

Nobelova nagrada za fiziko za leto 2022

Martin Čopič

Leta 2022 je bila Nobelova nagrada za fiziko podeljena Johnu F. Clauserju, Alainu Aspectu in Antonu Zeilingerju. Dobili so jo za »poskuse s prepletenimi stanji fotonov, s katerimi so pokazali kršenje Bellovih neenačb in uvedli osnove kvantne informacijske znanosti«.



Alain Aspect je bil rojen leta 1947 v Franciji. Deluje na Inštitutu za optiko pariške Univerze Paris-Saclay in na Politehnični šoli, ki je del Politehničnega inštituta v Parizu. Doktoriral je na Visoki šoli za optiko Univerze d'Orsay. Na začetku osemdesetih let prejšnjega stoletja je izvedel Bellove testne poskuse, ki so pokazali, da je kritika kvantne mehanike, ki so ji Einstein, Podolsky in Rosen očitali nenavadno delovanje na daljavo, nepravilna. Po delu na Bellovih neenačbah se je Aspect posvetil raziskavam laserskega blajenja nevtralnih atomov in Bose-Einsteinovih kondenzatov. Je član francoske Akademije znanosti in Tehnološke akademije.

John F. Clauser je bil rojen leta 1942 v Pasadeni v Združenih državah Amerike. Deluje na zasebnem zavodu J. F. Clauserja in družabnikov v Združenih državah Amerike. Doktorat je opravil na Univerzi Columbia, nato je raziskoval na Univerzi Berkeley. Raziskoval je nelokalno kvantno prepletenost ter predlagal in izvedel test teorije lokalno skritih spremenljivk. Preučeval je statistiko fotonov in pokazal, da se fotoni lahko kažejo kot lokalizirani delci in ne kot kratki sunki elektromagnetnega sevanja. Razvil je atomske interferometre in jih uporabil kot senzorje za gravitacijo in slikanje z rentgensko svetlobo.

Anton Zeilinger je bil rojen leta 1945 v Riedu v Avstriji. Deluje na Univerzi na Dunaju in Inštitutu za kvantno optiko in kvantno informacijo Avstrijske akademije znanosti. Doktoriral je na dunajski univerzi. Večina njegovih raziskav je na področju temeljev in uporabe kvantne prepletenosti v informacijski znanosti. Znani so njegovi interferenčni poskusi s težjimi delci in uvajanje kvantne teleportacije in kriptografije.

Kvantna mehanika, ki so jo fiziki razvili v prvih desetletjih dvajsetega stoletja, je v kratkem času razložila vrsto pojavov v svetu atomov in osnove zgradbe snovi, je pa vsebovala pojme in napovedi, ki so bili tuji dotedanji tako imenovani klasični fiziki in intuiciji. V nadaljevanju bom najprej opisal osnove kvantne fizike in razlike med njo in klasično fiziko. Sledi, kako so v znamenitem članku *Einstein, Podolski in Rosen (EPR)* pokazali, da kvantna fizika napoveduje možnost obstoja delcev, ki so daleč narazen, pa še vedno tvorijo povezano enoto, kar v klasični fiziki ni mogoče (»paradoks« EPR). Leta 1964 je irski fizik John Bell pokazal, da v nekaterih primerih kvantna fizika napoveduje rezultate, ki kršijo omejitve klasičnega pojmovanja, znane kot Bellove neenačbe. Nato bom nekoliko podrobneje opisal poskuse nagrajencev, ki te neenačbe kršijo in s tem potrjujejo osnove kvantne fizike.

Ob koncu devetnajstega stoletja je bila kljub uspehom, kot so zakoni električnega in magnetnega polja in termodinamike, v fiziki vrsta problemov, ki jih z dotedanjimi sredstvi ni bilo mogoče pojasniti. Max Planck je moral za uspešno teorijo toplotnega sevanja vpeljati zahtevo, da ima energija svetlobe diskretne obroke. Z enako predpostavko je leta 1905 Einstein razložil fotoefekt, to je pojav, da svetloba iz kovine izbije elektrone. Obroke – kvante – energije svetlobe sedaj imenujemo fotone. V klasični fiziki bi elektroni v atomih v delčku sekunde morali pasti v jedro. Te in mnoge druge probleme je od sredine dvajsetih let razrešila kvantna fizika.

