

Ob preklapljanju tevekanolov med novoletnimi prazniki sem se ustavil pri prizoru v filmu *Harry Potter*, ko se družina prijateljev teleportira. Stopijo v kamin, vržejo pest čarobnega prahu in izgovorijo ime kraja, kamor želijo priti. Glavni junak ga izreče nejasno, zato pristane drugje, kot bi bilo treba. Pisateljica Joanne Rowling si je teleportacijo zamislila kot čarovnijo in ne kot visoko tehnologijo, kar me je spomnilo na Agatha Christie, ki je leta 1933 zapisala, da je nadnaravno samo tisto naravno, česar z zakoni še ne razumemo. Bolj znan je štiri desetletja mlajši citat Arthura Clarka, da se dovolj napredna tehnologija ne razlikuje od čarovnije.

ANTON RAMŠAK

Že od šestdesetih let prejšnjega stoletja se pojem teleportacije redno pojavlja v filmih, kjer ga povezujejo z visoko tehnologijo. V filmu *Muha* iz leta 1958 je bil verjetno prvič opredeljen. V njem genialni znanstvenik izdelava visokotehnoško napravo, s katero namerava prestavljati najprej predmete, nato živa bitja. Napravo sestavljata dve z žicami povezani stekleni omari, ki sta lahko postavljeni poljubno narazen. Izumitelj da predmet v prvo omario in sproži postopek; ko se zabliska, se isti predmet pojavi v drugi omari oziroma se teleportira. Zaplete se, ko profesor preizkusi napravo na sebi, saj se v omari po naključju znajde tudi muha, ki se nato hkrati s znanstvenikom teleportira in se v drugi omari na molekularni ravni z njim usodno preplete. V naslednjih letih so zgodbo še večkrat predelali v drugih filmih, leta 2008 je bila na to temo izvedena celo opera z istim naslovom.

Prežarči me, Scotty!

Verjetno je teleportacija filmsko najbolj znana iz nadaljevanke *Zvezdne steze*, katere epizode se nizajo od leta 1966 vse do danes. V njej je transporter ena od običajnih naprav, ki jo vsi uporabljajo, nihče pa se ne sprašuje, kako deluje ali kako so jo odkrili. Teleportacija ne poteka iz omare v omaro kot v *Muhi*, ampak junake »prežarčijo« iz posebnega prostora v stekleni ladji na kakšen planet ali na drugo vesoljsko ladjo in nazaj. Zagotovo marsikdo, četudi serije ni gledal, pozna citat: »Beam me up, Scotty!« Transporter je isti tudi v najnoviški epizodi, ki so jo pred kratkim izdali.

V naših predstavah ima teleportacija podobno vlogo kot potovanje v času, ki je gotovo ena od priljubljenih tem znanstvenofantastičnega žanra. Glede na današnje razumevanje osnov fizikalnih fizike vse kaže, da potovanje v času ni mogoče, je pa res, da še vedno

Za zdaj pri znanstvenih raziskavah ni poudarek na teleportaciji snovi v filmskem smislu, ampak na prenosu kvantnih informacij.

ne razumemo zadostljivo povezave med temeljnimi zakonitostmi fizike, splošno teorijo relativnosti in kvantno mehaniko. Tudi glede pojma časa in njegove vloge v obeh teorijah ni enotnega mnenja, zato ostaja še dovolj prostora za nova odkritja v smislu druge Claretone misli: »Ko ugodni, a ostareli znanstveniki izjavljajo, da je nekaj mogoče, ima skoraj zagotovo prav. Ko izjavi, da je nekaj nemogoče, se zelo verjetno moti.«

Vsekakor pa je, v nasprotju s potovanjem v času, teleportacija teoretično možna, kot je bilo že leta 1993 prikazano v članku v pomembni fizikalni reviji, ki je podala teoretične osnove kvantne teleportacije. Že štiri leta kasneje sta dve raziskovalni skupini neodvisno enačbe eksperimentalno preverili in uspešno izvedli prve teleportacije kvantov svetlobe (fotonov). Medijsko je bila leta 2004 zelo odmevna prva teleportacija fotonov na večji razdalji, a ene na drugo stran Donave pri Dunaju. Seveda se ob tem vprašamo, kako je mogoče teleportirati, in predvsem, ali je to res možno.

