ALTERNATOR
Misliti znanost.

Nobelova nagrada za fiziko 2022 za poskuse s kvantno prepletenimi delci

27. 10. 2022

Number: 31/2022

Author:

- Rok Žitko

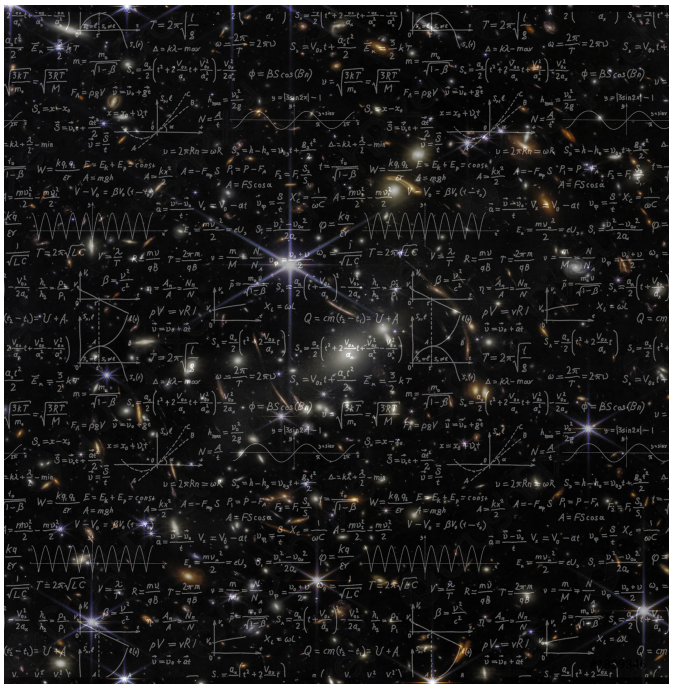


Foto: CrushPixel (https://www.crushpixel.com/stock-vector/basic-math-equations-formulas-white-1809346.html) in NASA (https://webbtelescope.org/contents/news-releases/2022/news-2022-035), računalniška obdelava: Katja Bidovec

Nobelova nagrada za fiziko je bila letos podeljena trem eksperimentalnim fizikom, ki so v zadnjih desetletjih prejšnjega stoletja opravili pionirske poskuse, v katerih je bila jasno prikazana teoretično dolgo napovedana nenavadna lastnost kvantnih delcev, da se obnašajo tako, kot da bi bili med seboj povezani na velikih razdaljah. Nagrado so si v enakih deležih razdelili Francoz Alain Aspect, Američan John Clauser in Avstrijec Anton Zeilinger. S svojim delom so ne le pokazali, da je kvantna mehanika bržkone povsem pravilen opis našega sveta, temveč tudi izdelali orodja, ki tvorijo temelj prihajajočih »kvantnih tehnologij« in se jih že danes uporablja za obdelavo kvantnih informacij (kvantno računalništvo), varno sporočanje (kvantne komunikacije) in meritve z izjemno natančnostjo (kvantna senzorika in meroslovje).

Kvantna stanja in prepletenost

Kvantna mehanika je skupno ime za fizikalne teorije, ki opisujejo lastnosti običajno atomsko majhnih sistemov, ki se lahko bistveno razlikujejo od napovedi klasične mehanike temelječe na Newtonovih zakonih gibanja teles (https://sl.wikipedia.org/wiki/Newtonovi_zakoni_gibanja) iz 17. stoletja. Razvila se je v prvih desetletjih 20. stoletja kot odgovor na nekatera zelo zagonetna odprta vprašanja fizike: oblika spektra sevanja segretega črnega telesa (https://sl.wikipedia.org/wiki/Planckov_zakon), fotoelektrični pojav (https://sl.wikipedia.org/wiki/Fotoelektri%C4%8Dni_pojav) (izbijanje elektronov iz kovine ob svetlobnem obsevanju) in obstoj diskretnih spektralnih črt (https://sl.wikipedia.org/wiki/Spekter_vodikovega_atoma) v

