



Documentul de referință privind serviciile de informații ale apărării

30 martie 2010

ICOD: 1 decembrie 2009

DIA-08- 1003-016

Srijin pentru amenințări la achiziții

Implicațiile spațiale și de
comunicare ale
entanglementului și
nonlocalității cuantice

UNCLASSIFIED//

UNCLASSIFIED/

Implicațiile spațiale și de comunicare ale entanglementului și nonlocalității cuantice

Pregătit de:

(b)(3):10 USC 424

Agenția de Informații a Apărării

Autor:

(b)(6)

Notă administrativă

AVERTISMENT PRIVIND DREPTURILE DE AUTOR: difuzarea ulterioară a fotografiilor din această publicație nu este autorizată.

Acest produs face parte dintr-o serie de rapoarte privind tehnologiile avansate realizate în anul fiscal 2009.

În cadrul Agenției de Informații a Apărării, (b)(3):10 USC 424 Aerospațială avansată Aplicații pentru sisteme de arme (AAWSA) Program. Comentarii sau întrebări referitoare la acest document trebuie adresate la (b)(3):10 USC 424:(b)(6), AAWSA Program

, De Intelligence Agency, ATTN: (b)(3):10 USC 424 Bldg 6000, Washington,

:::1 :: 51

UNCLASSIFIED/

Cuprins

Prefață și introducere	iv
I. Entanglementul cuantic, nonlocalitatea și experimentele EPR	1
II. Teoremele cuantice fără semnal	4
III. Nonlocalitatea versus relativitatea specială?	5
IV. Momentum Domain Entanglement și experimentele EPR.	5
V. Coerență-încrucișare Complementaritate Complementaritate	10
VI. Comunicare nelocală versus semnalizare	11
VII. O analiză tranzacțională a testului de comunicare nelocală.	13
VIII. Comunicare nelocală superluminală și retrocausală	17
IX. Paradoxuri și comunicare nelocală	18
X. Comunicare superluminală fără paradoxuri.....	19
XI. Exemplu: Controlul terestru în timp real al Roverului de pe Marte.....	20
XII. O altă posibilitate superluminală: Mecanica cuantică neliniară.....	22
XIII. Concluzie	23
Apendice: Glosar	24

Cifre

Fig. 1. Schemă a experimentului Freedman-Clauser din 1972	2
Fig. 2. Schema experimentului de interferență fantomă din 1995 al lui Shih Grupul	6
Fig. 3. Distribuția poziției interferențelor fantomatice la X,	7
Fig. 4. "Desfășurarea" experimentului de interferență fantomă.	8
Fig. 5. Schema experimentului Dopfer din 1998.....	9
Fig. 6. Efectul de sursă groasă.....	10
Fig. 7. Versiunea fără coincidențe a imaginii cu fantă a interferenței fantomă Experiment pentru demonstrarea comunicării nelocale.	12
Fig. 8. Diagramele de interpretare tranzacțională pentru cazul 1.....	15
Fig. 9. Diagramele de interpretare tranzacțională pentru cazul 2.....	16

UNCLASSIFIED//

- Figura 10. Versiunea fără coincidențe de imagistică cu fantă a experimentului de interferență fantomă care demonstrează semnalizarea superluminală și retrocausală ... 17
- Figura 11. Un sistem de comunicare nonlocal superluminal în care comunicarea se întinde pe un interval spațial20
- Figura 12. Schema de control în timp real al unui rover de pe Pământ pe Marte.....21

Implicațiile spațiale și de comunicare ale entanglementului și nonlocalității cuantice

Prefață și Introducere

Această lucrare analizează încurcătura cuantică și nonlocalitatea și ia în considerare posibilitatea ca acest fenomen să poată fi utilizat pentru a trimite semnale de la observator la observator. O astfel de demonstrație ar încălca mai multe "teoreme cuantice ale lipsei de semnal" din literatura de specialitate în domeniul fizicii. Semnalizarea cuantică nelocală ar avea implicații de mare anvergură ca o tehnologie care să permită semnalizarea superluminală și retrocausală. Sunt descrise scenariile care ar putea conduce la comunicarea cuantică nelocală și sunt luate în considerare aplicațiile la semnalizarea retrocausală și la comunicarea spațială în timp real. De asemenea, sunt analizate pe scurt implicațiile comunicării nelocale ale mecanicii cuantice neliniare.

