

Služabnik bogatega trgovca na tržnici sreča Smrt, ki mu s pretečo kretnjo zagrozi. Prestrašen zbeži do trgovca in mu reče: »Gospod, pravkar sem videl Smrt, ki mi je zagrozila. Prosim, reši me.« Trgovec mu odgovori: »Pojdi, vzemi mojega najboljšega konja in zbeži daleč stran v Samaro, kjer boš na varnem.« Trgovec se Smrti ne boji, zato gre tudi on na tržnico in jo vpraša: »Zakaj si zagrozila mojemu služabniku?« Smrt mu odgovori: »Ni sem mu zagrozila, temveč sem s kretnjo izrazila presenečenje, saj se moram z njim srečati nocoj v Samari.«

ANTON RAMŠAK

Ta znana orientalska pripoved odpira vprašanja o vnaprej določeni usodi. Na prvi pogled bi si mislili, da odgovorov na vprašanja iz te tematike ne moremo iskati v temeljni znanosti, kot je fizika. Vendar je zanimivo, da se je z razvojem našega znanja od klasične do kvantne fizike vedno znova odpiralo tudi vprašanje determinizma in svobodne volje, zato se temu tudi v fiziki ne moremo izogniti.

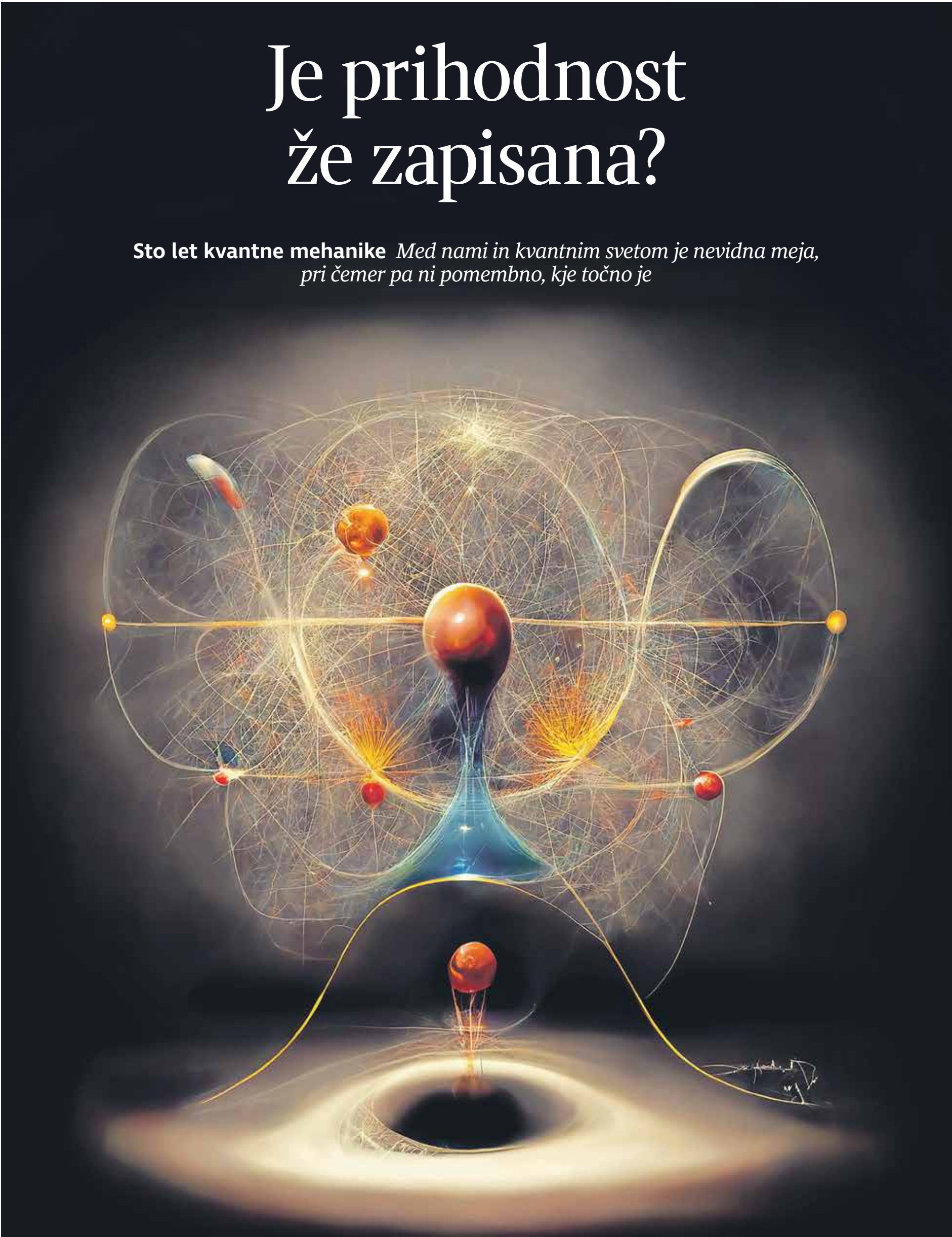
Generalna skupščina Združenih narodov je leto 2025 določila za mednarodno leto kvantne znanosti in tehnologije. Zato smo v zadnjem letu že veliko pisali, s čim se te tehnologije ukvarjajo, katere naprave temeljijo na kvantni mehaniki ter kakšno uporabo in izzive lahko pričakujemo v bližnji prihodnosti. Spomnimo se, da sem sodijo naprave iz prvega obdobja kvantne mehanike, kot so tranzistor, laser, svetleča dioda, fotovoltaika, baterije, tomografija z magnetno resonanco in tudi razlaga lastnosti mnogih materialov, kot sta na primer električna prevodnost in magnetizem.

