

KVANTNA TELEPORTACIJA

ANA MOČAN KOZINA

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

Članek obravnava kvantno teleportacijo - prenos informacij preko poljubno velike razdalje, z uporabo kvantne prepletenosti. V uvodu so predstavljeni EPR paradoks, kvantna prepletenost in razrešitev paradoksa z Bellovo neenakostjo. V nadaljevanju je razložena teorija kvantne teleportacije, kasneje pa so predstavljeni eksperimentalni dosežki na tem področju. Najprej se opiše prvi opravljeni eksperiment, nato tako imenovani The Vienna experiment, kjer so uspešno teleportirali foton preko 800 meterskega tunela pod Donavo, kasneje pa je omenjen še najnovejši eksperiment, tako imenovan Chip to Chip Teleportation, teleportacija med dvema računalniškima čipoma. Na koncu so na kratko predstavljene še ideje in načrti za prihodnost.

QUANTUM TELEPORTATION

This article talks about Quantum Teleportation - transfer of information across an arbitrary distance using quantum entanglement. In the Introduction, the EPR paradox is presented, along with quantum entanglement and the resolution of the paradox with Bell's inequality. Later on, the theory of quantum teleportation is explained and some of the experimental accomplishments are presented. First, the first successful quantum teleportation experiment is presented, then the so called Vienna experiment, where they teleported photons across 800 meter tunnel beneath the river Danube, and last, the so called Chip to Chip teleportation, teleportation between two computer chips, is presented. In conclusion, some plans and ideas for the future are discussed.

1. Uvod

Ko slišimo za teleportacijo, nas večina pomisli na znanstveno-fantastične filme, kjer junaki vstopijo v "teleporter" in se teleportirajo na drugo stran vesolja. Malo pa nas ve, da je teleportacija dejansko mogoča v kvantni mehaniki in je bila že večkrat izvedena eksperimentalno. Razlikuje se od splošne predstave o teleportaciji, saj gre v osnovi za teleportacijo podatkov in ne snovi same.

Teorija je v osnovi dokaj enostavna in znana že od leta 1993 [3], dandanes pa se zelo veliko dogaja na področju eksperimentalne kvantne teleportacije. V zadnjem letu (2019) sta bila na primer objavljena dva daljša članka [5, 4] na to temo, v prihodnosti pa jih lahko pričakujemo še mnogo več.

1.1 Diskusija med Bohrom in Einsteinom

V začetku 20. stoletja sta fiziko preobrazili dve revolucionarni teoriji - teorija relativnosti in kvantna mehanika. Prvo je začel Albert Einstein, ko je s svojo teorijo relativnosti spremenil naš pogled na makroskopski svet ter povezavo med časom, prostorom in snovjo. Druga teorija, kvantna mehanika, ki obravnava mikroskopski svet atomov in osnovnih delcev, je svojo prvotno zaključeno obliko dobila leta 1927, ko jo je eden od ustanoviteljev, Niels Bohr, predstavil v predavanju na Solvayski konferenci v Bruslju. Namen predavanja je bil pokazati, da kvantna mehanika ni le skupek dognanj, temveč kompletna in temeljna teorija snovi.

Teorija je v Einsteinu sprva vzbudila dvom, kasneje pa pravo neodobravanje. Po Bohrovem predavanju mu je tudi javno nasprotoval, rekoč, da bi kvantna mehanika lahko bila prehodna in delna osnova na poti k spoznavanju mikro sveta, vsekakor pa ne more biti končna temeljna teorija. Po njegovem mnenju je vsaka temeljna teorija deterministična in tako kvantna mehanika, s svojo neizogibno verjetnostjo, ne more biti prav [2]. Leta 1935 je skupaj z Borisom Podolskym in Nathanom

Rosenom strnil svoje argumente v članku [6] z naslovom “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?”. Bistvo članka predstavlja njihov argument, da med fizičnimi sistemi obstajajo samo lokalne in vzročne interakcije. Njihove dileme lahko lepo pokažemo na primeru kvantne prepletenosti.

1.2 Kvantna prepletenost

Vzemimo delec s spinom $\frac{1}{2}$. Njegovo valovno stanje ψ lahko v Hilbertovem prostoru zapišemo kot linearno kombinacijo baznih vektorjev $|\uparrow\rangle$ in $|\downarrow\rangle$

$$|\psi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle, \quad (1)$$

kjer sta a in b kompleksni števili in kvadrat njune velikosti predstavlja verjetnost, da delec izmerimo v tistem lastnem stanju. Hkrati mora veljati $|a|^2 + |b|^2 = 1$, saj je verjetnost, da izmerimo eno ali drugo stanje, enaka ena.