V klasični fiziki so osnovni pojem drobnosti (točkasti) delci, ki se gibljejo zaradi medsebojnih sil, kot ukazuje Newtonov zakon. Tako naj bi v vsakem trenutku poznali položaj in hitrost delcev, kar načeloma omogoča tudi izračun vseh drugih fizikalnih količin. V kvantni fiziki je drugače. Stanje posameznega delca opišemo z valovno funkcijo, to je tako, da v vsaki točki prostora navedemo

neko vrednost. To je nekoliko podobno, kot opišemo valovanje na vodni površini z navedbo višine v vsaki točki. Razlika je v tem, da kvantna valovna funkcija ni merljiva, je pa iz nje mogoče izračunati vrednosti merljivih fizikalnih količin, na primer energije. Valovna funkcija vsebuje vso informacijo, ki jo je o delcu v danem stanju mogoče imeti. Kvadrat valovne funkcije je verjetnost, da na danem mestu najdemo delec. Valovna funkcija in s tem verjetnost za položaj se lahko razprostira po velikem območju. Pomembno je še, da bolj kot je položaj delca omejen, bolj nedoločena je njegova hitrost. To je Heisenbergovo načelo nedoločenosti, ki velja tudi za druge skupine fizikalnih količin. Za lansko Nobelovo nagrado je ključno še, da je vsota valovnih funkcij spet stanje. Valovna funkcija, ki ima veliko vrednost v dveh ločenih območjih prostora, kar pomeni, da se delec nahaja z znatno verjetnostjo na dveh (ali več) mestih, je možna in v atomski fiziki celo pogosta. Z ustreznim merilnikom lahko delec najdemo na enem ali drugem mestu. Tudi v klasični fiziki lahko ne vemo, kje delec je, a bistvena razlika je, da je v klasičnem primeru delec gotovo na enem mestu, ki ga pač ne poznamo, medtem ko je v kvantni sliki delec hkrati na več mestih in šele meritev ga omeji na izbrani del prostora. To je v hudem nasprotju z vsakodnevno predstavo.

Albert Einstein je menil, da fizikalni zakoni, ki napovejo le verjetnost za izid meritve, ne morejo biti osnovni opis sveta. Znana je njegova izjava *Bog ne kocka*. Obstajala naj bi bolj osnovna teorija z morda še neznanimi količinami in je kvantna fizika le neki približek, ki sicer daje dobre rezultate, ni pa pravi opis »realnosti«. Ta tako imenovana teorija skritih spremenljivk naj bi dajala točne napovedi, podobno kot klasična fizika. Da bi pokazal protislovnost kvantne fizike, je skupaj s Podolskim in Rosenom leta 1935 objavil članek, v katerem so opisali za tedanje čase le miselni poskus, danes znan kot poskus EPR.

Takole gre po Bohmu prirejena verzija. Elektroni in njihovi antidelci pozitroni imajo poleg naboja še lastno vrtilno količino – spin, ki je vektor, ima torej smer, ki lahko kaže le v dveh nasprotnih smereh. Podobno kot velja za položaj, je tudi spin lahko hkrati v obeh smereh in šele meritev izbere z neko verjetnostjo eno od obeh možnosti. Naj se iz nekega izvora v nasprotnih smereh izseva par elektron in pozitron, za katerega vemo, da mora skupni spin biti nič, da morata torej spina posameznih delcev biti nasprotna. Pri tem lahko prvi kaže »gor« in drugi »dol« ali pa obratno. Stanje je vsota obeh možnosti – pravimo, da je prepleteno. Povedati je še treba, da sta smeri »gor« in »dol« pred meritvijo nedoločeni in ju izberemo šele z meritvijo. Pri vsaki izbiri izmerimo nasprotni vrednosti. Naj bosta na vsaki strani, daleč od izvora, opazovalca Alica (A) in Bob (B). Dogovorjena sta, v kateri smeri bosta merila spina. A izmeri slučajno (z verjetnostjo 0.5) spin »gor«. Od tedaj takoj B z gotovostjo izmeri spin »dol«. Zdi se, kot da bi delca v trenutku med seboj komunicirala, kar zaradi končne hitrosti svetlobe ni mogoče. Einstein je temu rekel čarovno delovanje na daljavo (angleško *spooky action at a distance*) in zaključil, da kvantna fizika ni popolna, temveč da obstajajo skrite spremenljivke, ki nosijo informacijo o spinih delcev, v nasprotju s kvantnim načelom, da šele meritev izbere določeno smer spina. Kvantna nedoločenost naj bi bila torej posledica nepoznavanja skritih spremenljivk. Druga razlaga, ki pa jo je Einstein odločno odklanjal, je, da ostaneta delca tudi po izsevanju, ko sta že daleč narazen, v prepletenem stanju med seboj povezana in je kvantna fizika nelokalna.