Fizika vprašanja o neizogibni prihodnosti in s tem povezanim obstoju naše svobodne volje pušča neodgovorjena.

V zadnjem desetletju pa smo priča drugi generaciji naprav, ki so že tu ali pa prihajajo v naš vsakdan in bodo dodatno kvalitativno spremenile tehnologijo. Pri teh napravah je med drugim pomembna kvantna prepletenost, ki jo v kvantni mehaniki poznamo že od vsega začetka, vendar do zdaj še ni našla svojega mesta v uporabi. Naj omenimo predvsem različne senzorje, ki bodo omogočali nesluteno natančnost merjenja, na primer pri avtonomni navigaciji in orientaciji brez satelitske podpore. Tudi v Sloveniji smo že razvili prve kvantne naprave, ki omogočajo pred prisluškovanjem povsem varno komunikacijo. Tretja skupina naprav, katerih uporaba je sicer časovno najbolj odmaknjena, čeprav že obstajajo, so kvantni računalniki in ustrezni kvantni algoritmi. Ti bodo omogočili kompleksne izračune, ki so trenutno povsem zunaj dosega sedanjih superračunalnikov, kot so teoretične napovedi lastnosti povsem novih spojin v zdravih, hitro reševanje zapletenih logističnih problemov ali postavljanje in odpravljanje kriptografskih izzivov. To so le nekateri primeri uporabe, ki jih vidimo že danes, zagotovo pa se bodo pojavili še mnogi drugi.