Strajšljiva kvantna mehanika

Matematične osnove protokola kvantne teleportacije sicer niso zahtevne, vendar samo z besedami ni lahko korektno pojasniti osnovnih pojmov. Kljub temu da bomo kmalu praznovali sto let rojstnega dne kvantne mehanike, se v vsakdanjem življenju neposredno ne srečujemo s pojavi, ki jih brez uporabe kvantne mehanike ne moremo razumeti. Vsaj zavedamo se jih ne.

Na primer: mobilni telefon je električna naprava, vendar ne ta ktna kot kolesarska luč in dinamo, ki delujeta na temelju klasičnega elektromagnetizma, pojasnjenega že konec 19. stoletja, o katerem se otroci učijo v šoli. Vsak vitalni del mobilnega telefona je bil razvit na podlagi izračunov, ki temeljijo na uporabi kvantne mehanike. To velja za zaslone, ki energijo pretvo-

Znanstveno



Teleportacija Pojav, ki že dolgo zaposljuje znanstveno fantastiko, ima realno podlago v enačbah kvantne mehanike

čaranje s ščepcem kvantne mehanike

- Da je teleportacija teoretično možna, je bilo že leta 1993 prikazano v znanstvenem članku.
- Štiri leta kasneje sta dve skupini enačbe eksperimentalno potrdili, ko sta izvedli prve teleportacije fotonov.
- Za izvedbo kvantne teleportacije je treba uporabiti kvantno prepletenost delcev.
- Danes je kvantna prepletenost parov delcev osnovni gradnik vseh naprav kvantnih tehnologij.

in teleportacija je le en kamenček v kvantnem mozaiku.

Teleportacija v praksi

Vrnilo se k teleportaciji iz filmov in skušajmo z besedami približno pojasniti, kako bi lahko kvantno teleportirali elektron, kar je najpreprostejši primer delca z maso.

V prvem koraku vzamemo dva elektrona in ju zapremo v tako imenovano kvantno piko, to je z elektrodami omejen nanometrijski prostor na ploščici zelo čisteja silicija. Takšna kvantna pika ima vlogo teleportacijske omare iz filma *Muha*. Nato počakamo, da se elektrona povsem ohladi (da oddata svojo energijo), v kvantni piki skoraj mirujeta in postaneta kvantno prepletena (prav ta prepletenost je motila Einsteinu, danes pa je prepletenost par delcev osnovni gradnik vseh naprav kvantnih tehnologij).

V naslednjem koraku enega od elektronov spustimo iz kvantne pike in ga ujamemo v prenosno kvantno piko (drugo »omaro«). To omaro z elektronom vred odnesemo na poljubno oddaljeno mesto, tako da imamo zdaj na različnih krajih omari s po enim elektronom, ki pa sta med seboj kvantno prepletena.

Zamislimo si zdaj, da nam nekdo prinese elektron in nas prosijo, da ga teleportiramo na lokacijo prenosne omare. Elektroni so vsi enaki in neločljivi glede svojih lastnosti, razlikujejo pa se po svo-

»Sloveniji nameravamo razviti komponente za postavitve kvantne mreže, ki bo prek vozlišča v Ljubljani povezovala Dunaj, Zagreb in Trst.«

Prof. dr. Anton Ramšak Fakulteta za matematiko in fiziko



jem kvantnem stanju – spinu. Zato nam tega elektrona sploh ni treba fizično prestaviti v prostoru, ampak zadostič, da na elektron v oddaljeni omari prenesemo kvantno informacijo elektrona, ki naj se teleportira. To izvedemo tako, da prisenei elektron pridružimo tistemu v naši prvi omari in nato z obema elektronom po ustreznem protokolu izvedemo eksperiment. Izid eksperimenta sporočimo skrbniku omare na destinaciji teleportacije in v svoji omari izvede ustrezne operacije na elektronu, ki s tem prevzame kvantne lastno-