Tu se je zgodba za nekaj časa ustavila. Kvantna fizika je dala izjemne rezultate o zgradbi atomov in snovi in večina fizikov se ni spraševala o njenih osnovah. Leta 1964 pa je irski fizik John Bell objavil članek, v katerem je teoretično pokazal, da je mogoče s poskusi razlikovati med napovedmi kvan-

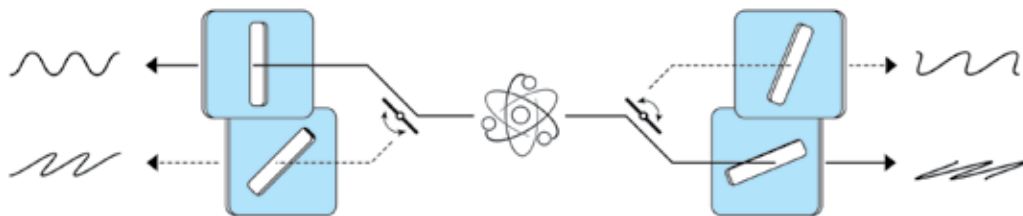
tne fizike in lokalne teorije skritih spremenljivk. S prepletenimi stanji (danes jih imenujemo Bellova stanja) bi za nekatere poskuse teorija skritih spremenljivk dala za rezultate omejitve – Bellove neenačbe, ki jih kvantna fizika lahko preseže.

Bellovih neenačb je več. Pomemben in dokaj enostaven primer je Clauser-Horn-Simony-Holtova (CHSH) verzija. A in B naj merita zaporedje prepletenih (Bellovih) parov vsak pri dveh orientacijah polarizatorjev in pripišeta meritvi v smeri vrednost +1, v nasprotni pa -1. Tako dobita zaporedja a_i , a_i' , b_i in b_i' , kjer i označuje zaporedno številko meritve. Po končani meritvi si sporočita rezultate in tvorita količino $S_i = a_i (b_i + b_i') + a_i' (b_i - b_i') = \pm 2$.

Če je $b_i = b_i'$, je drugi člen enak 0, prvi pa ± 2 , če pa je $b_i = -b_i'$, je drugi ± 2 , prvi pa 0, torej je S_i vselej ± 2 . Če velja teorija lokalnih skritih spremenljivk, po kateri sta stanji spinov določeni na izvoru, je povprečje absolutne vrednosti S po vseh meritvah gotovo manj od 2.

Napoved kvantne fizike je drugačna. Naj meri A pri kotih ϑ in ϑ' , B pa pri ϕ in ϕ' . Kvantna fizika napoveduje, da je povprečje zmnožka A in B enako $-\cos(\vartheta - \phi)$. To je posledica prepletenosti stanja, ki ostaja kljub medsebojni oddaljenosti obeh delcev. A izbere za ϑ vrednosti 0 in $\pi/2$, B pa za ϕ $\pi/4$ in $-\pi/4$. Tedaj je pričakovana vrednost $S = -4/\sqrt{2} = -2,82 < -2$, kar nedvomno nasprotuje teoriji skritih spremenljivk.