sevalnih in absorpcijskih spektrih (https://sl.wikipedia.org/wiki/Spekter) plinov. Če je konec 19. stoletja morda obstajal vtis, da so osnovni zakoni fizike že vsi znani in da je načeloma možno z natančnimi izračuni vnaprej določiti izide vseh meritev, je kvantna mehanika stvari postavila povsem na glavo. Kvantna teorija predstavlja radikalno revolucijo v opisu in razumevanju naravnih pojavov prav do temeljev, vključno s pojmom realnosti same. V kvantni mehaniki delcu ne moremo pripisati objektivnih merljivih lastnosti, kot sta lega in hitrost, ki bi obstajale že pred meritvijo in bi jih meritev zgolj razkrila, temveč mu pripišemo »kvantno stanje« oziroma »valovno funkcijo«, ki opisuje verjetnosti za različne izide, če bi meritev lege ali hitrosti dejansko izvedli. Pred meritvijo lega in hitrost nista določeni in tako ni možno govoriti o trajektoriji delca, zato osnovni koncepti klasične fizike niso več ustrezni. Naključnost je neizogiben element kvantne teorije. Za kvantna stanja velja načelo *superpozicije*: v matematičnem opisu lahko dve kvantni stanji seštejemo in dobimo novo dovoljeno stanje. Pogovorno zato včasih rečemo, da je delec lahko pred meritvijo v dveh različnih stanjih hkrati, vendar je takšna prispodoba zavajajoča.

Vse skupaj postane še bolj zapleteno, če imamo opravka z dvema delcema. Če delca nimata skupne preteklosti in se nista nikoli srečala, potem lahko opišemo vsakega zase z njemu lastno valovno funkcijo, valovna funkcija celotnega sistema pa je zgolj zmnožek posameznih prispevkov. Takšnemu stanju zato rečemo tudi produktno stanje. V tem primeru se ob meritvah posamezni delec obnaša povsem neodvisno od drugega in verjetnosti za izide meritev lahko izračunamo iz valovnih funkcij za vsak posamezni delec posebej. Drugače pa je, če se dva delca srečata in med seboj interagirata, denimo preko coulombske interakcije (https://sl.wikipedia.org/wiki/Coulombov_zakon) med električno nabitima delcema, kot so elektroni. Izkaže se, da imata delca po takšnem srečanju skupno prihodnost ne glede na to, kje se nahajata: opisati ju je potrebno s skupno valovno funkcijo, ki je ne moremo več zapisati kot zmnožek posameznih prispevkov za vsak delec posebej. Takšnemu stanju rečemo *kvantno prepleteno stanje*. Dva prostorsko ločena delca se torej lahko obnašata kot enota. Takšna stanja so sicer zelo občutljiva: z nadaljnimi interakcijami vsakega izmed teh dveh delcev z vsemi ostalimi delci, torej z okolico, se njuna medsebojna prepletenost zmanjšuje, ker si prepletenosti ne more v enaki meri deliti veliko delcev (malo šaljivo temu rečemo tudi monogamija prepletenosti). Tudi za tvorbo maksimalno prepletenih parov delcev se je treba kar potruditi. Najlažje gre to z delci svetlobe, fotoni, z uporabo procesa z zapletenim imenom spontano parametrično sipanje. Z elektroni je bistveno teže, še največ uspeha je z razcepljanjem Cooperjevih parov v superprevodnikih (https://sl.wikipedia.org/wiki/Superprevodnost) , vendar to terja zelo zapletene naprave, poskuse pa je potrebno izvajati pri izjemno nizkih temperaturah v področju milikelvinov.

Pri meritvah kvantno prepletenih delcev opazimo zelo nenavadno lastnost: rezultat meritve na enem izmed delcev povsem določa rezultat meritve na drugem delcu, čeprav sta pred meritvijo oba rezultata povsem nedoločena. Znan primer je par elektronov v stanju, ki ga strokovno imenujemo »spinski singlet (https://en.wikipedia.org/wiki/Singlet_state) «: če izmerimo, da ima prvi elektron spin (https://sl.wikipedia.org/wiki/Spin) »gor«, potem ob meritvi drugega nujno dobimo rezultat, da ima spin »dol«, in obratno, če ima prvi spin dol, ima drugi spin gor. Rezultata sta torej korelirana (https://sl.wikipedia.org/wiki/Korelacija) (povezana), kar pomeni, da sta delca izgubila individualnost: opišemo ju lahko kvečjemu z njunim skupnim stanjem. Če bi tu šlo zgolj za pojave na mikroskopskih razdaljah, se nam morda to niti ne bi zdelo kaj dosti nenavadno. Dejansko pa kvantna prepletenost lahko obstaja tudi za dva delca na zelo velikih medsebojnih oddaljenostih. Še več: pomembno ni niti, kdaj sta posamezni meritvi opravljeni – prva pred drugo, prva po drugi ali celo sočasno –, rezultata bosta vedno povezana na popolnoma enak način. Če vemo, da se informacije ne morejo širiti hitreje kot s svetlobno hitrostjo, je to na prvi pogled zelo sumljivo. Kako neki se delca sporazumeta, da bosta ob meritvi vedno pokazala povezani merljivi vrednosti? A ta »klasični« intuitivni način razmišljanja ni pravilen, dejansko ni