Opisi sveta

Sto let po tem, ko sta fizika Werner Heisenberg in Erwin Schrödinger izpeljala prve enačbe kvantne mehanike, je primeren mejnik, da jo na kratko predstavimo. Še prej pa se pomudimo pri klasični fiziki, katere temelje je leta 1687 postavil Isaac Newton, ko je predstavil osnovne enačbe, ki se imenujejo po njem. V klasičnem opisu sveta sta najpomembnejši lastnosti delcev njihova lega in hitrost. Če ju v nekem trenutku poznamo za vse delce, lahko iz Newtonovih enačb določimo vse trajektorije, po katerih se bodo, in se do takrat tudi so, gibali posamezni delci. Tega so se zavedali že v 17. stoletju. Radi so primerjali svet z dobro naoljenim urnim mehanizmom, ki teče neodvisno od človeških želja; prihodnost je tako posledično že določena. V naslednjih stoletjih ni bilo vzroka za kakršenkoli dvom o pravilnosti te teorije, saj je bilo končno mogoče povsem natančno opisati gi-



V sto letih se je kvantna mehanika potrdila kot izredno zanesljiva pri razlagi in napovedi različnih eksperimentov, tako da dandanes ni dvomov o njeni pravilnosti in je tako eden od neomajnih stebrov fizike. FOTO SHUTTERSTOCK

banje nebesnih teles in načrtovati vsakdanje mehanske naprave.

Z razvojem novih tehnologij, predvsem temelječih na električnih pojavih, so se v začetku prejšnjega stoletja odprle mnoge nove eksperimentalne možnosti raziskovanja, a so se v klasični fiziki kmalu pokazale prve razpoke. Eden od velikih izzivov klasičnega razumevanja snovi sta bila na primer obstoj in zgradba atomov. Obetaven je bil model atoma, kjer se med seboj električno privlačijo pozitivno jedro in okoli njega krožeči negativni elektroni. Model je bil privlačen tudi zato, ker je klasična mehanika že ponujala rešitve, saj je šlo za nekakšen majhen planetni sistem, s katerim so si fizi-ki v prejšnjih dveh stoletjih nabrali že veliko izkušenj. Newtonova mehanika bi morala omogočiti popolno razlago takšnih sistemov delcev, vendar so nastale težave. Prva je bila stabilnost atomov, saj bi zaradi krožnega gibanja elektroni po teoriji elektromagnetnega polja, ki je takrat že bila uveljavljena, morali neprestano sevati svetlobo. Pri

tem bi izgubljali energijo in bi po vijačnih trajektorijah strmoglavili v jedro, kar pa se ne zgodi. Tudi ni bilo jasno, od kod na primer rdečica svetloba neonskih reklamnih napisov iz tistega časa. Natančne meritve izsevane svetlobe plinov so pokazale značilno mavrico, ki jo sestavljajo samo točno določene barve. Teh barv nikakor ni bilo mogoče pojasniti v okviru znanih enačb in teorije takratnega časa.

Erwin Schrödinger je v članku v začetku leta 1926 predstavil novo enačbo, ki ni temeljila na osnovah klasične fizike, ampak si jo je zamislil z upoštevanjem rezultatov takrat najnovejših eksperimentov z elektroni. Iskal je najenostavnejšo diferencialno enačbo, ki bi elektrone obravnavala kot neko obliko valovanja, pri čemer bi bila valovna dolžina valovanja v zvezi s hitrostjo elektronov in frekvenca valovanja z njihovo energijo. Schrödingerjevo enačbo, kot so jo poimenovali, je uporabil in rezultati so točno reproducirali mavrični spekter vodikar in drugih vodikar podobnih atomov. Skupnosti fizi-

kov je bilo takoj jasno, da novi formalizem vodi v pravo smer, čeprav takrat še ni bilo povsem znano, kaj posamezni elementi rešitve pomenijo. Izkazalo se je na primer, da valovna funkcija, ki je rešitev nove enačbe, nima nikakršne analogije v klasični fiziki.

V naslednjih letih je sledilo mrzlično iskanje interpretacije posameznih rezultatov, ki jih je nudila enačba. Organizirali so več konference in prišli do sklepov, ki so bili za večino sprejemljivi. Za novo teorijo se je uveljavil izraz kvantna mehanika po latinski besedi *quantum*, ki pomeni koliko ali toliko.

