

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za matematiko in fiziko
Oddelek za fiziko

Seminar
4. letnik

Eksperimentalno preverjanje kvantne prepletenosti na velikih razdaljah

Avtor: Anja Lautar
Mentor: Anton Ramšak
Ljubljana, 12. maj 2010

Povzetek

V uvodu seminarja je predstavljena kvantna prepletenost, fundamentalna lastnost kvantne mehanike, EPR paradoks, s katerim so hoteli dokazati, da kvantna mehanika ne drži, ter Bellove neenačbe, ki so dokončno potrdile verodostojnost kvantne mehanike.

V nadaljevanju so predstavljeni eksperimenti, ki so dokazali kršitev Bellove neenakosti. Posebno pozornost bomo posvetili eksperimentu iz leta 2007, pri katerem so na Tenerifih izvedli kvantno komunikacijo na osnovi prepletenosti prosto po zraku na oddaljenosti 144km. Na hitro si bomo ogledali podoben eksperiment iz leta 2009.

Kazalo

1	Uvod	3
1.1	Kvantna prepletenost	3
1.2	EPR paradoks	4
1.3	Bellove neenačbe	5
2	Odločilni eksperiment iz leta 1982	6
3	Ponovljeni izboljšani eksperiment leta 1998	7
4	Kvantna komunikacija na razdalji 144km	9
4.1	Ustvarjanje prepletenega para	9
4.2	Težave pri prostem prenosu po zraku	10
4.3	Detekcija fotonov	12
4.4	Preverjanje prepletenosti	13
4.5	Izboljšan ponovljen eksperiment	15
5	Zaključek	16
6	Zahvale	17

1 Uvod

1.1 Kvantna prepletenost

V ozadju kršitve Bellove neenakosti se skriva kvantna prepletenost, katera je le ena izmed elementov kvantne fizike, ki nima analogije v klasični fiziki.

Da bi si pojem prepletenosti približali si oglejmo delca s polovičnim spinom z ortonormiranima bazama $|\uparrow\rangle_A, |\downarrow\rangle_A$ v Hilbertovem prostoru H_A in $|\uparrow\rangle_B, |\downarrow\rangle_B$ v Hilbertovem prostoru H_B . Skupni prostor H_{AB} napenjajo štirje bazni vektorji $|\uparrow\uparrow\rangle, |\uparrow\downarrow\rangle, |\downarrow\uparrow\rangle$ in $|\downarrow\downarrow\rangle$.

Če je skupna valovna funkcija $|\psi\rangle$ ekvivalentna enemu od baznih vektorjev, potem jo lahko razstavimo na produkt valovnih funkcij posameznih delcev. Pravimo, da je $|\psi\rangle$ produktno stanje.

Za razliko od produktnega stanja obstaja tudi prepleteno stanje, katerega ni mogoče razstaviti na produktno stanje delcev. Prepletena stanja v ortonormirani bazi lahko zapišemo z Bellovimi stanji:

$$\begin{aligned} |\phi^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\rangle) \\ |\phi^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\uparrow\rangle - |\downarrow\downarrow\rangle) \\ |\psi^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle) \\ |\psi^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) \end{aligned}$$

Prva tri stanja imenujemo triplet (stanja s celotnim spinom 1), zadnjega pa singlet (stanje s celotnim spinom 0). Singlet je stanje z najmanjšo energijo in je v naravi najbolj pogosto. Če imamo npr. atom z dvema elektronoma v osnovnem stanju, sta v singletnem stanju.

Posameznem delcu v prepletenem paru ne moremo pripisati čistega kvantnega stanja (čeprav je skupno stanje čisto). Zaradi tega moramo stanje enega delca opisati s sklicevanjem na stanje drugega, kar pripelje do korelacije med delcema tudi če sta fizično ločena. To pomeni, da vsaka meritve vpliva na oba delca hkrati[1]. Recimo, da izmerimo spin $+\frac{1}{2}$ delcu iz prepletenega para. Valovna funkcija takoj kolapsira in vemo, da je spin drugega delca iz prepletenega para $-\frac{1}{2}$. Izkaže se, da to ne nasprotuje posebni teoriji relativnosti, saj prepletenih stanj ne moremo izkoristiti za komunikacijo na razdaljo, ker je rezultat meritve popolnoma naključen in ga ne moremo predvideti. V kvantni informacijski tehnologiji je to spoznanje zajeto v t.i. "no communication" teoremu, kateri prepoveduje izkoriščanje kršitve Bellove neenakosti za izmenjavo informacij hitreje od hitrosti svetlobe.

Kljub temu je prepletenost ključna na nekaterih novih tehnoloških področjih, kot je kvantna kriptografija, s pomočjo katere vzpostavimo brezpogojno varen ključ, in kvantna teleportacija, s pomočjo katere lahko teleportiramo stanje neznanega delca. Kvantna prepletenost je tudi pomembna sestavina kvantnega računalništva[2].

1.2 EPR paradoks

Bistvena razlika med kvantno in klasično obravnavo narave je v determinizmu. Pri kvantnem pristopu se zdi, da je nedoločenost postala temeljna lastnost same narave, kar pomeni, da sistem pred meritvijo nima dobro določenih vrednosti vseh merljivih količin. Vprašanje ali je to res ali pa je le posledica meritve, ki sistem nujno vedno zmoti, je bilo v najbolj odmevni obliki zastavljeno leta 1935 v članku Einsteina, Podolskega in Rosena¹. Vprašanje je postalo znano pod imenom EPR-paradoks[3]. V članku[4] (Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?) niso pod vprašaj postavljali napovedi kvantne mehanike, ki se ujema z eksperimenti, ampak je šlo za napad na doktrino, da fizikalne lastnosti v splošnem nimajo objektivne resničnosti neodvisno od meritve. Opazovanje tako ne le zmoti merjeno količino, ampak jo ustvari.