Comunicarea în spațiu la scara sistemului solar este puternic limitată de scara spațiu-timp stabilită de viteza luminii. Semnalele luminoase, fie că sunt sub formă de unde radio, microunde, lumină vizibilă, raze X sau raze gamma, au nevoie de aproximativ 3,3 microsecunde pentru a parcurge o distanță de 1 kilometru. Un semnal luminos trimis de pe Pământ are nevoie de aproximativ 1,3 secunde pentru a ajunge pe Lună, între 4,4 și 20 de minute pentru a ajunge pe Marte și între 4 și 4,3 ore pentru a ajunge pe Neptun, în funcție de pozițiile lor orbitale. Această întârziere face imposibil controlul în timp real al dispozitivelor spațiale aflate la distanță și conduce la necesitatea unor dispozitive robotice preprogramate, cu suficientă "inteligență" pentru a efectua operațiuni limitate cu un minim de control de la distanță.

Povara acestor limitări ridică întrebarea dacă există vreo modalitate de a accelera legătura de comunicații spațiale. Răspunsul convențional este "Nu!", deoarece teoria specială bine stabilită a relativității este considerată ca limitând viteza de transmisie a semnalelor la viteza luminii, comunicațiile superluminale fiind strict interzise. Cu toate acestea, după cum se va discuta în secțiunea III, relativitatea interzice doar anumite forme de comunicații superluminale, în timp ce alte forme nu sunt în conflict cu relativitatea. Un fenomen care pare, cel puțin superficial, să prezinte aspecte superluminale, păstrând în același timp compatibilitatea cu relativitatea specială, este nonlocalitatea cuantică, capacitatea fenomenelor cuantice de a impune corelații între stările cuantice la distanțe mari în spațiu-timp.

Atunci când doi fotoni ies dintr-un singur eveniment cuantic, starea unui foton poate fi subtil legată de cea a celuilalt. Punctul de vedere clasic este că, odată separate, aceste stări ale fotonilor trebuie să fie fixate conform mecanicii și relațiilor de conservare care acționează în punctul lor de origine, astfel încât modificarea ulterioară a unuia nu îl va afecta pe celălalt. În fizica cuantică,

UNCLASSIFIED/

Însă, așa cum a fost confirmat de experimente (referințele 1, 2), rezultatul unei măsurători a stării unuia dintre fotoni, chiar și mult după punctul de creare comună a acestora, poate afecta starea celui alt foton. Această conexiune este denumită încurcătură cuantică, o expresie inventată pentru prima dată de Erwin Schrodinger (Referința 3).

Întrebările ridicate de fenomenul de încurcare cuantică sunt: (1) care este legătura cauzală dintre stările încurcate și (2) poate fi acest fenomen utilizat pentru a trimite semnale de la observator la observator? Acest

iv

UNCLASSIFIED/

UNCLASSIFIED//

Această lucrare încearcă să abordeze aceste întrebări, analizând îndeaproape entanglementul cuantic, nonlocalitatea cuantică, experimentele care le-au explorat și experimentele propuse pentru a testa problemele de comunicare cauzală și mai rapidă decât lumina evocate de această fizică.

Încrucișarea cuantică descrie starea unor părți separate ale aceluiași sistem cuantic în care fiecare dintre părți poate fi descrisă numai prin referire la starea celorlalte părți. Acesta este unul dintre cele mai contraintuitive aspecte ale mecanicii cuantice, deoarece, în mod clasic, ne-am aștepta ca părțile sistemului aflate în afara contactului "local" să fie complet independente. Astfel, încâlcirea reprezintă un fel de "conectivitate" cuantică, în care măsurătorile efectuate asupra unei părți izolate a unui sistem cuantic încâlcit au consecințe neclasice asupra rezultatelor măsurătorilor efectuate asupra celeilalte părți (eventual foarte îndepărtate) a aceluiași sistem. Această conectivitate cuantică ce acționează în sistemele cuantice încurcate se numește nonlocalitate **cuantică**.