Nejevera in navdušenje

Osnovna količina, ki jo obravnava klasična fizika, je lega delca, temeljni rezultat Newtonove enačbe pa je trajektorija delca, se pravi napoved, kje bo delec v prihodnjem času. To se uporablja na vseh področjih tehnične uporabe in že več kot sto let se tudi v šolah pri različnih problemih obravnava vsem znana enačba, ki pravi, da je »sila masa krat pospešek«. Zato je spoznanje, da v formalizmu kvantne mehanike nimamo nobene enačbe, ki bi analogno klasičnemu rezultatu omogočila izračun trajektorije delca, med fiziki sprožilo po eni strani veliko nejevero in po drugi navdušenje nad novim izizvom. Schrödingerjeva enačba namreč sploh ne vsebuje koordinate delca, navidezno se z delcem sploh ne ukvarja. Valovna funkcija, ki je rešitev te enačbe, omogoča izračun verjetnosti, da delec najdemo na nekem mestu, ne da bi tam res bil. V nadaljevanju raziskovanja nove teorije se je pokazalo, da tudi pri meritvah različnih drugih fizikalnih količin kvantna mehanika ne napoveduje izida posamezne meritve, ampak le verjetnost za vsakega od različnih možnih scenarijev, pri

čemer teorija izvora naključnosti ne obravnava.

Kvantna mehanika je že v prvih letih zelo hitro pridobivala privrženca, vendar so nekaj časa nekateri vztrajno dvomili o konsistentnosti teorije. Znan kritik je bil Albert Einstein, ki je postavljal zelo pronicljiva vprašanja; v iskanju odgovorov so se v resnici formulirala pravila ali tako imenovani postulati kvantne mehanike. Takrat je bil København neformalno središče razvoja kvantne fizike, ker so se tam vodilni fiziki zbirali v krogu Nielsa Bohra, ki je že desetletje prej postavil temelje kasnejšega razvoja. Ti postulati predstavljajo najbolj znano tako imenovano kopenhavnsko interpretacijo kvantne mehanike.

V sto letih se je kvantna mehanika potrdila kot izredno zanesljiva pri razlagi in napovedi različnih eksperimentov, tako da dandanes ni dvomov o njeni pravilnosti in je tako eden od neomajnih stebrov fizike. Kljub temu pa se o nekaterih podrobnostih fiziki še niso povsem poenotili. Tako se pomembno vprašanje nanaša na razlago meritve v kvantni mehaniki in z njo povezan kolaps valovne funkcije. Gre za to, da je treba povezati običajni svet, v katerem živimo in izvajamo meritve, katerih rezultate dojemamo s svojimi čutili, s svetom, v katerem vlada kvantna mehanika. V našem svetu imajo delci svoje lastnosti, lego, hitrost itd., v kvantnem teh lastnosti nimajo, dokler ni opravljena meritve. Med meritvijo pa se različne možnosti, za katere sicer kvantna mehanika pravilno izračuna verjetnosti, udejanjijo v eni sami, ki potem predstavlja rezultat meritve. Čeprav je Schrödinger prispeval eno od osnovnih enačb, je še dolgo imel pomisleke prav glede interpretacije kvantne mehanike. Znan je

njegov primer mačke, ki jo zapremo v škatlo, kjer se lahko zgodi, da mačka umre. V kvantni mehaniki dogajanje v škatli opišejo enačbe kot hkraten časovni razvoj različnih scenarijev; ob odprtju škatle – to predstavlja meritve – bo seveda mačka ali živa ali mrtva, ne pa oboje. S kvantno mehaniko lahko izračunamo samo verjetnost, da bo na koncu mačka živa ali mrtva, med samim računom pa se formalno upoštevana obe možnosti, vendar nimamo podlage, da bi izjavili, da je v škatli mačka hkrati živa in mrtva.