Obravnavajmo sedaj dva delca s spinom $\frac{1}{2}$. Sistem dveh delcev lahko opišemo z

$$|\psi\rangle = a|\uparrow\uparrow\rangle + b|\uparrow\downarrow\rangle + c|\downarrow\uparrow\rangle + d|\downarrow\downarrow\rangle, \quad (2)$$

kjer se prva puščica nanaša na prvi delec, druga na drugega in kjer so a , b , c in d kompleksna števila, katerih kvadrat velikosti spet predstavlja verjetnost, da delec izmerimo v tistem stanju. Posledično je spet $|a|^2 + |b|^2 + |c|^2 + |d|^2 = 1$. Če sistem lahko zapišemo v obliki $(a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle)(c|\uparrow\rangle + d|\downarrow\rangle)$, pravimo, da je delec v produktnem stanju. Nasprotno pravimo, da sta delca v prepletenem stanju. Nekatera prepletena stanja lahko na primer zapišemo z Bellovimi stanji

$$|\Phi_{12}^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\rangle) \quad (3)$$

$$|\Phi_{12}^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\uparrow\rangle - |\downarrow\downarrow\rangle) \quad (4)$$

$$|\Psi_{12}^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle) \quad (5)$$

$$|\Psi_{12}^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle), \quad (6)$$

kjer so prva tri stanja triplet (celoten spin stanj je 1), zadnje pa singlet (celoten spin je 0). Singlet je stanje z najmanjšo energijo in je zato v naravi najbolj pogosto in ga največkrat zapišemo, ko govorimo o prepletenem stanju.

Ko sta delca v prepletenem stanju, stanja enega delca ne moremo opisati neodvisno od drugega. Lahko opišemo sistem kot celoto, saj je v čistem stanju, čeprav sestavna dela nista. Delca lahko ločimo s poljubno razdaljo in bosta kljub temu ostala prepletena. Šele ko na enem izmed delcev opravimo meritve, valovna funkcija sistema kolapsira v osnovna, čista stanja. Če bomo tako merili spin prvega delca v vertikalni smeri in mu izmerili spin gor, vemo, da bo zaradi ohranitve vrtilne količine, drugi delec imel spin dol (če ga merimo v isti smeri). Einsteina je zelo motila misel, da lahko izbira meritve prvega delca vpliva na drugega, poljubno daleč stran, v trenutku. Temu je slavno rekel “spooky action at a distance”. Kot poizkus dopolnitve kvantne mehanike je predlagal skrivne spremenljivke - to naj bi bile spremenljivke, ki jih mi še ne poznamo, a naj bi vnaprej določale izid meritev. Delci naj bi tako že vnaprej imeli določene vrednosti spina za meritve v vseh možnih smereh.

1.3 Bellova neenakost

Rešitev tega konflikta je leta 1964 predstavil John Bell, ki je iz predpostavke, da je svet klasičen, izpeljal svojo slavno neenakost [1]

$$S = |\langle a(\theta_A)b(\theta_B) \rangle + \langle a(\theta_A)b(\theta'_B) \rangle + \langle a(\theta'_A)b(\theta_B) \rangle - \langle a(\theta'_A)b(\theta'_B) \rangle| \leq 2, \quad (7)$$

kjer sta $a(\theta_A)$ in $b(\theta_B)$ rezultata meritve prepletenih delcev A in B pod kotoma θ_A in θ_B ter $a(\theta'_A)$ in $b(\theta'_B)$ rezultata meritve po zasuku za kota θ'_A in θ'_B . Neenakost velja le, če je svet klasičen, torej da je svet realen in determinističen. Pri realizmu velja, da so vse količine, ki jih lahko izmerimo, dobro definirane, pri determinizmu pa, da so rezultati meritev določeni s skritimi spremenljivkami.

Neenakost se da eksperimentalno preizkusiti in vsi dosedanji eksperimenti zavračajo obstoj lokalnih skritih spremenljivk in tako potrjujejo kvantno mehaniko kot polno teorijo mikroskopske fizike. Ali to pomeni, da kvantna mehanika krši relativistično limito in se lahko informacije širijo hitreje od svetlobne hitrosti? V nadaljevanju bomo pokazali, da ne.