Teleportacija, kvantna prepletenost in še druge sestavine iz »čarovniške škatle« kvantne mehanike so osnovni elementi znanstvene čarovnije, ki bo v neprav oddaljeni prihodnosti postala realnost, kot so danes na primer mobilni telefoni. FOTO SHUTTERSTOCK

sti originalnega elektrona. Naj še omenimo, da pri tem ni bilo treba poznati kvantnega stanja teleportiranega elektrona, da se med postopkom originalni uniči in da je postopek s posameznim prepletenim parom mogoče izvesti le enkrat. V praksi se postopek izvaja s fotoni, ker jih je lahko transportirati po optičnih vlaknih.

Kako je torej s teleportacijo, kot jo poznamo iz filmov? Teleportirati znamo posamezne osnovne delce, za teleportacijo makroskopskih teles pa bi bilo treba prenesti tudi kvantno informacijo med sestavnimi delci, kar bi postopek bistveno otežilo. To sicer ni v nasprotju s kvantno mehaniko, je pa nepredstavljivo zapleteno. Teleportacija iz filmov bi torej potekala tako, da bi si vnaprej pripravili zadostno kvantno prepletenih parov osnovnih delcev, jih razdelili po svetu in jih med temi lokacijami poljubno teleportirali – ne fizično, saj so delci že na destinaciji. S kvantno čarovnijo bi lahko nerodostojno prenesli informacijo, tako da bi bil rezultat v drugi omari, na destinaciji, neločljiv od originala, katerega snov pa bi v razgrajeni obliki ostala v prvi omari.

Fizikalni zakoni, vendar še ne tehnologija, torej do neke mere dopuščajo izvedbo z dvema omarama iz filma *Muha*, medtem ko teleportacije z eno samo omaro, kot sta čarovnija Harryja Potterja in transporter iz *Zvezdnih stez*, ni mogoče izvesti na osnovi kvantne teleportacije.

Prenos informacij namesto teles

Za zdaj pri znanstvenih raziskavah ni poudarek na teleportaciji snovi v filmskem smislu, ampak na prenosu kvantnih informacij. Podobno kot pri teleportaciji fotonov so pri tem bistvene nenavadne lastnosti kvantne mehanike, predvsem kvantna prepletenost, ki obeta tako rekoč popolno varnost komunikacije.

Zato je bila leta 2019 v Evropski uniji ustanovljena mreža za evropsko kvantno komuniciranje. Fiziki, ki si pripravljajo za postavitev kvantne komunikacijske infrastrukture po vsej EU v prihodnjih desetih letih. V prvem koraku načrtujemo infrastrukturo za kvantno zaščito evropske ključne infrastrukture pred kibernetičnimi grožnjami. Cilj je sodelovanje članica skupine EuroQCI. Na Fakulteti za matematiko in fiziko smo se aktivno pridruživši raziskavam, in sicer prof. dr. Anton Ramšak v teoretičnem delu in prof. dr. Ralene Kalinčič v eksperimentalnem delu pri teleportaciji na Dunaju, z eksper-

Teleportirati znamo posamezne osnovne delce, za teleportacijo makroskopskih teles pa bi bilo treba prenesti tudi kvantno informacijo med sestavnimi delci, kar bi postopek bistveno otežilo.

mentalnim delom v novem fakultetnem laboratoriju za kvantno tehnologijo. Sodelujejo pa tudi magistrski in doktorski študenti.

V sodelovanju s skupinama prof. dr. Denisa Arčona s Fakultete za matematiko in fiziko UL in dr. Petra Jegliča z Inštituta Jožef Stefan ter s kolegi z Inštituta za fiziko na Univerzi v Zagrebu in Inštituta Rudjerja Boškovića nameravamo razviti komponente za postavitev kvantne mreže, ki bo prek vozlišča v Ljubljani povezovala Dunaj, Zagreb in Trst. Na Kitajskem so že leta 2016 izstrelili satelit Micius, ki je namenjen vzpostavitvi kvantne komunikacije tudi v okviru EuroQCI je poleg zemeljskih kvantnih povezav načrtovana mreža satelitov, ki bodo povezovali oddaljene strateške točke na evropski kvantni mreži.