Nevidna meja

V kopenhavnski interpretaciji kvantne mehanike se je treba sprijazniti s pragmatično delitvijo sveta na klasični in kvantni. Med nami in kvantnim svetom je nevidna meja, pri čemer ni pomembno, kje točno je, vendar obstaja. Onstran te meje veljajo kvantne, na tej strani pa klasične enačbe. V veliki večini praktičnih primerov je takšna delitev nemoteča in omogoča udobno uporabo ter sobivanje obeh teorij. Vzrok je v tem, da

je kvantni svet res zelo majhen in zato povsem odmaknjen od naših čutil; atomi so na primer manjši od milijonine milimetra.

Delitev na kvantni in klasični svet kot tudi zaključek eksperimenta s kolapsom je bila ves čas za mnoge moteča, čeprav je bila potrebna zaradi ujemanja osnovne teorije z dejanskimi eksperimenti. Takšna delitev je še posebej problematična na primer pri kvantnomehanski obravnavi v kozmologiji, saj se kot opazovalci narave ne moremo izvzeti, kar sicer kopenhavska interpretacija zahteva. Teorija bi morala enako obravnavati celotno vesolje z nami vred.

Davidu Bohmu je leta 1952 uspelo skonstruirati formalizem, ki kopenhavnsko kvantno mehaniko nadgradi s teorijo tako imenovanih skritih spremenljivk in odpravi nejasnosti v zvezi s kolapsom ter deloma tudi delitev na klasični in kvantni svet. Vendar tudi ta teorija ni brez težav, običajno je glavni očitek, da temelji na nelokalnih lastnostih skritih spremenljivk, kar se upira splošnemu načelu v fiziki, da skrivnostno hipno delovanje na daljavo ni mogoče.

Nekoliko bolj prepričljiva se zdi teorija o vzporednih svetovih, ki jo je leta 1957 predstavil Hugh Everett. Njegova osnovna predpostavka je bila, da se nikoli ne zgodi kolaps kvantnih stanj, ampak se vse možnosti, ki jih pred meritvijo vsebuje in obravnava valovna funkcija, enakovredno časovno razvijajo. Takrat, ko naj bi se zgodil kolaps, tega ni, ker se ves svet z opazovalci vred razcepi tako, da se v vsakem od svetov naprej razvija ustrezna prihodnost. Seveda je tak opis z besedami zelo nenavaden, ko se pa ta teorija zapiše z enačbami, postane zelo enostavna. Kot zanimivost naj omenimo, da izraza vzporedni svetovi Everett sploh ni uporabil, ampak je šele kasneje to popularno poimenovanje vpeljal fizik Bryce DeWitt. Ta interpretacija je priljubljena alternativa kopenhavnski, četudi zaradi vpletave več svetov ostaja nelagodje, in zato osnovni učbeniki kvantne mehanike večinoma ostajajo zgolj pri kopenhavnski interpretaciji.

Naj sprehod po kvantni mehaniki končamo s povzetkom vprašanj, ki jih odpira pripoved o srečanju v Samari oziroma o neizogibnosti

Znan kritik je bil Einstein, ki je postavljal zelo pronicljiva vprašanja; v iskanju odgovorov pa so se formulirala pravila ali tako imenovani postulati kvantne mehanike.

usode. V klasični mehaniki ni nobenega dvoma, da sta prihodnost in preteklost enolično določeni s trenutnim stanjem, to je z legami in s hitrostmi vseh delcev v vesolju. V kvantni mehaniki je odgovor odvisen od interpretacije. V kopenhavnski igra naključje odločilno vlogo, enačbe obravnavajo samo verjetnost, da se nekaj zgodi. Verjetnost je podana kot rezultat teorije in ni podrobnejše razlage, od kod izvira. Zato je prevladujoče mnenje, da v okviru te interpretacije prihodnost ni točno določena. Interpretacija z Bohmovimi skritimi spremenljivkami pojasni naključje v kvantni mehaniki z našim nepoznavanjem preteklosti, prihodnost pa je zelo podobno kot v klasični mehaniki že določena. Tudi v Everettovi interpretaciji več svetov je prihodnost enolično določena in vesolje se kot celota razvija po enačbah kvantne mehanike, obstajata pa naključje in verjetnost, v kateri različni sveta konkretno smo.