Kriterij za uspešno teorijo po EPR-ju je:

- Pravilnost: napovedi teorije se morajo ujemati z eksperimenti.
- Kompletnost: vsakemu elementu fizikalne resničnosti ustreza element teorije.

Element fizikalne resničnosti pripada vsaki fizikalni količini, katere vrednost lahko z gotovostjo napovemo ne da bi pri tem kakorkoli zmotili sistem. To pomeni, da se merjenec mora nahajati v lastnem stanju ustreznega operatorja, kar mora kasnejša meritev potrditi. Ker stanja merjenega sistema ne smemo spremeniti, moramo do poznavanja vrednosti merjene količine priti ne da bi jo direktno pomerili. Heisenbergovo načelo nedoločenosti nam prepoveduje hkratno poznavanje vrednosti obeh fizikalnih količin, ki pripadata paru komplementarnih operatorjev. Stanje delca torej ne more biti lastno stanje obeh operatorjev. Iz tega sledi, da bodisi kvantnomehanski opis sveta z valovno funkcijo ni kompleten, bodisi da fizikalne količine, ki pripadajo nekomutirajočim operatorjem nimajo sočasnega realnega obstoja.

David Bohm si je zamislil razpad mirujočega nevtralnega piona v par elektron-pozitron, ki zaradi ohranitve gibalne količine odletita v nasprotnih smereh z enako veliko hitrostjo. Če po nekem času izmerimo položaj prvega delca bomo v istem trenutku dobili informacijo o položaju drugega delca, ne da bi nanj kakorkoli vplivali. Enako lahko naredimo z meritvijo gibalne količine oz. hitrosti. Čeprav ne moremo hkrati izmeriti obojega, lahko svobodno izberemo ali bomo merili položaj ali hitrost prvega in s tem posredno tudi drugega delca. To pomeni, da morata biti obe količini vnaprej določeni, čeprav jih ne moremo hkrati izmeriti. Zaradi tega lahko rečemo, da sta obe količini hkrati elementa fizikalne realnosti. Sklep EPR je bil, da je kvantna mehanika nepopolna teorija fizikalne realnosti, saj podaja le delni opis vesolja.

Einstein se je spraševal, ali je možno kvantno mehaniko dopolniti z nekimi skrivnimi spremenljivkami, ki določajo stanje delca tudi v delu, ki nam ga sama meritev ne dopušča poznati. Svoje stališče je jasno izrazil z izjavo: "Bog ne kocka". Čeprav

¹leta 2010 je V. Susič imel seminar na to temo

je ravno on leta 1905 v fiziko vpeljal koncept fotona kot delca svetlobe oz. energijskega kvanta in tako nehote postal eden od očetov kvantne mehanike, je do smrti imel določene dvome in zadržke.

1.3 Bellove neenačbe

Pot k razrešitvi te uganke, ki je znanstvenike begala naslednjih 30 let, je nakazal John Bell. Leta 1964 je pokazal način, ki bi preko eksperimenta odločil med kvantno mehaniko in teorijo skritih spremenljivk. Iz predpostavke, da je svet klasičen je izpeljal svojo znamenito neenakost²[5].

Pojem klasičnega sveta je definiran z realizmom, kar pomeni, da je vsaka merljiva količina ves čas dobro določena, tudi če jo ne merimo v praksi, ter determinizmom, ki pravi, da je izid vsake meritve natančno določen le s stanjem sistema in postavitvijo merilne opreme. Pri izpeljavi svoje neenakosti je Bell predpostavil še, da velja lokalnost interakcij, oziroma kavzalnost, kar pomeni, da informacije ne potujejo hitreje od svetlobe. Iz teh predpostavk sledi, da je rezultat meritve natančno določen za vsak nabor začetnih pogojev, ne glede na to, ali ga znamo dejansko napovedati.

Bellova neenakost v obliki CHSH (Clauser-Horne-Shimony-Holt) se glasi³:

$$S = |E(\Theta_A, \Theta_B) + E(\Theta'_A, \Theta_B) + E(\Theta_A, \Theta'_B) - E(\Theta'_A, \Theta'_B)| \leq 2, \quad (1)$$

kjer je $E(\Theta_A, \Theta_B) = \langle a(\Theta_a)b(\Theta_b) \rangle$ (in analogno za ostale izraze), $a(\Theta_a)$ in $b(\Theta_b)$ sta rezultata meritev za prvi in drugi delec v smeri pri določeni orientaciji merilnega sistema, $a(\Theta'_a)$ in $b(\Theta'_b)$ pa rezultati meritev po zasuku sistema (če merimo polarizacijo fotonov, potem Θ_A in Θ_B predstavljata začetna kota postavitve polarizatorjev A in B, Θ'_A in Θ'_B pa spremenjena kota postavitve polarizatorjev).

Do neenačbe pridemo le z uporabo predpostavk klasičnega sveta. Če uporabimo še matematični formalizem kvantne mehanike ugotovimo, da je kršitev Bellove neenačbe možna in sicer s kvantnomehansko mejo $S \leq 2\sqrt{2}$. V nadaljevanju si bomo ogledali eksperimente, kateri so potrdili, da narava res krši Bellovo neenakost in je S res večji od 2(od klasične meje). Svet ni klasičen, kot je verjel Einstein, lokalnost interakcij ne velja in kvantnomehanska slika resničnosti je potrjena.