2. Teorija

Kvantna teleportacija je način prenosa podatkov oziroma kvantnih stanj, ne da bi ob tem dejansko prenašali snovne delce. Tu lahko prenesemo stanje na lokacijo, za katero niti ne vemo, kje se nahaja. Recimo, da ima Ana delec s spinom $\frac{1}{2}$ v neznanem stanju Ψ :

$$|\Psi_1\rangle = \alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle. \quad (8)$$

Pravimo, da ima kubit¹ informacij. Želela bi ga prenesti Blažu, pa na primer ne ve, kje se nahaja, ali pa nima boljšega načina transportacije, tako se lahko posluži kvantne teleportacije. Za uspešno teleportacijo potrebujeta Ana in Blaž še dva maksimalno prepletena delca

$$|\Psi_{23}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle), \quad (9)$$

drugi je pri Ani, tretji pa pri Blažu. Produktno stanje sistema vseh treh delcev lahko zapišemo kot

$$|\Psi_{123}\rangle \equiv |\Psi_1\rangle|\Psi_{23}\rangle = \frac{\alpha}{\sqrt{2}}(|\uparrow\uparrow\downarrow\rangle - |\uparrow\downarrow\uparrow\rangle) + \frac{\beta}{\sqrt{2}}(|\downarrow\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\downarrow\uparrow\rangle), \quad (10)$$

vendar prepletena delca še nimata nobene informacije o prvem, neznanem delcu. Da bi Ana povezala delca v njeni lasti, opravi meritve v Bellovi bazi

$$|\Psi_{12}^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) \quad (11)$$

$$|\Psi_{12}^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle) \quad (12)$$

$$|\Phi_{12}^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\uparrow\rangle - |\downarrow\downarrow\rangle) \quad (13)$$

$$|\Phi_{12}^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\rangle). \quad (14)$$

¹Kubit ali kvantni bit je osnovna enota kvantnih informacij, podana z dvema parametroma a in b, ki opisujeta kvantno stanje - glej enačbo (1)

²Prepletena delca, ki si ju delita Ana in Blaž, bi bila lahko tudi v katerem drugem prepletenem stanju, nadaljni računi bi bili analogni.

Z opravljeno meritvijo se bo prvotna prepletenost drugega in tretjega delca podrla in sistem vseh treh delcev bo kolapsiral v enega od spodnjih štirih stanj, z verjetnostjo $\frac{1}{4}$

$$|\Psi_{123}\rangle = |\Psi_{12}^-\rangle(-\alpha|\uparrow\rangle - \beta|\downarrow\rangle) \quad (15)$$

$$|\Psi_{123}\rangle = |\Psi_{12}^+\rangle(-\alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle) \quad (16)$$

$$|\Psi_{123}\rangle = |\Phi_{12}^-\rangle(\alpha|\downarrow\rangle + \beta|\uparrow\rangle) \quad (17)$$

$$|\Psi_{123}\rangle = |\Phi_{12}^+\rangle(\alpha|\downarrow\rangle - \beta|\uparrow\rangle). \quad (18)$$

Opazimo lahko, da bo Blažev delec v stanju, ki izgleda zelo podobno prvotnemu stanju, ki ga je Ana želela teleportirati, ni pa še enako. Da bi Blažev delec zavzel stanje prvega, neznanega delca, mora Blaž prej narediti še unitarno transformacijo, odvisno od izida Anine meritve. Tako mu mora Ana sporočiti rezultat preko kanala klasične komunikacije. Če bi Blaž poskusil uganiti izid meritve in izvedel napačno transformacijo, bi delec končal v maksimalno prepletenem stanju. Klasična komunikacija je tako ključnega pomena pri teleportaciji in s tem vzdržuje relativistično limito, torej da podatki ne morejo potovati hitreje od hitrosti svetlobe.

Tabela 1. Blaž mora torej opraviti eno od naslednjih transformacij, glede na izid Anine meritve:

Rezultat Anine meritve	Blaževa transformacija
$ \Psi_{12}^-\rangle$	I
$ \Psi_{12}^+\rangle$	σ_z
$ \Phi_{12}^-\rangle$	σ_x
$ \Phi_{12}^+\rangle$	σ_y

V zgornji tabeli so σ_x , σ_y in σ_z Paulijeve matrice, ki predstavljajo rotacijo za 180° okrog pripadajoče osi, I pa je 2×2 identična matrika.