Teleportacija, kvantna prepletenost in še druge sestavine iz »čarovniške škatle« kvantne mehanike so osnovni elementi znanstvene čarovnije, ki bo v neprav oddaljeni prihodnosti postala realnost, kot danes na primer mobilni telefoni, s katero se bomo srečevali vsak dan.

Prof. dr. Anton Ramšak s Fakultete za matematiko in fiziko UL predava kvantno mehaniko in je vodja temeljnega raziskovalnega projekta z razpisa ARRS za leto 2020 Razvoj komponent za vzpostavitev nove evropske mreže za kvantno komunikacijo.

rijo v barvno svetlobo, za spominkelemente in procesorje, v katerih na ravni nanometrijskih razdalj preskakujeta elektroni, pa tudi za istojonske baterije, ki so optimizirane na podlagi teoretičnih kvantnomehanskih simulacij.

Za izvedbo kvantne teleportacije je treba razumeti in uporabiti kvantno prepletenost delcev. Deset let po odkritju temeljnih enač kvantne mehanike je leta 1935 Albert Einstein s sodelavcema Borisom Podolskym in Nathansom Rosmom objavil članek, v katerem so izrazili dvome o kompletnosti takrat že določena uveljavljene kvantne mehanike. Iz enačb so zaključili, da formalizem kvantne mehanike vključuje v klasičnem, nekvantnem svetu nepoznano »strašljivo delovanje na daljavo«. Odkril so lastnost, ki jo je kasneje Erwin Schrödinger poimenoval prepletenost. V formalizmu kvantne mehanike uporabljamo enačbe, ki veljajo hkrati za vse delce, ki jih obravnavamo. V določeni primerih tako prenik ali zaslek enega samega delca spremeni enačbo, ki opisuje drug delec, četudi je ta na povsem drugem mestu, daleč stran. To je »strašljivo« delovanje na daljavo. Čarovnija ali le dovolj napredna tehnologija?

Čaraj in verjemi

Vprašanje kompletnosti kvantne mehanike je bilo lahko v tistem času le akademsko, saj se ni vedelo, kako bi sporne dele teorije ustrezno preverili z eksperimentom. Pojavili so se predlogi različnih interpretacij, najbolj znani sta Bohmova teorija skritih spremenljivk in Everettova kvantna teorija vzporednih svetov. Ti dve interpretaciji se glede opisa in napovedi rezultatov eksperimentov povsem ujemata z osnovno kopenhavsko kvantno mehaniko, ki jo slikovito opišemo z navodilom »močli in računa«. Ne razmišljaj, kako je mogoče to, kar enačbe napovedujejo, ampak izračunaj in verjemi napovedim. Do zdaj se je namerč-

izkazalo, da so bile napovedi kvantne mehanike vedno pravilne. Prelomno je bilo leto 1982, ko je skupina francoskih fizikov prvič eksperimentalno izvedla do takrat le miselne eksperimente Einsteina in Bohma. Mnogi so izid eksperimenta, ki je povsem potrdil napovedi kvantne mehanike, komentirali v smislu: »Le kaj bi Einstein rekel, če bi vedel za tak izid!«

Danes čarovnijo kvantne prepletenosti izvajamo v laboratorijih, kjer se pojav izkorišča v zvezi z raziskavami, ki bodo vodile do izdelave uporabnih kvantnih računalnikov, ki bodo v mnogih pogledih nepredstavljivo zmogljivejši od klasičnih. Smo še na začetku poti, vidijo se pa že prvi uporabni rezultati; prvi, za zdaj še zelo skromni kvantni računalniki, so v laboratorijih že »oživel«. S tem v zvezi bo treba razviti povsem nove naprave