²leta 2008 je T. Mede imel seminar na to temo

³Originalna Bellova neenakost se glasi:

$$1 + \langle a(\Theta_B)b(\Theta_C) \rangle \geq |\langle a(\Theta_A)b(\Theta_B) \rangle - \langle a(\Theta_A)b(\Theta_C) \rangle|$$

ampak je v eksperimentalne namene neenakost bolj uporabna v CHSH obliki in zato tudi bolj pomembna v nadaljevanju seminarja.

2 Odločilni eksperiment iz leta 1982

Eksperimenti so potrdili kršitev Bellove neenakosti v prid kvantne mehanike že pred eksperimentom, ki ga je A. Aspect naredil s svojo skupino leta 1982, vendar so ti imeli statično postavitev, pri kateri so polarizatorji v istem položaju v celotnem času trajanja meritve. Predpostavka lokalnosti v Bellovi neenakosti zahteva, da je rezultat meritve polarizatorja II neodvisen od orientacije polarizatorja I (in obratno) in da je način, na katerega so pari oddani, neodvisen od orientacije polarizatorjev. Čeprav je predpostavka lokalnosti intuitivna ni predpisana z nobenim fizikalnim zakonom in je v primeru statične postavitve pod vprašanjem. Namreč, če bi obstajale skrite spremenljivke bi lahko pri takšnih eksperimentih prišlo do izmenjave informacij o postavitvi eksperimenta s hitrostjo manjšo ali enako hitrosti svetlobe. V tem primeru Bellova predpostavka lokalnosti ne drži pri statični postavitvi eksperimenta, kot tudi ne Bellova neenakost. Iz tega razloga je Bell poudarjal pomembnost spreminjanja postavitve eksperimenta med tem, ko sta delca že oddana. Na ta način je lokalnost posledica Einsteinove teorije relativnosti, ki preprečuje izmenjavo informacij s hitrostjo večjo od svetlobne.

Prvi eksperiment, pri katerem so uporabili spreminjajočo se smer polarizatorja so naredili A. Aspect, J. Dalibard in G. Roger leta 1982[6]. V njihovem eksperimentu je statičen polarizator I zamenjan s stikalom, kateremu sta sledila dva polarizatorja v dveh različnih smereh. Na tak način je bila svetloba v obeh vejah usmerjena naključno na enega od polarizatorjev. Preklop so opravljali s pomočjo akusto-optične interakcije ultrazvočnega stoječega valovanja na vodi. Takšno stikalo zaradi optičnih lastnosti deluje z dvakratno akustično frekvenco. Polarizator II so zamenjali na isti način z lastnim stikalom z drugačno frekvenco. Zato so lahko predpostavili, da sta polarizator I in II nekorelirana.

Čas potreben za preklop med dvema smerema polarizatorja je znašal 10ns, kar je manj od $L/c = 40\text{ns}$ potrebnih za prenos informacij s hitrostjo svetlobe med polarizatorjema I in II. To pomeni, da sta meritev dogodka na eni strani in ustrezna sprememba orientacije na drugi strani ločeni s "spacelike" intervalom.

3 Ponovljeni izboljšani eksperiment leta 1998

Eksperiment Aspect *et al* je pokazal kršitev Bellove neenakosti za 5Σ , še vedno pa ni imel idealne postavitve, ker je stikalo delalo kvaziperiodično in ne popolnoma naključno. Zaradi tega je preklapljanje možno napovedati in še vedno obstaja možnost, da je lokalnost kršena.

Eksperiment, ki bi nedvomno potrdil kršitev Bellove neenakosti mora izpolnjevati štiri pogoje:

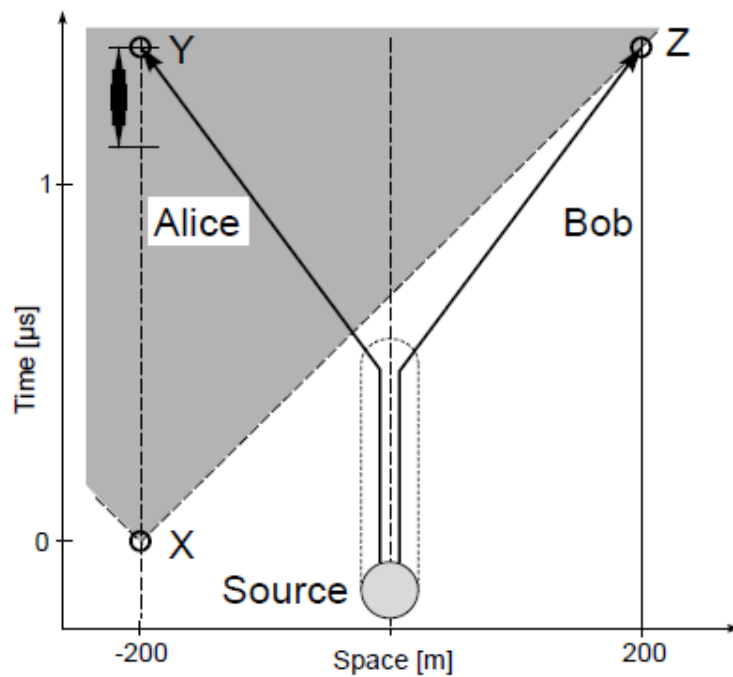
- Meritev na obeh straneh mora biti končana v času manjšem kot je potrebno za svetlobo, da pride od enega opazovalca do drugega (opazovalca morata biti na "spacelike" razdalji, slika 1).
- Izbira smeri polarizatorja mora biti popolnoma naključna, kar izključuje pseudo-naključni generator števil, ker je njegova stanja mogoče določiti vnaprej. Da bi to dosegli, potrebujemo fizikalni naključni generator.
- oba opazovalca morata meriti dogodke individualno in jih primerjati šele, ko je meritev končana. To zahteva neodvisno in zelo natančno časovno bazo pri obeh opazovalcih.
- Eksperiment bi moral izmeriti znaten del oddanih parov delcev

Eksperiment, ki ga je izvedel G. Weihs s svojo skupino leta 1998 je bil prvi, ki je izpolnjeval prve tri pogoje.