nobenega prenosa informacije.

Bellova neenačba

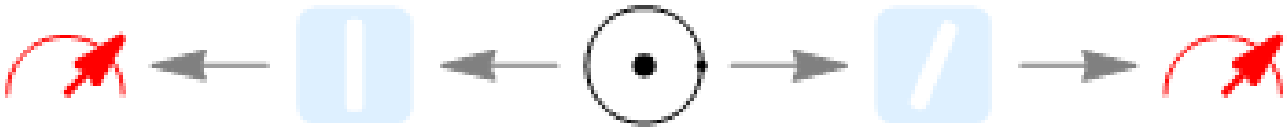
Možen izhod iz te zagonetke so teorije skritih spremenljivk. V njih predpostavimo obstoj dodatnih spremenljivk, ki so same sicer nemerljive, vendar napovedujejo rezultate meritev in s tem odpravijo potrebo po kvantni nedoločenosti. Primer je Bohmova teorija pilotskih valov (https://en.wikipedia.org/wiki/De_Broglie%E2%80%93Bohm_theory) , ki je povsem deterministična, a se po napovedih sicer ne razlikuje od »standardne« kvantne mehanike. Ta teorija je spodbudila severnoirskega fizika Johna Stuarta Bella (1928–1990) k razmisleku o skritih spremenljivkah (https://en.wikipedia.org/wiki/Bell%27s_theorem) in o tem, ali se da trditve o naravi realnosti eksperimentalno preveriti. Oglejmo si naslednji miselni poskus, v katerem nastopa znani kriptografski par Alice in Bob (https://en.wikipedia.org/wiki/Alice_and_Bob) , ki se mu pridruži še Charlie. Opravka imamo s predmeti, ki jim lahko pripišemo dve različni lastnosti s po dvema različnima vrednostma. Primer so pobarvani kovanci, ki se ločijo po barvi (črn ali bel) in po strani (grb ali cifra). Vodja poskusa Charlie pripravlja predmete in jih v zapečatenih ovojnicah pošilja pomočnikoma Alice in Bobu, ki sta daleč vsaksebi. S tem smo predpostavili, da so fizikalne lastnosti predmetov že povsem določene (realizem).

Po prejemu predmetov Alice in Bob v istem trenutku izbereta, katero lastnost bosta merila (črn/bel, grb/cifra), odpreta kuverti in zabeležita rezultat. Ker sta ločena, sta njuni meritvi po predpostavki povsem neodvisni. Temu rečemo lokalnost: zakoni fizike so takšni, da na dogajanje v neki točki prostora vpliva le neposredna okolica te točke, ne pa dogodki daleč proč. Ob predpostavkah realizma in lokalnosti lahko izpeljemo Bellovo neenačbo za korelacije med rezultati meritev različnih količin. Stvari postanejo zanimive, če so merjene količine iz sveta kvantne mehanike (denimo spin) in če Charlie pripravlja pare delcev v kvantno prepletenem stanju, saj tedaj kvantna teorija napoveduje kršitev Bellove neenačbe.