Nonlocalitatea a fost evidențiată pentru prima dată de Albert Einstein și de colaboratorii săi Boris Podolsky și Nathan Rosen în celebra lor lucrare EPR (Referința 4). Aceștia au argumentat că conexiunea nelocală a sistemelor cuantice era nefizică, deoarece implica o conexiune mai rapidă decât lumina, în aparentă contradicție cu relativitatea specială. În ciuda obiecției lor, nonlocalitatea cuantică a fost demonstrată în prezent (a se vedea secțiunea I) în multe sisteme cuantice (Referința 1, 2). În comunitatea fizicii, în prezent, este în general recunoscută ca fiind implicită în formalismul cuantic aplicat sistemelor încurcate, deși au rămas câțiva "reținuți" de la Copenhaga care ar cere o demonstrație explicită a semnalizării nonlocale înainte de a admite că nonlocalitatea poate fi considerată un fenomen cuantic real.

Întrebarea investigată în această lucrare este dacă nonlocalitatea cuantică este domeniul privat al naturii sau dacă poate fi folosită în situații experimentale pentru a trimite semnale de la un observator la altul. După cum vom vedea, în prezent nu există un răspuns convingător la această întrebare. Cu toate acestea, este clar că, dacă o astfel de comunicare nelocală de la observator la observator ar fi posibilă, ar trebui să aibă implicații de mare anvergură. În special, ar reprezenta o tehnologie care să permită semnalizarea și comunicațiile superluminale (și retrocausale) și poate face posibilă explorarea în timp real a universului.

UNCLASSIFIED/

UNCLASSIFIED//

v

UNCLASSIFIED/

I. Entanglementul cuantic, nonlocalitatea și experimentele EPR

În descrierea mecanică cuantică a entităților elementare precum fotonii, există o dualitate între descrierea ca particulă și cea ca undă. Se poate considera că fotonii călătoresc prin spațiu ca unde, dar furnizează energie (și alte cantități conservate) la detectare ca particule. Prin alegerea tipurilor de măsurători efectuate asupra unor astfel de obiecte, se poate forța un comportament de undă sau de particulă-like să fie prezentat în rezultatele măsurătorilor. Între părțile încurcate ale unui sistem cuantic (de exemplu, emisia unei perechi de fotoni încurcați), acest comportament de tip undă sau de tip particulă într-o măsurătoare asupra unei părți a sistemului poate forța un comportament similar în cealaltă parte. Acest aspect este analizat în continuare în secțiunea IV de mai jos.

Condiția de încurcătură cuantică este de obicei o consecință a unor legi de conservare care acționează în cadrul sistemului, astfel încât subsistemele sunt conectate prin intermediul unor cantități conservate. De exemplu, dacă doi fotoni sunt emiși spate în spate într-o stare comună care are moment unghiular zero și paritate pozitivă, atunci, indiferent de starea de polarizare liniară sau circulară pe care este măsurat un foton, celălalt foton trebuie să aibă o polarizare identică dacă este măsurat în aceeași bază (liniară sau circulară). Această condiție trebuie să existe pentru a se asigura că momentul unghiular net al celor două stări ale fotonilor este zero. În această situație, dacă fotonii sunt măsurați pentru polarizarea circulară, ei trebuie să se afle amândoi în stări de polarizare circulară dreaptă sau în stări de polarizare circulară stângă. Deoarece polarizarea liniară este o suprapunere coerentă a stărilor de polarizare circulară, dacă se măsoară în baza polarizării liniare verticale/horizontale, trebuie să se afle în aceeași stare de polarizare verticală sau orizontală, iar în baza polarizării liniare de 45° stânga sau dreapta, trebuie să se afle în aceeași stare de polarizare de 45° stânga/dreapta.