Opazovalca sta bila na razdalji 400m, kar pomeni, da sta morala končati meritev dogodka v $1.3\mu\text{s}$. Trajanje meritve je bilo krajše od $1/10$ maksimalnega dovoljenega časa.

Vsak opazovalec je imel lastni analizator časovnega intervala in atomsko uro. Uri sta bili sinhronizirani le enkrat pred eksperimentom. Na ta način so zagotovili neodvisno zapisovanje podatkov.

Popolnoma naključno izbiro smeri generatorja so zagotovili s fizikalnim naključnim generatorjem[7].



Slika 1:

Meritev levega opazovalca (Alice) mora biti končana v času manjšem od časa potrebnega svetlobi da preputuje razdaljo med opazovalcema, oz. mora ležati v osenčenem področju. S črno puščico je označeno trajanje meritve, ki je krajše od $1/10$ maksimalnega časa. [7]

V eksperimentu so zaznali 5% oddanih fotonov, kar pomeni, da zadnji pogoj ni izpolnjen. Čeprav je že Bell rekel, da je težko verjeti, da kvantna mehanika lepo dela na neučinkoviti praktični postavitvi, ampak da ne bo delala, ko bo prišlo do izboljšane eksperimenta, je lokalnost teoretično še vedno lahko kršena.

4 Kvantna komunikacija na razdalji 144km

Eksperimentalna distribucija kvantnega ključa na razdalji 144km je bila uspešno izvedena leta 2007. Z meritvijo več kot 90% vseh oddanih delcev so izpolnili vse štiri pogoje našete zgoraj. Zaradi pomembnosti tega eksperimenta za prihodnjo satelitsko kvantno komunikacijo in eksperimente na področju kvantne fizike v vesolju si ga bomo ogledali bolj podrobno.

Sodobna tehnologija optičnih vlaken in detektorjev je z izgubami zaradi absorpcije in temnega toka omejevala distribucijo kvantnega ključa na oddaljenost reda velikosti 100km. Da bi premagali to omejitev so en foton iz prepletenega para merili lokalno na La Palmi, drugega pa poslali prosto po zraku do Tenerifov. Tam je meritev izvedena z Optično Zemeljsko Postajo Evropske Vesoljske Agencije (Optical Ground Station of European Space Agency, v nadaljevanju OGS)[2].

4.1 Ustvarjanje prepletenega para

Najprej so morali ustvariti prepleteni par. Za to so uporabili spontano parametrično pretvorbo navzdol (spontaneous parametric down-conversion, v nadaljevanju SPDC) tipa-II. SPDC poteka takole: Žarek sevanja, poimenovan črpalka, sveti na dvolomni kristal, kateri pretvori vpadni foton v dva fotona nižje energije (ponavadi je vpadna svetloba ultravioletska ($\lambda \approx 350\text{nm}$), svetloba novonastalih žarkov pa infrardeča ($\lambda \approx 700\text{nm}$)). Intenziteta črpalke mora biti dovolj visoka, da nelinearni efekti privedejo do pretvorbe fotonov iz črpalke v pare koreliranih fotonov. SPDC je tipa I, če imajo fotoni v paru isto (paralelno) polarizacijo in tipa II, če imajo ortogonalno polarizacijo[1]. V slednjem primeru so nastali fotoni izsevani v dveh stožcih, enem redno polariziranem in drugem izredno polariziranem. Stožca sta tangentna drug na drugega v smeri črpalke. Če kot Θ_{pm} med črpalko in optično osjo kristala zmanjšujemo stožca lezeta narazen, če pa kot povečamo se stožca primikata eden drugemu in sekata v dveh linijah (slika 2).

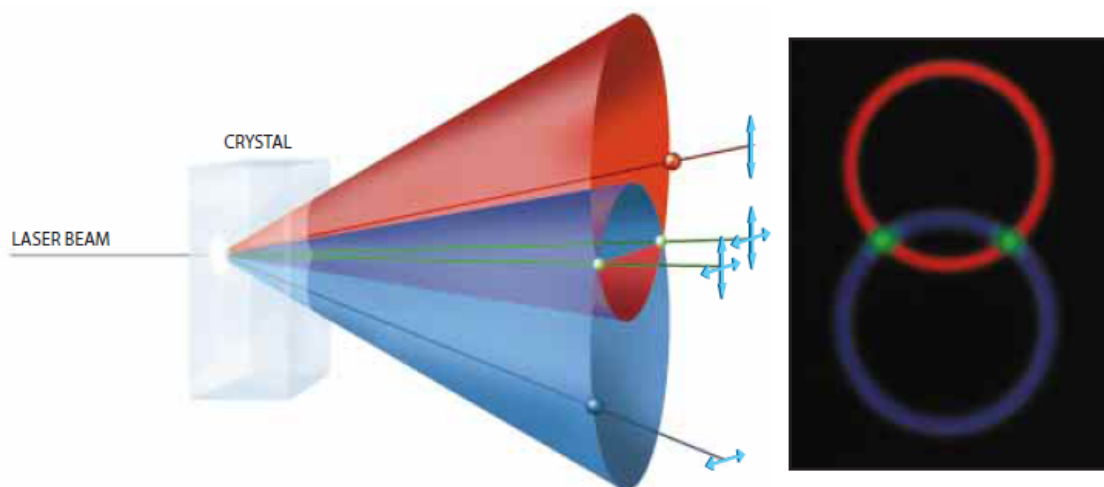
Vzdolž teh dveh smeri svetlobo lahko opišemo s singletnim prepletenim stanjem:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_1, V_2\rangle + |V_1, H_2\rangle), \quad (2)$$