Bellov članek je spodbodel mladega Clauserja, ki je kot podoktorski raziskovalec prišel na Univerzo v Berkeleyju, da je začel eksperimentalno preverjati Bellove ideje. Mislil je, da lahko pokaže pravilnost Einsteinovih pogledov, da torej obstaja lokalna teorija skritih spremenljivk in je kvantna fizika nepopolna. Poskuse je delal s pari fotonov v prepletenem stanju, ki jih je dobil z vzbujanjem kalcijevih atomov. Polarizacija, to je smer električnega polja svetlobe, se pri fotonih obnaša podobno kot spin pri elektronih. Clauser je meril podobne korelacije



Shema poskusa, ki ga je leta 1976 predlagal, leta 1982 pa s sodelavci izvedel A. Aspect. Fotona iz kalcijevega kaskadnega izvora najprej padeta na optična preklopnika CI in CII, kje sta lahko ali prepuščena na par polarizatorjev in detektorjev PM1 in PM2 ali odbita na drugi par detektorjev PM1' in PM2'. Knala se prekopita vsakih deset nanosekund. Razdalja med polarizatorji je dvanajst metrov.

kot pri neenačbi CHSH in dobil vrednost, večjo od meje, ki bi jo dale skrite spremenljivke. Kvantna fizika je torej pravi opis sveta in Einstein ni imel prav.

Clauserjev poskus je imel nekaj pomanjkljivosti. Najpomembnejša je bila, da so bile smeri polarizatorjev nastavljene pred meritvijo, kar bi lahko na nepoznani način vplivalo na rezultat. To vrzel je nekaj let pozneje zapolnil Alain Aspect. Tudi on je meril polarizacijo prepletenih fotonov. Merilni mesti sta bili šest metrov od izvora in sta imeli po dva različno orientirana polarizatorja, pred njima pa sta bila električna preklopnika, ki sta usmerila fotona na enega od polarizatorjev. Čas preklopa je bil dovolj kratek, da se je zgodil med tem, ko sta fotona potovala od izvora, tako da ni bilo mogoče, da bi položaj polarizatorjev vplival na stanje fotonov. Tudi Aspect je z veliko stopnjo zanesljivosti potrdil, da je Bellova neenakost kršena in da torej ni skritih spremenljivk.

Anton Zeilinger je nadaljeval poskuse s prepletenimi stanji. Pokazal je, da jih je moč uporabiti v nove, presenetljive namene. Iz osnov kvantne fizike sledi, da nekega kvantnega stanja ni mogoče kopirati niti ni mogoče z meritvami dobiti dovolj informacij za verno poustvaritev. Zeilinger je uporabil prepleteno stanje para fotonov, da je prenesel kvantno stanje tretjega delca (fotona) od A do B. Postopek je približno tak. A in B si delita prepleteni par. Poleg tega ima A tre-

tji delec v neznanem stanju, ki ga želi prenesti k B. Zato ga z uporabo polprepustnih zrcal preplete s svojo polovico prepletenega stanja v vsoto štirih možnih Bellovih stanj in napravi meritev, ki da eno od teh Bellovih stanj. S tem stanje, ki ga ima B, ni več prepleteno s stanjem pri A, temveč preide v stanje, ki ga B lahko pretvori v prvotno neznano stanje. A po običajni zvezi sporoči B, katero Bellovo stanje je izmerila, kar B omogoči, da s še eno preprosto operacijo dobi verno preneseno stanje. Tega A po meritvi nima več in ga tudi ne more rekonstruirati, skladno z nemogućnostjo kopiranja kvantnih stanj. Ker mora A sporočiti rezultat svoje meritve po običajni zvezi, postopek ne omogoča prenosa informacije hitreje kot s hitrostjo svetlobe. Prenos kvantnega stanja imenujejo kvantna teleportacija in bo pomemben pri kvantnem računalništvu in prenosu informacij. Ime naj nas ne zavede, postopek je daleč od tega, da bi lahko prenesli makroskopski objekt ali celo živo bitje.