Preverimo, če zgornje transformacije res držijo. Rotacijo okrog osi \vec{n} za kot φ lahko zapišemo kot

$$e^{-i\frac{\varphi}{2}(\vec{n}\vec{\sigma})} = \cos\frac{\varphi}{2}I - i\sin\frac{\varphi}{2}\vec{n}\vec{\sigma}, \quad (19)$$

kjer je $\vec{\sigma}$ vektor s komponentami σ_x , σ_y in σ_z . Če je rezultat Anine meritve $|\Phi_{12}^+\rangle$ nam pravi tabela, da moramo opraviti transformacijo σ_y , torej zavrteti za kot 180° okrog osi y . φ bo torej enak π in $\vec{n} = (0, 1, 0)$. Na bazna vektorja $|\uparrow\rangle$ in $|\downarrow\rangle$ transformacija deluje kot

$$e^{-i\frac{\varphi}{2}(\vec{n}\vec{\sigma})}|\uparrow\rangle = |\downarrow\rangle \quad (20)$$

$$e^{-i\frac{\varphi}{2}(\vec{n}\vec{\sigma})}|\downarrow\rangle = -|\uparrow\rangle \quad (21)$$

Če Ana izmeri stanje $|\Phi_{12}^+\rangle$, bo Blažev delec v stanju

$$|\Psi_3\rangle = \alpha|\downarrow\rangle - \beta|\uparrow\rangle. \quad (22)$$

Ko na njem opravimo zgoraj opisano transformacijo, bo Blažev delec v stanju

$$|\Psi_3\rangle = -(\alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle), \quad (23)$$

kar pa je ravno to, kar smo hoteli.

Po končani teleportaciji je Blažev delec v neznanem stanju prvega delca, ki je bil teleportiran, Anina delca pa sta v maksimalno prepletenem stanju. S tem smo upoštevali tudi tako imenovan "no cloning teorem", ki pomeni, da se kvantnega stanja ne da kopirati brez destrukcije originala. Smo pa s tem uničili oziroma porabili naš "teleporter", saj drugi in tretji delec nista več prepletena. Če bi Ana in Blaž želela teleportacijo ponoviti, bi rabila nov par prepletenih delcev.

V tem poglavju smo razložili teleportacijo enega samega delca. Ekvivalentno bi lahko postopek ponovili tudi z n delci, le da bi v tem primeru Ana in Blaž potrebovala vsak n maksimalno prepletenih parov, kar pa znatno zakomplicira izračune.

3. Eksperimenti

Po izidu članka [3], ki je postavil temelje teoriji kvantne teleportacije, so eksperimentalni fiziki z veliko vnemo poizkušali teleportacijo tudi eksperimentalno potrditi. Kljub temu, da je teorija dokaj enostavna, je v praksi vse prej kot to. Lahko si predstavljamo, da je težko ustvariti stabilen prepleten par, ga nemotenega transportirati in opraviti Bellove meritve. Za izvedbo eksperimentov raje uporabljamo svetlobo³, saj veliko lažje manipuliramo z njo, kot s snovnimi delci.

Opisali bomo tri eksperimente, ki so še posebej pomembni na poti k realizaciji kvantnih računalnikov in kvantnega interneta, ki sta cilj raziskovalne kvantne mehanike že kar nekaj časa. Prvi eksperiment dokaže, da je kvantna teleportacija mogoča. Drugi eksperiment izvede teleportacijo preko daljše razdalje v nelaboratorijskih pogojih in s tem stopi korak bližje povezavi med oddaljenimi računalniki. V tretjem eksperimentu dosežejo teleportacijo med dvema računalniškima čipoma in so s tem na poti k kvantnim računalnikom, v obetih za prihodnost pa načrtujejo povezavo med večjimi evropskimi mesti, da bi ustvarili kvantno mrežo.