kjer H in V označujeta horizontalno (izredno) in vertikalno (redno) polarizacijo[8].

V dotičnem eksperimentu so uporabili neodim-vanadijev laser s povprečno močjo 150mW, frekvenco 249MHz in s svetlobo valovne dolžine 355nm (nastali prepleteni fotoni imajo tako valovno dolžino 710nm). Z njim so posvetili kristal β barij borat (BBO) in dobili polarizirano prepletene pare fotonov v singletnem stanju[2].

Enega od fotonov iz prepletenega para so merili lokalno v La Palmi (tega v nadaljevanju poimenujemo Alica), drugega so čez enorodovno optično vlakno poslali do oddajnika s pomočjo katerega so ga potem prosto po zraku poslali do 144km oddaljene OGS na Tenerife (tega poimenujemo Bob).



Slika 2:

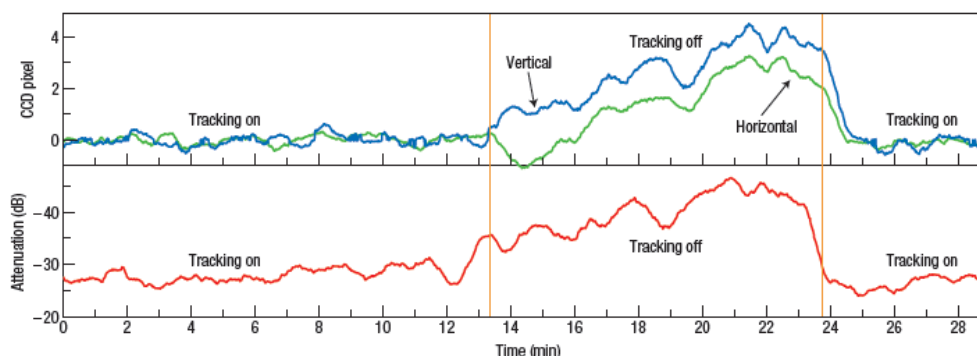
[LEVO]: Stožca redno polariziranih (rdeči stožec) in izredno polariziranih fotonov (modri stožec) pri spontani parametrični pretvorbi navzdol tipa II; z zelenima premicama sta označeni liniji, na katerih najdemo prepleteni par fotonov.

[DESNO]: Fotografija stožcev

Barva stožcev ne predstavlja barvo svetlobe [8, 9]

4.2 Težave pri prostem prenosu po zraku

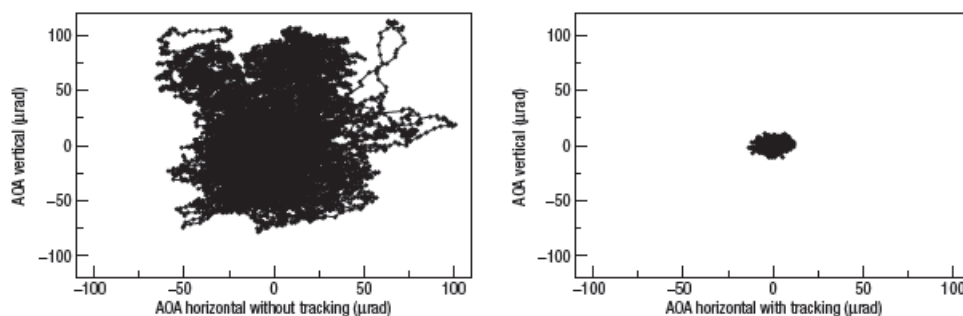
Na OGS-ju so z Richey-Chretien/Coude teleskopom z goriščno razdaljo 39m in premerom 1m (f/39) z vidnim poljem 8arcmin lovili posamezne fotone. Spremembe v slojih atmosfere ter v gradientu temperature in vlažnosti povzročajo spremembe v poti fotona na časovni skali reda 10s do minut (slika 3).



Slika 3:

Sprejeta moč na OGS-ju testnega laserja z $\lambda = 808\text{nm}$ in deviacija sledilnega laserja, vzorčena s CCD kamero na oddajnem teleskopu [2]

Če hočemo, da kljub temu teleskop na OGS-ju vidi fotone, bi morali imeti premer zrcala od 3m do 5m. Zato so morali kontrolirati poravnavo oddajnega in sprejemnega teleskopa, kar so naredili avtomatično z aktivno stabilizacijo preko zaprte zanke: s 532nm laserjem so iz OGS-ja svetili na oddajni teleskop (torej v nasprotni smeri kot bodo potovali fotoni, kar je preprečilo navzkrižni pogovor v kvantnem kanalu). Uporabili so divergentni laser s premerom točke na La Palmi od tipično 100 do 200m. Na ta način so zagotovili, da je oddajni teleskop bil ves čas osvetljen. Svetlobo z laserja so fokusirali s sledilnimi lečami na sledilni CCD, iz česar so lahko določili kot prihoda (angle of arrival, AOA) laserskega žarka v primerjavi z vnaprej določeno referenčno smerjo (referenčno smer so določili ročno z optimizacijo vrednosti prenosa kvantno komunikacijskega kanala)(slika 4).