În mod clasic, o astfel de condiție de corelație de polarizare ar putea exista, în principiu, într-o anumită bază de polarizare, dar nu în toate bazele de polarizare posibile simultan. Aceasta este fizica care stă la baza inegalităților Bell (Referința 8), care se referă la rata de scădere a corelațiilor pe măsură ce baza de polarizare a uneia dintre măsurători este rotită în unghi. Inegalitățile Bell demonstrează matematic faptul că predicțiile teoriilor semiclasice locale cu variabile ascunse semiclasice sunt inconsistente cu cele ale mecanicii cuantice standard. Testele unor astfel de corelații de polarizare au stat la baza unui număr de teste ale inegalității Bell (sau așa-numitele experimente EPR), în care validitatea predicțiilor mecanicii cuantice și neajunsurile teoriilor locale semiclasice cu variabile ascunse au fost demonstrate cu o precizie statistică ridicată (referințe 1, 2).

Ulterior s-a demonstrat (referințele 5, 6) că problemele legate de încălcarea inegalităților Bell pot fi separate în încălcări fie ale independenței *parametrilor* (probabilitatea rezultatului unei măsurători asupra uneia dintre particulele încurcate este independentă de alegerea *parametrilor* unei măsurători efectuate asupra celuilalt

UNCLASSIFIED/

membru al perechii încurcate), fie ale *independenței rezultatelor* (probabilitatea rezultatului unei măsurători asupra uneia dintre particulele încurcate este independentă de *rezultatul* unei măsurători efectuate asupra celuilalt membru al perechii încurcate). Observarea unei încălcări a inegalităților Bell indică o încălcare fie a *independenței parametrilor*, fie a *independenței rezultatelor* (sau a ambelor). Independența rezultatelor este destul de evidentă în formalismul cuantic, în timp ce independența este mai evazivă și depinde de ipoteze specifice. Mai jos, se prezintă

UNCLASSIFIED//

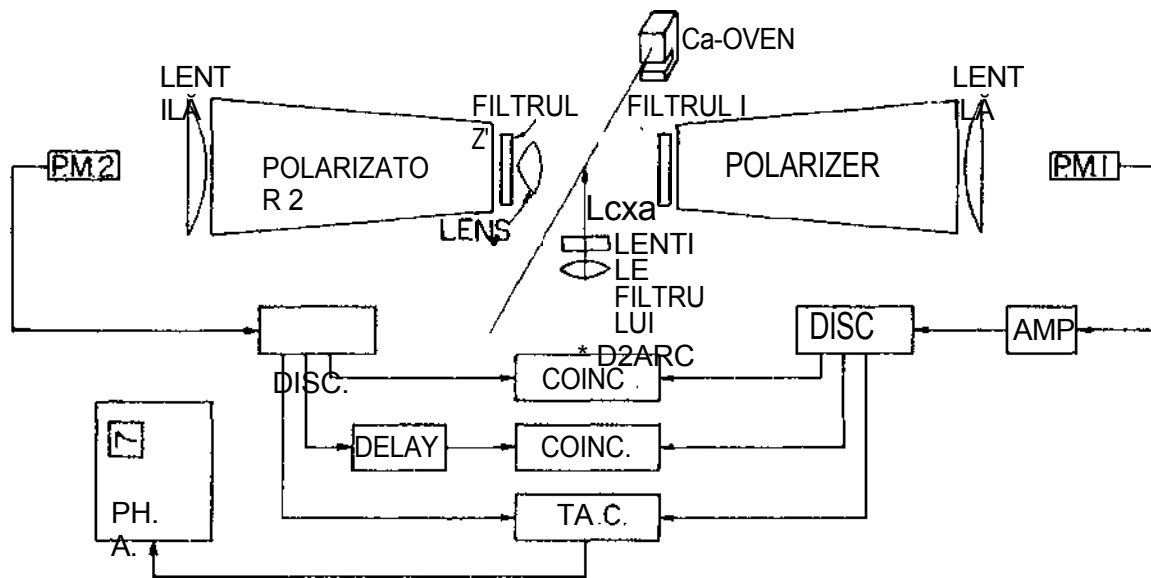
UNCLASSIFIED/

implicațiile acestei dihotomii sunt analizate în contextul teoremelor "fără semnal".