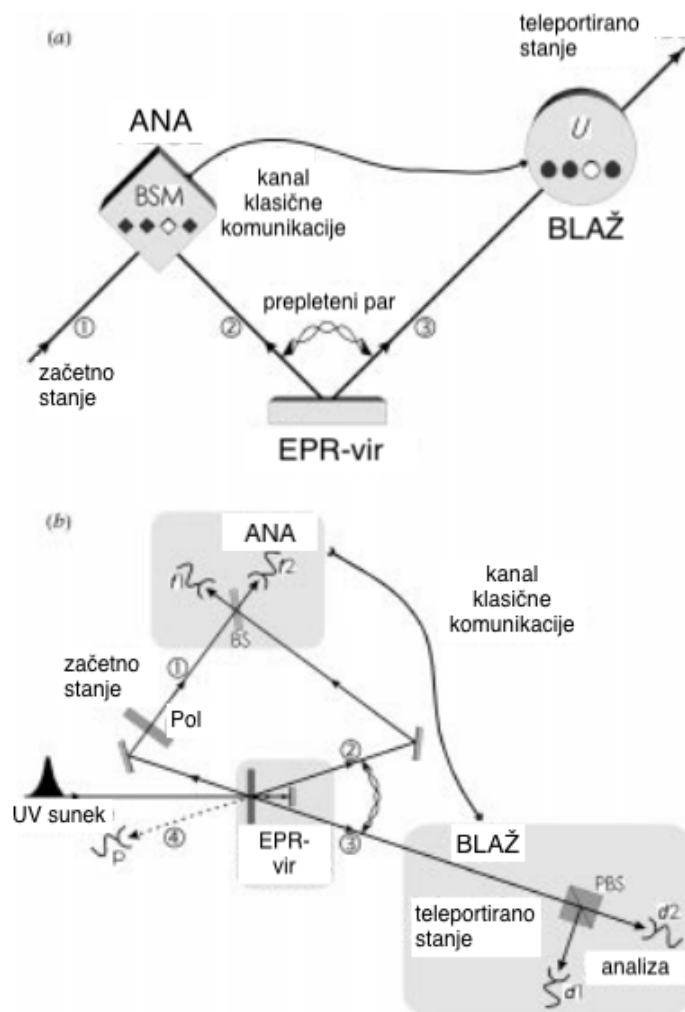
3.1 Eksperimentalni začetki

Decembra 1997, dobra štiri leta po izidu članka s teorijo, je bil objavljen članek [7] z naslovom *Experimental Quantum Teleportation*, ki je naznanil prvi uspeh v eksperimentalni kvantni teleportaciji. Shema eksperimenta prikazuje Slika 1.

Pare polarizacijsko prepletenih fotonov so ustvarili s pomočjo spontane parametrične pretvorbe navzdol, tipa II. Z ultravijoličnim žarkom, s sunki dolžine 200 fs in valovno dolžino 490 nm, so posvetili na nelinearni kristal beta barijev borat ali BBO, ki je pretvoril vhodni foton v dva fotona nižje energije. Vhodni snop se po prehodu skozi kristal razdeli v dva stožca, prvi redno polariziran in drugi izredno. Na premicah, kjer se stožca prekrivata, najdemo polarizacijsko prepletene fotone, ki služijo kot pari prepletenih delcev.

Po odboju, ki se zgodi ob drugem prehodu žarka skozi kristal, ultravijolični sunek ustvari še en par fotonov, kjer bo en foton pripravljen v začetni fazi 1 za teleportacijo, drugi pa bo služil kot

³Za izvedbo eksperimenta potrebujemo delce, ki imajo dve ortogonalni lastni stanji; to so lahko delci s spinom $\frac{1}{2}$, ki lahko zavzamejo vrednosti $|\uparrow\rangle$ ali $|\downarrow\rangle$, kot smo jih v razlagi uporabljali dosedaj, lahko pa za eksperimente uporabljamo fotone in njihovo polarizacijo, ki lahko zavzame vrednosti $|\uparrow\rangle$ ali $|\rightarrow\rangle$.



Slika 1. Princip kvantne teleportacije: a) shema; b) postavitve eksperimenta). Slika je povzeta po [7].

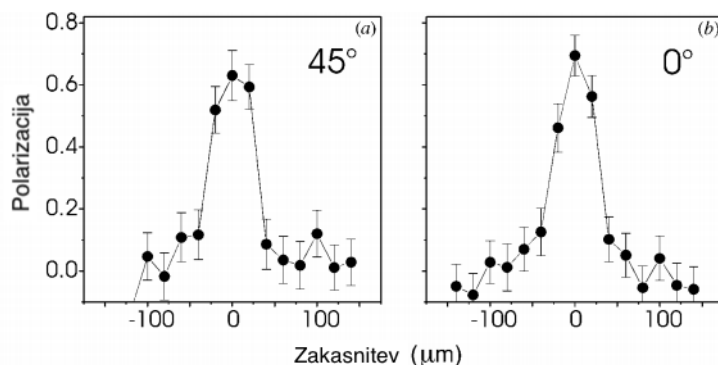
sprožilec, ki nakazuje, da je foton, ki se teleportira, na poti.