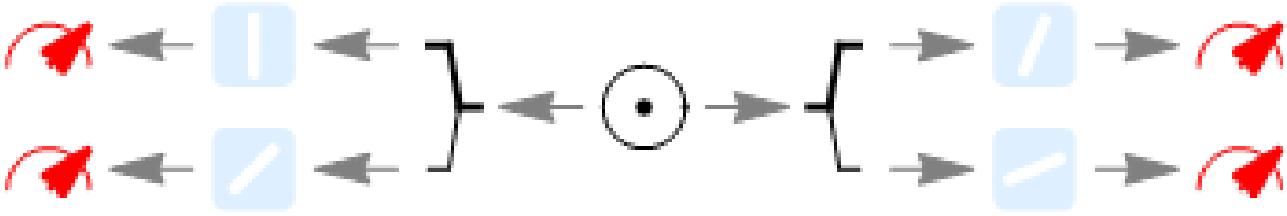
Preizkusi Bellovih neenačb

Te napovedi so vzbudile zanimanje Nobelovega nagrajenca Johna Clauserja, ki si je zadal cilj, da preveri kršitev Bellove neenačbe, čeprav so ga opomnili, da to morda ni najbolje za nadaljevanje njegove kariere, saj naj to početje ne bi bilo preveč koristno in da o kvantni mehaniki ni za dvomiti. S svojim študentom Freedmanom je Clauser uporabil prepletene pare fotonov, ki so bili izsevani ob prehodih vzbujenih atomov kalcija nazaj v osnovno stanje. Pred detektorjema sta bila nastavljiva polarizacijska filtra, ki sta določala merjeni količini, v meritvi pa se je upoštevalo samo sočasno zaznane fotone iz parov. Rezultati meritev, objavljeni leta 1972 (https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.28.938) , so pokazali kršitev Bellove neenačbe, kar je bil prvi udarec teorijam skritih spremenljivk. Žal izvedba eksperimenta ni bila povsem neoporečna, saj je bila izbira meritev (nastavitev filtrov) določena vnaprej. Drugi nagrajenec Alain Aspect je to omejitev odpravil v meritvah leta 1982 (https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.49.1804) z domiselno postavitvijo, ki je omogočala izbiro merjene količine šele po nastanku prepletenih delcev. Nekaj preostalih eksperimentalnih pomanjkljivosti se je kasneje odpravilo v čedalje bolj izpiljenih eksperimentalnih postavitvah. Rezultat je zdaj nedvoumen: Bellova neenačba je kršena. S tem se je nabor možnih alternativnih teorij, ki bi lahko bile bolj »popolne« teorije kot kvantna mehanika, kot jo poznamo in uporabljamo danes, in ki bi opisovale neko nam nedosegljivo globljo realnost, močno skrčil. Povsem lahko izključimo vse lokalne teorije skritih spremenljivk. Še vedno pa so dopustne nelokalne teorije s hipnimi interakcijami dolgega dosega, kot je predhodno omenjena Bohmova teorija pilotskih valov, ali pa superdeterministične teorije, kjer ni nobene nedoločenosti in naključnosti in je vse določeno vnaprej (tako obnašanje merjencev kot merilnih naprav).

Danes ne poznamo nobenega načina, kako bi lahko te možnosti empirično izključili.



Postavitev pri prvi meritvi kršitve Bellove neenačbe (Clauser 1972 (https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.28.938)). Atom izseva dva kvantno prepletena fotona, ki ju zaznata detektorja po prehodu skozi polarizacijska filtra z nastavljivo smerjo prepustnosti.



Postavitev pri izboljšani meritvi kršitve Bellove neenačbe (Aspect 1982 (https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1804)). Dodana sta preklopnika, ki fotone naključno usmerita proti različno orientiranima polarizacijskima filtroma.

Kvantna informacija in teleportacija

V osemdesetih letih se je okrepilo zavedanje (https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.881299) , da informacija ni zgolj nekaj abstraktnega, temveč je vedno zapisana v nekem fizičnem mediju ali napravi, kar postavlja določene fizikalne omejitve glede tega, kaj lahko z informacijo počnemo. Če je naprava takšna, da jo dobro opisuje klasična mehanika, potem imamo opravka z biti. Gre za najmanjšo mero (osnovno enoto) klasične informacije, ki ustreza spremenljivki z dvema možnima vrednostma (0 in 1). Če pa je naprava takšna, da jo je potrebno obravnavati v okviru kvantne mehanike, potem imamo opravka s *kubiti*. Gre za osnovno enoto kvantne informacije, ki jo lahko spravimo v sistemu z dvema možnima osnovnima kvantnima stanjema. Ker za kvantna stanja velja načelo superpozicije, je lahko kvantni sistem tudi v stanju, ki je linearna kombinacija stanj 0 in 1. Kubiti so zato nekaj več kot biti in z njihovo obdelavo lahko izvajamo algoritme, ki jih s klasičnimi računalniki ne moremo. Obstajajo algoritmi, sicer maloštevilni, kjer pohitritev narašča celo eksponentno z zahtevnostjo naloge, kar radikalno spreminja obseg problemov, ki so rešljivi v doglednem času. Žal ni kvantnih algoritmov za vse probleme, predvsem pa za »klasične« algoritme kvantni računalnik ne omogoča prav nobene pohitritve. Prav tako moramo priznati, da so današnji kvantni računalniki še zelo preproste naprave. Izdelava zmogljivih kvantnih računalnikov je velik izziv, saj se kvantno stanje kvari zaradi vpliva okolice in je težko vzdrževati kvantno prepletenost med kubiti.