Podobno deluje zamenjava prepletenosti, ki jo je prav tako razvil Zeilinger. Naj imata A in B na začetku vsak svoj prepleteni par fotonov, ki med A in B nista povezana. A in B pošljeta po en foton Ceciliji, ki ju z Bellovo meritvijo preplete. S tem postaneta tudi preostala fotona pri A in B prepletena, čeprav nikoli nista bila v stiku. Tudi zamenjava prepletenosti je pomembna v kvantnem računalništvu.

Zeilinger je izpopolnil tudi osnovni poskus

EPR in zapolnil vse preostale vrzeli. Da je na primer zagotovil neodvisnost nastavitve polarizatorjev, je za signal izrabil slučajno detekcijo fotonov svetlobe zvezd, ki se je gotovo izsevala daleč pred poskusom. Povečal je tudi razdaljo med merilnimi mesti. Prvi merilnik je bil na Tenerifeju, drugi pa na sto štiriinštirideset kilometrov oddaljeni La Palmi.

Prepletena stanja lahko služijo tudi pri varnem prenosu ključev za kodiranje. V poskusu EPR naj imata A in B izvor prepletenih parov fotonov. Pri različnih kotih merita polarizacijo. Na koncu si po običajni zvezi sporočita položaje polarizatorjev ob določenem času. Uporabita tiste rezultate, pri katerih sta imela enake položaje polarizatorjev in so zaradi prepletenosti nasprotni. Dobljeno slučajno zaporedje uporabita kot kodirni ključ. Če preverita Bellovo neenačbo, lahko tudi ugotovita, ali je kdo skušal prisluškovati. To bi namreč uničilo kvantno preple-

tenost in zmanjšalo korelacije pod klasično mejo. Velja pripomniti, da na tak način ni mogoče prenašati sporočil, saj je rezultat posamezne meritve povsem случаjen.

Clauserjevi, Aspectovi in Zeilingerjevi poskusi s prepletenimi stanji so tako najprej pokazali, da so napovedi kvantne fizike tudi tedaj, kadar se zdijo v nasprotju s klasičnimi predstavami in intuicijo, pravilne. Lokalna teorija skritih spremenljivk, ki naj bi dala določene napovedi za izide meritev, ne le verjetnosti, ni možna. Kvantna fizika je nelokalna, napove v splošnem le verjetnosti za izide poskusov in ne dovoljuje hkratne meritve parov nekaterih količin, na primer položaja in hitrosti. Prepletena stanja, v katerih so lahko tudi oddaljeni deli sistema med seboj povezani, so pomembna značilnost kvantne fizike. So eden bistvenih elementov v kvantnem računalništvu, kodiranju in prenosu informacij.

Ali je ChatGPT bolj empatičen kot zdravnik? • Medicina in umetna inteligenca

Ali je ChatGPT bolj empatičen kot zdravnik?

Amadej Šenk

V digitalni dobi, ko je dostop do informacij le nekaj klikov stran, pacienti vse pogostejše iščejo na spletu zdravstvene nasvete ter informacije o simptomih, diagnozah in zdravljenju. V zadnjih nekaj letih, še bolj natančno v zadnjem letu, je prišlo do burnega razvoja umetne inteligence. Napredek v razvoju je posegel tudi v osrčje zdravstva in medicine, kjer se je postopoma začel uveljavljati tudi ChatGPT, trenutno najbolj napreden jezikovni model umetne inteligence. Razvilo ga je podjetje OpenAI in je prišel v splošno javno uporabo 30. novembra leta 2022. V manj kot dveh mesecih je dosegel kar sto milijonov mesečnih uporabnikov, kar je najhitreje za katero koli aplikacijo na svetu do sedaj. Zakaj je tako popularen? ChatGPT je zmožen razumeti kontekst vprašanj, se prilagajati komunikacijskim slogom in tudi »izražati« empatijo (vživljanje v drugega). V veliki večini primerov naj bi pomenil zanesljiv vir informacij in podpore za paciente, ki iščejo zdravstvene nasvete na spletu. Vendar pa se poraja vprašanje, ali je strokovno povsem zanesljiv ter kakšna je oblika empatije, ki jo premore.