Izvedba Bellove meritve je bila najtežji del eksperimenta. Izvedli so jo z delilnikom žarka pri Ani in merili koincenco na obeh straneh delilnika, ki se zgodi, ko se oba fotona odbijeta ali pa sta oba prepuščena skozi. To se zgodi le pri valovni funkciji, ki ima antisimetričen prostorski del. S koincidenčno detekcijo lahko torej zaznamo le stanje $|\Psi^-\rangle$. Ob nastavitvi popolnega prekritja med fotonoma pri delilniku žarka, lahko prenesemo stanje (polarizacijo) prvega delca na tretjega.

Ko Ana zazna koincenco, uporabi klasičen kanal komunikacije in izid sporoči Blažu. Za preverjanje uspeha teleportacije je pri njem analizator polarizacije. Prvi foton, ki se teleportira, lahko pred Bellovo meritvijo pošljemo skozi polarizator in tako poznamo njegovo stanje, ki ga kasneje primerjamo z meritvijo pri Blažu. Rezultati eksperimenta so prikazani na Sliki 2.

Ta eksperiment je zelo pomemben, saj je dokazal, da se kvantno teleportacijo res da izvesti. Odprl je vrata za nadaljne raziskovanje kvantnih tehnologij.

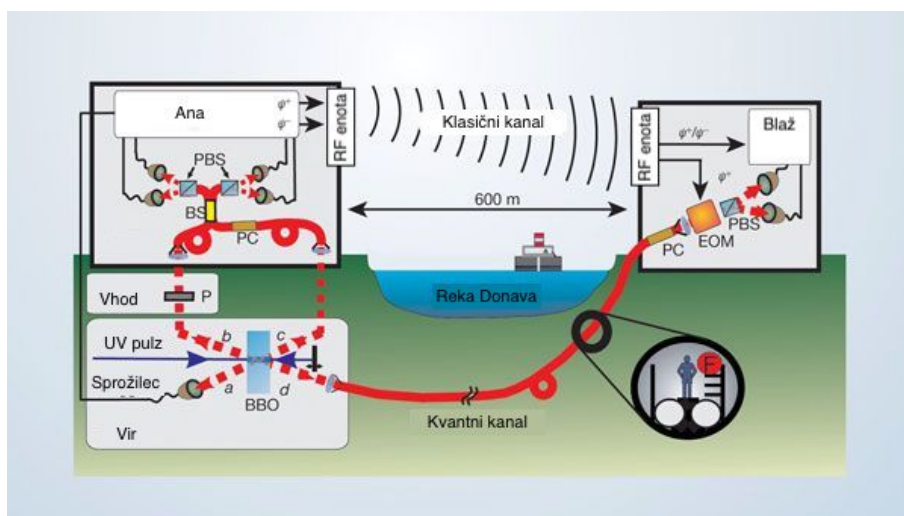
Kvantna teleportacija



Slika 2. Slika prikazuje stopnjo polarizacije tretjega delca v odvisnosti od zakasnitve med prvim in drugim fotonom pri analizatorju Bellovih stanj. Pri nični zakasnitvi so dosegli približno 70% polarizacije v smeri polarizacije prvega fotona. Dve meritvi neortogonalnih polarizacij prvega fotona: a) 45° in b) 0° dokazujeta, da je mogoče teleportirati kakršnokoli polarizacijo. Slika je povzeta po [7].

3.2 Teleportacija pod reko Donavo

Naslednji eksperiment, ki ga bomo predstavili, je tako imenovani “The Vienna experiment” [8]. V eksperimentu so leta 2004 izvedli teleportacijo po 800 m dolgem optičnem kablu, položenem v kanalizacijski jašek pod reko Donavo - shema je prikazana na Sliki 3. Eksperiment je dosegel svojo slavo predvsem zaradi odličnih rezultatov, kljub resničnim, nepopolnim pogojem, kot so temperaturne fluktuacije in ostali okoliški faktorji.



Slika 3. Slika prikazuje shemo eksperimenta pod reko Donavo. Povzeta je bila po [8].