Ker je za delovanje kvantnih računalnikov prepletenost ključna, je pomembno raziskati osnovne protokole, ki jo izkoriščajo. Tu je odigral pionirsko vlogo tretji letošnji nagrajenec Anton Zeilinger. Najbolj je odmevala njegova prva eksperimentalna izvedba (https://www.nature.com/articles/37539) »kvantne teleportacije«. Gre za postopek, pri katerem se prenese kvantno stanje z enega kvantnega delca na drugega, ki je lahko od prvega poljubno oddaljen. Kvantne informacije se ne da kopirati (https://en.wikipedia.org/wiki/No-cloning_theorem) , temveč gre pri teleportaciji za veren prenos kvantnega stanja na daljavo (od koder tudi ime protokola), pri čemer se ob idealni izvedbi ne izgubi nič kvantne informacije: ciljni delec ima na koncu

povsem enako stanje kot prvi delec pred prenosom, medtem ko je prvi delec naključno v stanju 0 ali 1 in je njegovo prvotno stanje v tem smislu uničeno. Postopek poteka z uporabo kvantno prepletenega para delcev, prvega delca v posesti pošiljatelja, drugega delca v posesti naslovnika, poslati pa je potrebno še dva bita klasične informacije. Prvi uspešni eksperimenti (https://www.nature.com/articles/37539) so bili izvedeni leta 1997, kasneje pa so se izvedbe še izboljševale in izvajale na čedalje večjih razdaljah: trenutni rekord je 1400 km z uporabo kitajskega kvantnega satelita Modzi (Micius). Zeilingerjeva skupina je izvedla še bolj zahtevne eksperimente, denimo izmenjavo prepletenosti (https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.80.3891) , s katero je možno kvantno preplesti dva delca, ki se sploh nikoli nista srečala, kar jim je uspelo leta 1998 z dvema paroma prepletenih delcev. Ta postopek je temelj za izgradnjo kvantnih mrež, ki bi lahko nekoč vodile do »kvantnega interneta (https://www.routledge.com/Schrodingers-Web-Race-to-Build-the-Quantum-Internet/Dowling/p/book/9780367322311) «.

Kvantne tehnologije prihodnosti

Letošnji nagrajenci so s svojimi prelomnimi eksperimenti pokazali, kako je možno nadzorovati posamezne kvantno prepletene delce. Prepletenost ni zanimiva zgolj sama zase, je tudi osnova delovanja praktično uporabnih naprav, kot so kvantni računalniki, omogoča varno komuniciranje na velike razdalje, meritve z večjo natančnostjo, kot jo dopuščajo klasični senzorji, ter tvorbo zajamčeno zasebnih naključnih števil za uporabo v kriptografiji. Nagrajenci so postavili temelje področju, ki ga danes poimenujemo »kvantne tehnologije« in je čedalje bolj prepoznano kot strateško pomembno, govor je celo o »drugi kvantni revoluciji«. V polnem teku so številni izjemno ambiciozni raziskovalni in razvojni programi, kot je, denimo, evropski krovni program »Quantum flagship (https://qt.eu/) «, katerega cilj je vzpostaviti vodilno vlogo EU na tem področju. Prav zanimivo bo spremljati, kako se bodo zapletene kvantne naprave iz laboratorijev selile v naše domove. Bomo v zadostni meri razumeli, kako delujejo? Jih bomo sprejeli? In kako bodo vplivale na družbo?