Odgovor na vprašanja o determiniranosti prihodnosti torej ni enoznačen, ker je odvisen od tega, po kateri interpretaciji ga podamo. Poudariti pa je treba, da so vse interpretacije glede računskih rezultatov in primerjave z eksperimenti identične, zato odgovora na vprašanje, katere je pravilna, empirično za zdaj ni mogoče niti potrditi niti ovreči. Fizika torej vprašanja o neizogibni prihodnosti in s tem povezanim obstoju naše svobodne volje pušča neodgovorjena.

prof. dr. Anton Ramšak, Fakulteta za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani in Institut Jožef Stefan

POMEMBNA NEREŠENA VPRAŠANJA

Ne samo da nimamo kvantnomehanskih enačb za izračun trajektorij, po katerih bi se delci gibali, ampak se je celo izkazalo, da dokler posameznega delca ne »ujamemo« z detektorjem, ta delec v okviru kvantne teorije sploh še nima določene lege v prostoru. V okviru kvantne mehanike nimamo nobene enačbe, ki bi lahko neposredno obravnavala gibanje delca in v resnici ne vemo, kaj se z njim dogaja, dokler ga na nekem mestu ne ujamejo. Pogosto naletimo na izjave, da v kvantni mehaniki delec lahko gre hkrati po več poteh ali da je mačka hkrati živa in mrtva. Te izjave ne sledijo iz kvantne mehanike in so v tem smislu napačne. V matematičnem zapisu valovne funkcije, ki je rešitev Schrödingerjeve enačbe, je zgolj informacija o verjetnosti, da delec najdemo na posameznih mestih

v prostoru, vendar ne moremo predpostavljati, da je res na več mestih hkrati. In če delec detektiramo, ga ujameмо na samo enem mestu. Če poskus ponavljamo z vedno novimi delci, nam izračunana verjetnost napove, kolikokrat lahko pričakujemo, da bomo v zaporedju poskusov na posameznem mestu delec detektirali, in ne, kje točno ga bomo ujeli. Razvoj teorije je kasneje vodil do izredno zanimivih in presenetljivih abstraktnih struktur formalizma kvantne mehanike, vendar tukaj nimamo možnosti prikazati podrobnosti. Omeniti pa moramo, da čeprav se je teorija do zdaj povsem skladala z eksperimenti, še vedno ostajajo nekatera neresena pomembna vprašanja, na primer glede kvantnomehanskega opisa gravitacije.

ZELO MAJHNI DELCI

Kmalu po odkritju osnovnih lastnosti nove teorije je postalo jasno, da v nasprotju s klasično mehaniko, kjer vsaj načeloma lahko nedvoumno napovemo prihodnost obravnavanega delca, v kvantni mehaniki takšna napoved ni mogoča. Pomembno je tudi vprašanje, kakšna pa je napoved za primere, ki jih lahko obravnava že klasična mehanika, ki se je v stoletjih izkazala za pravilno. To je vprašanje tako imenovane klasične limite, ki so ga kmalu razjasnili: analiza enačb pokaže, da za dovolj velike delce kvantnomehansko izračunana verjetnost napove, da je delec pri meritvi s skoraj 100-odstotno verjetnostjo točno na mestu, ki ga določajo Newtonove enačbe, in zato v običajnem svetu odstopanj med kvantno in klasično obravnavo ne moremo zaznati. Razlika med teorijama postane opazna šele pri res zelo majhnih delcih, na primer tisočkrat manjših, kot jih lahko vidimo pod mikroskopom. Povsem nenadomestljiva pa je kvantna mehanika pri obravnavi osnovnih delcev.