern quantum information theory. Some of the fundamental epistemological and ontological questions related to modern science are presented and difference between quantum and classical information is explained.

Keywords: philosophy of science, quantum physics, information theory, qubit.

Literatura

Beller, M. (1998). "The Sokal hoax: At whom are we laughing?." *Physics Today*, 51, št. 9, str. 29–35.

Heisenberg, Werner (1977). *Del in celota: pogovori v območju atomske fizike*. Prevedla Katarina Bogataj-Gradišnik. Celje: Mohorjeva družba.

Jaeger, Gregg (2009). *Entanglement, Information, and the Interpretation of Quantum Mechanics*. Springer.

Lloyd, Seth (2009). "Privacy and the Quantum Internet." *Scientific American Magazine*, oktober, str. 80-84.

Lloyd, Seth (2007). *Programming the Universe: A Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos*. London: Vintage.

Weinfurter, Harold (2006). "Quantum information." V Audretsch, J. (ur.), *Entangled World: The Fascination of Quantum Information and Computation*, Wiley-VCH.

Zeilinger, A., & Aspelmeyer, M. (2008). "A quantum renaissance." *Physics World*, 21, št. 7, str. 22–28.

Zeilinger, Anton (1999). "A foundational principle for quantum mechanics." *Foundations of Physics*, 29, št. 4, str. 631–643.

Zeilinger, Anton (2005). *Einsteinova tančica: novi svet kvantne fizike*. Prevedel Ludvik Jevšenak. Ljubljana: Zavod Republike Slovenije za šolstvo.

Zeilinger, Anton (2005). "The message of the quantum." *Nature*, 438, št. 7069, str. 743.