Se observă că există unele dezinformări în literatura de specialitate cu privire la cronologia experimentelor de corelație de polarizare EPR reușite, iar aici dorim să stabilim cel puțin o anumită corectitudine. Măsurarea experimentală care a demonstrat pentru prima dată o corelație de polarizare legată de nonlocalitatea EPR a fost realizată de C.

S. Wu și I. Shanknov în 1949 (Referința 7), cu mult înainte de lucrările lui Bell și de interesul ulterior pentru testarea inegalității lui Bell. Wu și Shan knov au arătat că polarizările liniare ale razelor gamma încurcate spate în spate, provenite din anihilarea electron-positron (o stare de paritate *negativă* $L=0$), erau anticorrelată, de exemplu, dacă un foton era polarizat vertical, atunci celălalt era polarizat orizontal. Cu toate acestea, ei nu au investigat căderea corelației cu unghiul polarimetrului, care stă la baza testelor Inegalității Bell, și nici nu și-au prezentat rezultatele ca o consecință a nonlocalității cuantice.

Au trecut aproape două decenii până la publicarea lucrării de bază a lui John Bell (Referința 8) în 1964 și 1966. În 1972, Freedman și Clauser (Referința 1) au efectuat primul test definitiv al inegalității Bell prin măsurarea corelației de polarizare a fotonilor încurcați dintr-o cascadă atomică cu paritate pozitivă $L=0$ în calciu. Rezultatele lor au fost în concordanță cu predicțiile mecanicii cuantice și au fost inconsecvente cu teoriile locale ale variabilelor ascunse cu 6,7 deviații standard. Un deceniu mai târziu, în 1982, măsurătorile EPR ale grupului Aspect (Referința 2) au eliminat mai multe scenarii "loophole" care ar putea constitui modalități *neverosimile* de păstrare a localității clasice și au demonstrat din nou acordul cu mecanica cuantică și inconsecvența cu teoriile locale cu variabile ascunse, de data aceasta cu 46 de deviații standard. Într-un exemplu mai recent de experiment EPR, grupul Gisin (Referința 9) a folosit cablurile de fibră optică deținute de Sistemul telefonic elvețian pentru a demonstra conexiunea nelocală între măsurătorile EPR efectuate în locații din Geneva și Berna, orașe elvețiene cu o distanță vizuală de 156 km - o demonstrație directă, dacă era nevoie, că nelocalitatea cuantică poate funcționa pe distanțe destul de mari.



UNCLASSIFIED/

UNCLASSIFIED/

Figura 1. Schema experimentului Freedman-Clauser din 1972 (referință 1)

2

UNCLASSIFIED/

UNCLASSIFIED//

Constituie aceste experimente EPR o demonstrație a existenței nonlocalității cuantice? Există mai multe moduri de interpretare a implicațiilor rezultatelor experimentale (referințele 1, 2) și se pot găsi multe discuții în literatura de specialitate cu privire la faptul dacă localitatea sau "realismul" (realitatea obiectivă independentă de observator a evenimentelor externe) este cea care a fost respinsă de aceste măsurători EPR.

Anthony Leggett, laureat al premiului Noble, de la Universitatea din Illinois, a împins recent această problemă ceva mai departe (Referința 10). El a demonstrat că, concentrându-se asupra căderii corelațiilor cu polarizare *eliptică*, mai degrabă decât asupra polarizării liniare utilizate în experimentele EPR cu inegalitatea Bell, se pot compara predicțiile mecanicii cuantice cu o clasă de teorii realiste nelocale pe care le-a construit. Inegalitățile Leggett rezultate pot fi utilizate în același mod ca și inegalitățile Bell, dar pentru a testa teoriile care încorporează realismul *nonlocal* în loc de realismul *local*. Grupul lui Anton Zeilinger de la Institutul de Optică Cuantică și Informație Cuantică (IQOQI) din Viena a realizat un test definitiv al inegalităților Leggett (Referința 11). Rezultatele arată că, folosind fotoni încurcați polarizați eliptic, inegalitățile Leggett în două observabile sunt încălcate cu 3,6 și cu 9 deviații standard. Acest lucru este interpretat ca o falsificare semnificativă din punct de vedere statistic a întregii clase de teorii realiste nelocale construite de Leggett. Grupul IQOQI își rezumă rezultatele prin afirmația: "Credem că rezultatele noastre oferă un sprijin puternic opiniei că orice extindere viitoare a teoriei cuantice care este în acord cu experimentele trebuie să renunțe la anumite caracteristici ale descrierilor realiste."