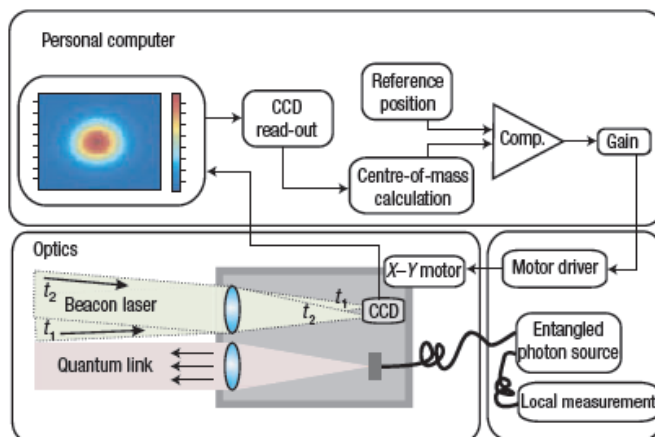


Slika 4:

[LEVO]: kot prihoda v x-y grafu. x-y lega na sledilnem CCD-ju ustreza navideznem položaju sledilnega laserja, ki je odvisen od optične poti skozi časovno odvisne sloje atmosfere. Dejstvo, da je homogenost atmosfere večja v horizontalni smeri, kot v vertikalni, je opazno tudi na sliki.

[DESNO]: kot prihoda v x-y grafu, ko je sledenje vključeno. [2]

Resolucijo sledilnega senzorja so še dodatno povečali iz $3\mu\text{m}$ na sprejemnem CCD-ju na $1\mu\text{m}$ z računanjem centra intenzitetne porazdelitve sprejetega laserskega žarka. Ta resolucija ustreza navideznemu premiku OGS-ja za 33cm, kar pomeni, da bo teleskop premera 1m na OGS-ju sprejel oddane fotone. Razliko med dejanskim kotom prihoda in referenčno smerjo so uporabili kot signal napake, katerega so poslali v zaprto sorazmerno-kontrolirano zanko. Za kontroliranje smeri teleskopa na La Palmi, na katerem je bil sledilni sistem kot tudi oddajnik fotonov, so uporabili koračni motor (slika 5).



Slika 5:

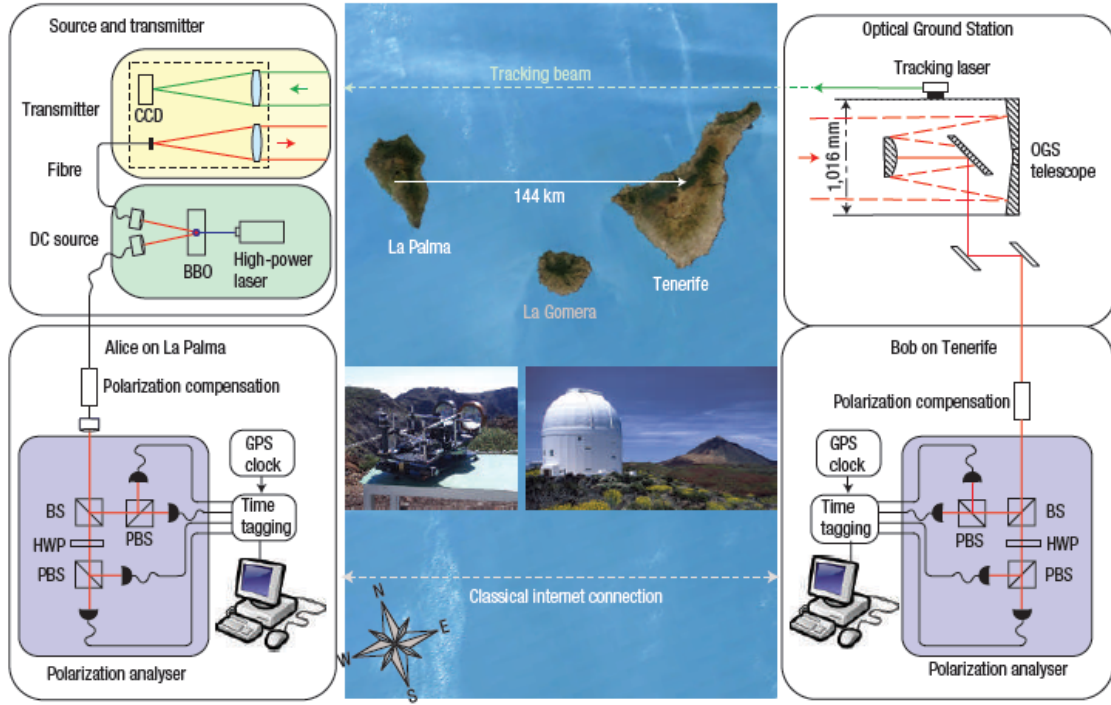
Sledilni sistem na La Palmi [2]

Čeprav je teleskop na Tenerifih sedaj ulovil fotone iz La Palme, so zaradi turbulenc v atmosferi sprejeti fotoni tavali v goriščni ravnini teleskopa v povrpečju za 3mm na časovni skali manj od milisekunde in zaradi tega niso prišli do detektorja. Temu so se izognili z dodatnim zmanjševalnikom goriščne razdalje. Ta je bil sestavljen iz kolimacijskih leč ($f=400\text{mm}$) katere so rekolimirale fotone na analizator polarizacije potreben za eksperiment, ter iz zbiralnih leč ($f=50\text{mm}$) katere so refokusirale žarek na detektor (silikonsko plazno fotodiodo). Končna dimenzija žarka in tavanje žarka zaradi turbulenc v atmosferi je bila zmanjša na povprečni premer $420\mu\text{m}$, kar je bilo manj kot aktivna površina detektorja ($500\mu\text{m}$).