V osnovi je eksperiment enak kot prvi. Glavna razlika je v razdalji med Ano in Blažem in posledični zakasnitvi - klasični signal (v radio-frekvenčnih enotah) je prišel do Blaža $1,5 \mu s$ pred kvantnim fotonom, zaradi zmanjšane hitrosti svetlobe v optičnih vlaknih. Ko je Ana izmerila enega od dveh prepoznavnih Bellovih stanj, je Blažu poslala svoje sporočilo, ta pa je z elektro-optičnim modulatorjem transformiral prejeti foton v neznano stanje prvega delca. Če je Ana na primer izmerila stanje $|\Psi_{12}^+\rangle$, je Blaž z napetostnim sunkom na elektro-optičnem modulatorju ustvaril fazni zamik π med vodoravno in navpično komponento prejetega fotona in tako dobil stanje prvega.

Eksperiment je dosegel neverjetno 90% zanesljivost pri 45° polarizaciji fotonov, kjer je vsaka meritev trajala 28 ur. Brez Blaževe transformacije je opažena zanesljivost padla na 59%, namesto klasično pričakovane 50% vrednosti, kar dokazuje doseženo teleportacijo.

3.3 Teleportacija med računalniškima čipoma

Velik korak v eksperimentalni kvantni teleportaciji predstavlja tudi članek “Chip to chip teleportation”, kjer je skupinoma iz Bristola in Pekinga uspelo teleportirati štiri kubite informacij med dvema računalniškima čipoma.

V članku [4], ki je izšel decembra 2019, so predstavili kvantno teleportacijo med dvema čipoma in resnično, večdelčno prepletenost na silikonsko-fotonskem vezju. Uspelo jim je generirati, obdelati, prejeti in izmeriti več fotonsko prepleteno stanje na mikrometerskih silikonskih čipih in teleportirati stanja med njimi, kar je izjemen dosežek, predvsem zaradi tako majhnega merila.

Najprej so na prvem čipu z vrsto mikroresonančnih virov ustvarili štiri nerazločljive samostojne fotone visoke kvalitete. Prvi foton služi kot sprožilec, drugega želimo teleportirati, tretji in četrti pa tvorita prepleten par, preko katerega se izvede teleportacija. Ko so ustvarili štiri fotone, so najprej prepletli tretjega in četrtega z reprogramabilnim operatorjem na prvem čipu in nato četrti foton poslali na čip prejemnik po 10 m optičnem kablu. Nato so z drugim operatorjem izvedli Bellovo meritev na drugem in tretjem delcu in izid poslali na čip prejemnik, kjer so opravili potrebno transformacijo, da je četrti foton prevzel stanje drugega. Eksperiment je dosegel kar 91% zanesljivost, torej so bile skoraj vse informacije prenesene med čipoma.

Članek je postavil temelje za nadaljno delo z integriranimi fotonskimi kvantnimi tehnologijami, predvsem za razvoj kvantnih vezij in računalnikov.

3.4 Obeti za prihodnost

Raziskovalna skupina naše fakultete je ravno pred kratkim zaprosila za sredstva za nov projekt in sicer za kvantno povezavo med Ljubljano in Zagrebom. Končna ideja je, da bi bila večja evropska mesta med sabo povezana v kvantno mrežo, kot prikazuje spodnja slika.

Pri tem projektu ne bi šlo za točno tako teleportacijo, kot smo jo obravnavali do sedaj, ampak za tako imenovano zamenjavo prepletenosti - želijo teleportirati prepletenost. Za kvantno omrežje je deljenje prepletenih parov ključnega pomena. Težave nastopijo pri velikih razdaljah, saj so vmes ogromne izgube - približno 0,2 dB na kilometer. Tako je izkoristek

$$\eta = 10^{-\frac{0,2d}{10}}, \quad (24)$$

kjer je d razdalja v kilometrih. S trenutnimi tehnologijami optičnih vlaken je maksimalna razdalja 300 km. Ena od rešitev je zamenjava prepletenosti, kjer celotno razdaljo med A in B razdelimo na več kratkih razdalj in imamo vmes več virov prepletenih fotonov. Prepletenost tako delimo po delih - med A in prvo vmesno postajo, med prvo in drugo in tako naprej, tako da na koncu dosežemo deljen prepleteni par med A in B, preko celotne verige. Kljub temu, da s tem delno rešimo problem, bodo izgube med njimi vseeno prisotne. Zato potrebujemo poleg zamenjave prepletenosti še kvantni spomin, kamor lahko shranimo uspeli prepleteni par. Kvantni spomin je potreben iz dveh razlogov. Prvič zato, ker ko pošiljamo prepletena fotona, dobimo prepletenost med dvema postajama le v