Cu toate acestea, considerăm că acesta este în principal un exercițiu de demolare a unui "strawman". Teoriile realiste nelocale ale lui Leggett presupun că, atunci când fotonii încurcați ies din sursa de emisie, ei se află într-o stare de polarizare definită. Este binecunoscut faptul că atunci când se face această presupunere (și nu altele), nu se observă predicția mecanică cuantică a Legii lui Malus pentru corelațiile perechii de fotoni.

Cu toate acestea, Leggett rezolvă această problemă presupunând un mecanism nespecificat de conexiune nelocală între sistemele de detecție care rezolvă discrepanța. De fapt, cele două măsurători vorbesc între ele în mod nelocalizat, astfel încât fotonii detectați polarizați liniar se supun Legii lui Malus și produc aceleași corelații de polarizare liniară prevăzute de calculele mecanicii cuantice. Leggett arată apoi că această "reparație" nelocală nu poate fi extinsă în domeniul polarizării eliptice și că mecanica cuantică și acest tip de teorii realiste nelocale oferă predicții diferite pentru corelațiile de polarizare eliptică. Cu alte cuvinte, "realitatea" care este testată este dacă sursa de fotoni emite inițial fotonii încurcați într-o stare de polarizare definită. Această versiune a "realității" este cea care a fost falsificată de măsurătorile IQOQI.

În opinia noastră, această ipoteză, în mod clar inconsecventă cu formalismul mecanicii cuantice, nu este valabilă, iar natura este atât nelocală, cât și nerealistă, dacă prin realism se înțelege că atunci când fotonii încurcați ies din sursa de emisie, ei se află într-o stare definită de polarizare. Această definiție foarte restrânsă a realismului nu este necesară și se presupune că nonlocalitatea intrinsecă a mecanicii cuantice standard este un fapt fizic.

UNCLASSIFIED/

UNCLASSIFIED//

e observă că cele mai multe baze de polarizare utilizate în aceste tipuri de experimente EPR de polarizare fac demonstrarea conexiunilor cuantice nelocale simplă, dar, de asemenea, fac imposibilă utilizarea acestor conexiuni pentru observator-to-

UNCLASSIFIED/

UNCLASSIFIED//

observator (Referința 12), deoarece ar trebui să se deducă din fotonii care sosesc baza de polarizare utilizată în măsurătorile la distanță. Acesta este un aspect al independenței parametrilor menționat mai sus. În timp ce fiecare observator este liber să aleagă un parametru care specifică baza de polarizare (de exemplu, circulară dreapta/stânga, liniară la orice unghi) pentru măsurare, el nu este liber să forțeze fotonul într-o anumită stare a acestei baze, așa cum ar fi necesar pentru comunicarea nelocală.

Cu toate acestea, măsurarea *corelațiilor de polarizare* într-un sistem cu constrângeri de moment unghiular nu este singura modalitate de a demonstra conexiunea nelocală dintre părțile separate și încurcate ale unui sistem cuantic. Mai jos, sunt discutate experimentele EPR care utilizează încurcarea momentului și este explorată întrebară dacă astfel de sisteme cuantice ar putea oferi un vehicul mai bun pentru comunicarea nelocală de la observator la observator, deoarece, prin utilizarea încurcării momentului, un observator este capabil să forțeze fotonul să se comporte ca o particulă sau ca o undă.