4.3 Detekcija fotonov

Alica in Bob sta oba imela 4 kanalni analizator polarizacije, kateri je bil sestavljen iz 50/50 razdelilca žarka (beam splitter, BS), "half-wave plate" (HWP) in dveh polarizirajočih razdelilcev žarka (PBS). Z analizatorjem polarizacije so analizirali vpadni foton v horizontalno/vertikalni bazi (H/V) in v $\pm 45^\circ$ bazi, naključno razdeljen z BS. Tako je bil vsak dogodek označen s 64-bitno oznako s časovno resolucijo 156ps. Sistem za časovno označevanje je bil sestavljen iz 10MHz oscilatorjev, direktno vodenih (disciplined) z GPS-om (global positioning system) z relativnim lezenjem od manj kot 0.1ps v 100s. Bob je poslal Alici svoje časovne oznake po javnem internetnem kanalu še med zajemanjem podatkov. Alica je s pomočjo programske opreme naredila navzkrižno korelacijo (cross-correlation) in tako identificirala sovpadajoče dogodke oziroma pare fotonov, ki naj bi še vedno bili prepleteni.

Celotna postavitve eksperimenta je prikazana na sliki 6.



Slika 6:

Postavitev eksperimenta leta 2007 [2]

4.4 Preverjanje prepletenosti

Prepletenost med fotonoma iz para so potrdili z oceno CHSH neenakosti:

$$S = E(\Theta_A, \Theta_B) - E(\Theta_A, \Theta'_B) + E(\Theta'_A, \Theta_B) + E(\Theta'_A, \Theta'_B) \quad (3)$$

Vrednost za $E(\Theta_A, \Theta_B)$ so določili po formuli:

$$E(\Theta_A, \Theta_B) = \frac{N_{++}(\Theta_A, \Theta_B) + N_{--}(\Theta_A, \Theta_B) - N_{+-}(\Theta_A, \Theta_B) - N_{-+}(\Theta_A, \Theta_B)}{N_{++}(\Theta_A, \Theta_B) + N_{--}(\Theta_A, \Theta_B) + N_{+-}(\Theta_A, \Theta_B) + N_{-+}(\Theta_A, \Theta_B)}, \quad (4)$$

kjer je $N_{i,j}(\Theta_A, \Theta_B)$ izmerjeno število dogodkov pri postavitvi polarizacije Θ_A, Θ_B , $i, j \in \{+, -\}$, + in - pa označujeta izhodno vrednost dvokanalnega analizatorja polarizacije pri Alici in Bobu. Klasična mehanika podaja mejo $S \leq 2$, kvantna mehanika pa napoveduje kršitev do $S \leq 2\sqrt{2} = 2.83$. Maksimalna kršitev ustreza polarizacijskim kotom $(\Theta_A, \Theta'_A, \Theta_B, \Theta'_B) = (0^\circ, 45^\circ, 22.5^\circ, 67.5^\circ)$. Pri teh kotih so eksperimentalno pri meritvi trajanja tipično 221s iz skupno 7058 sovpadajočih dogodkov dobili vrednost

$$S = 2.508 \pm 0.037. \quad (5)$$

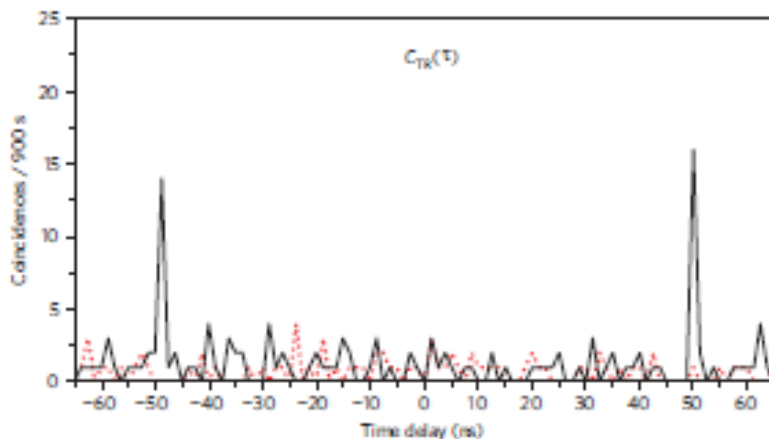
S tem so dokazali, da sta fotona detektirana na La Palmi in Tenerifih prepletena. Atmosfera nekoliko zmanjša kršitev Bellove neenakosti. Vemo, da Rayleighovo

sipanje pada z λ^4 , oziroma, da se svetloba z večjo valovno dolžino siplje manj, kot tista z manjšo valovno dolžino. Kljub temu, da so v poskusu delali s fotoni z valovno dolžino 710nm je zaradi sipanja rezultat nekoliko slabši, kot če bi delali v praznem prostoru, kjer bi kršitev bila Bellove neenakosti bila večja.