Slika 4. Slika prikazuje obstoječe in načrtovane komunikacijske povezave, ki so del sodelovanja QUAPITAL. Edine trenutno obstoječe povezave so na zamljevidu prikazane z zeleno, vendar ne vsebujejo kvantnih spominov. Z rumeno je označena povezava med Ljubljano in Zagrebom, za katero čakajo na odobritev sredstev. Povezava bi izkoristila že obstoječo telekom infrastrukturo.

nekem trenutku, torej bi lahko le takrat poslali naše sporočilo. S kvantnim spominom pa lahko shranimo prepleten par in lahko sporočilo pošljemo kadar želimo. Drugi razlog za kvantni spomin pa je, da je veriga med A in B uporabna le, če delujejo vsi členi, torej če si vse postaje med seboj delijo prepletene pare. Zaradi izgub je izredno težko hkrati vzpostaviti prepletenost med vsemi postajami; s kvantnim spominom lahko pri vsaki postaji shranimo prepleteni par, dokler nimamo vzpostavljene povezave preko celotne verige. Sistem zamenjave prepletenosti in kvantnega spomina, ki smo ga ravnokar opisali, se imenuje “quantum repeater”, oz kvantni ponavljalnik. Za vzpostavitev učinkovite povezave bi potrebovali kvantni ponavljalnik na približno vsakem kilometru, kar pa je izjemno drago. Alternativa je, da med postajami ne delimo le enega prepletenega para fotonov ampak več in s procesom destilacije izluščimo boljšo prepletenost.

Projekt trenutno čaka na odobritev sredstev. V kolikor dobijo financiranje, ocenjujejo, da bo projekt izpeljan v približno treh letih. Prvo leto in pol bo namenjeno ustvarjanju virov prepletenosti, nato bodo preizkusili dva različna sistema kvantnega spomina. Prvi je na osnovi cezijevih atomov, drugi pa na Rubidijevih. Tu se pojavi še ena ovira, saj imajo atomi drugačno resonančno valovno dolžino od tiste, ki je primerna za transportiranje preko dolgih razdalj po optičnih kabljih, zato vmes potrebujemo še konverterje, ki pa so zelo zapleteni, saj gre za posamične atome. Ta postopek naj bi trajal od pol leta do enega leta in na koncu še povezava celotnega sistema in demonstracija delovanja.

4. Zaključek

Kvantna teleportacija ni le mit iz znanstveno fantastičnih filmov, ampak hitro-razvijajoča se tehnologija z ogromnimi implikacijami za prihodnost komunikacije in računalništva. Eden od ciljev je kvantni internet, ki naj bi predvidoma postal platforma za procesiranje informacij naslednje generacije. Obeta varno komunikacijo in eksponenten porast hitrosti v porazdeljenih računalniških sistemih. Kvantna teleportacija je ključna za uresničitev takšne globalne platforme, ker omogoča pošiljanje samostojnih kubitov preko poljubnih razdalj do naslovnika čigar lokacija ni poznana.

Smo pa še daleč od uresničitve. Kot pravi prof. Ramšak: “Ko sem bil jaz študent so nam pravili,

da bomo imeli fusijsko elektrarno čez 30 let, zdaj še vedno govorimo enako. Upam, da ne bo tako tudi s kvantnim internetom.”

LITERATURA

- [1] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloe, *Quantum Mechanics, volume 2*, Wiley-VCH (1992).
- [2] J. Audretsch, R. Blatt and others, *Entangled World*, Wiley-VCH (2002).
- [3] C. H. Bennett, G. Brassard, and others, *Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein–Podolsky–Rosen Channels*, Physical Review Letters **70** (1993), 13–18.
- [4] Llewellyn, D., Ding, Y., Faruque and others, *Chip-to-chip quantum teleportation and multi-photon entanglement in silicon*, Nature **16** (2019), 148–153.
- [5] Y. Luo, H. Zhong, M. Erhard and others, *Quantum Teleportation in High Dimensions*, Physical Review Letters **123** (2019).
- [6] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, Physical Review Letters **74** (1935).
- [7] D. Bouwmeester, J. Pan, K. Mattle and others, *Experimental Quantum Teleportation*, Nature **390** (1997), 575–579.
- [8] R. Ursin, T. Jennewein, R. Kaltenbaek and others, *Quantum teleportation across the Danube*, Nature **430** (2004), 849.
- [9] P. Moreau, E. Toninelli, T. Gregory and others, *Imaging Bell-type nonlocal behavior*, Science Advances **5** (2019).