4.5 Izboljšan ponovljen eksperiment

Leta 2009 je skupina znanstvenikov ponovila nekoliko spremenjen eksperiment.

Za ustvarjanje prepletenega para so uporabili SPDC tipa II. Črpalka je svetila na KTiOPO_4 kristal z $\lambda = 405\text{nm}$ in producirala prepletene pare fotonov z $\lambda = 810\text{nm}$. Z močjo črpalke 20mW so dobili $\approx 10^7$ parov fotonov na sekundo. Fotona iz para so poslali po dveh enorodovnih vlaknih z razliko v dolžini 10m , kar ustreza časovni razliki 50ns . Fotona sta s pomočjo dveh oddajnih teleskopov na La Palmi poslana na skupni sprejemni teleskop v OGS na Tenerifih. Vpliv atmosfere pri prostem prenosu čez zrak so zmanjšali na isti način kot leta 2007. Prekrivajoča se žarka sta zbrana in vodena do detektorja, sestavljenega med drugim tudi iz štiri-plazne fotodiode. Vsak dogodek na vsaki fotodiodi je dobil časovno oznako z resolucijo 156ps . Na sliki 7 je prikazana navzkrižna korelacija časovnih oznak dogodkov za en primer. Jasno sta vidna dva vrhova pri $\pm 50\text{ns}$, kar ustreza časovni zakasnitvi zaradi razlike poti od 10m na oddajniku[10].



Slika 7:

Časovna porazdelitev enega od štirih kanalov za stanje $|\Psi^-\rangle$ (črno) in $|\Psi^+\rangle$ (pikčasto rdeče) [10]

Pri kotih $(\Theta_A, \Theta'_A, \Theta_B, \Theta'_B) = (0^\circ, 45^\circ, 22.5^\circ, 67.5^\circ)$ so eksperimentalno dobili vrednost

$$S = 2.612 \pm 0.114, \quad (6)$$

kar dokazuje prepletenost fotonov.

5 Zaključek

Kvantna prepletenost je ključna pri kvantni komunikaciji, katera zajema nova tehnološka področja, kot je kvantna kriptografija, kvantna teloportacija in kvantno računalništvo. Razširitev protokolov na bazi kvantne prepletenosti na globalne razdalje ima zato veliki praktični pomen. Eksperimentalna distribucija kvantnega ključa prosto po zraku na razdalji 144km presega prejšnje eksperimente te vrste za več kot red velikosti v razdalji (pred tem je bila največja razdalja 13km [11, 7, 12, 13, 14]) in predstavlja bistven korak proti prihodnji satelitski kvantni komunikaciji in eksperimentom na področju kvantne fizike v vesolju.

6 Zahvale

Zahvaljujem se prof. A. Ramšaku za pomoč, nasvete in motivacijo pri izdelavi tega seminarja.

Literatura

- [1] Morton H. Rubin, David N. Klyshko, Y. H. Shih, A. V. Sergienko, Theory of two-photon entanglement in type-II optical parametric down-conversion, *Physical Review A*, Vol. 50, No.6, (1994)
- [2] R. Ursin, F. Tiefenbacher, T. Schmitz, H. Weier, T. Scheidl, M. Lindenthal, B. Blauensteiner, T. Jennewein, J. Perdigues, P. Trojek, B. Omer, M. Furst, M. Meyenburg, J. Rarity, Z. Sodnik, C. Barbieri, H. Weinfurter, A. Zeilinger, Entanglement-based quantum communication over 144km, *Nature physics*, Vol.3, (2007), www.nature.com/naturephysics (11.04.2010)
- [3] The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory, 2004, <http://plato.stanford.edu/entries/qt-epr/#3.1> (05.04.2010)
- [4] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?, *Physical Review*, Vol.47,777 (1935)
- [5] J. S. Bell, On the Einstein Podolsky Rosen Paradox,*Physics* 1, 195 (1964)
- [6] A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1804, (1982)
- [7] G. Weihs, T. Jennewein, C. Simon, H. Weinfurter, A. Zeilinger, Violation of Bell's inequality under strict Einstein locality conditions, *Physical Review Letters* **81**, 5039-5043 (1998)
- [8] Paul G. Kwiat, K. Mattle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, New High-Intensity Source of Polarization-Entangled Photon Pairs, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 75, No. 24, (1995)
- [9] A. Zeilinger, Quantum Teleportation, *Scientific American*, 50-59 (April 2000)
- [10] A. Fedrizzi, R. Ursin, T. Herbst, M. Nespola, R. Prevedel, T. Scheidl, F. Tiefenbacher, T. Jennewein, A. Zeilinger, High-fidelity transmission of entanglement over a high-loss free-space channel, *Nature Physics*, Vol.5 (2009), www.nature.com/naturephysics (12.04.2010)
- [11] Aspect, A., Dalibard, J., Roger, G., Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers, *Physical Review Letters* **49**, 1804-1807 (1982)
- [12] D. Salart, A. Baas, J. A. W. van Houwelingen, N. Gisin, H. Zbinden, Spacelike Separation in a Bell Test Assuming Gravitationally Induced Collapses, *Phys. Rev. Lett.* **100**, (2008)

- [13] M. Aspelmeyer *et al.* Long-distance free-space distribution of entangled photons, *Science* **301**, 621-623 (2003)
- [14] K. J. Resch *et al.* Distributin entanglement and single photons through an intra-city, free-space quantum channel, *Opt. Express* **13**, 202-209 (2005)