II. Teoremele cuantice fără semnal Teoremele cuantice fără semnal

Așa cum a sugerat Einstein prin binecunoscuta sa observație "acțiuni ciudate la distanță", aplicarea corelațiilor cuantice pe intervale de timp negative și spațialitate prin nonlocalitate este foarte contraintuitivă. Aceasta pare să implice două posibilități gemene: comunicarea superluminală și cauzalitatea inversă prin comunicarea înapoi în timp între observatori. Cu toate acestea, o serie de autori (Referința 13) au prezentat "dovezi" că o astfel de comunicare nelocală între observatori este imposibilă în cadrul formalismului mecanicii cuantice standard. Aceste teoreme afirmă că, în cazul măsurătorilor separate în sisteme cuantice încurcate în mod voluminos, corelațiile cuantice vor fi păstrate, dar nu va exista niciun efect aparent pentru un observator dintr-un subsistem dacă caracterul măsurătorii este schimbat în celălalt subsistem. Astfel, se afirmă că semnalizarea nelocală este imposibilă.

După cum s-a menționat mai sus, experimentele EPR pot fi privite (referințele 5, 6) ca demonstrând încălcări ale independenței rezultatelor, ale independenței parametrilor sau ale ambelor. Independența rezultatului nu poate fi utilizată pentru semnalizarea nelocală, în timp ce independența parametrilor poate fi utilizată. Astfel, orice test de semnalizare nelocală este, de fapt, un test al independenței parametrilor fenomenelor cuantice, iar teoremele fără semnal sunt "dovezi" ale independenței parametrilor.

Aceste "dovezi" fără semnal au cu adevărat statutul de teoreme matematice? Poate că nu. Recent, s-a subliniat (Referința 14) că cel puțin unele dintre aceste "dovezi" care exclud semnalizarea nelocală sunt tautologice, presupunând că procesul de măsurare și hamiltonianul asociat acestuia sunt locale, încorporând astfel concluzia finală a absenței semnalizării în ipotezele de la care pornesc. Simetrizarea standard a mecanicii cuantice Bose - Einstein în sistemele de bosoni a fost ridicată ca un contraexemplu, care s-a dovedit a fi incompatibilă cu ipotezele inițiale ale unora dintre aceste "dovezi". Prin urmare, cel puțin din anumite perspective, posibilitatea comunicării nelocale în contextul mecanicii cuantice standard rămâne deschisă și adecvată pentru Experimentează testele psihice.

UNCLASSIFIED/

UNCLASSIFIED//

4

UNCLASSIFIED/

III. Nonlocalitatea versus relativitatea specială Relativitatea?

Dacă este posibilă comunicarea nelocală, ar fi aceasta în conflict cu relativitatea specială, cu interdicția sa bine cunoscută împotriva semnalelor mai rapide decât lumina? Răspunsul este nu.

Interzicerea semnalelor cu viteze superluminale de către teoria relativității restrânse a lui Einstein este legată de faptul că multitudine definitivă a două puncte spațiu-timp separate nu este invariantă Lorentz. Deoarece un semnal superluminal ipotetic ar putea fi folosit pentru a stabili o relație de simultaneitate fixă între două astfel de puncte - de exemplu, prin sincronizarea ceasurilor - acest lucru ar implica un cadru inerțial preferat și ar fi incompatibil cu invarianța Lorentz și cu relativitatea specială. Cu alte cuvinte, ar fi în contradicție cu tratamentul egal al tuturor cadrelor de referință inerțiale din relativitatea specială.

Cu toate acestea, dacă un semnal nelocal ar putea fi transmis prin măsurători efectuate în locații separate asupra a doi fotoni încurcați, semnalul ar fi "trimis" în momentul sosirii fotonului într-o locație și "primit" în momentul sosirii celuiilalt foton. Prin variația lungimii traseelor până la cele două locații, aceste evenimente ar putea avea loc în orice ordine și separare temporală în orice cadru de referință. Prin urmare, semnalele nelocale (chiar și cele superluminale și retrocaustice) *nu* ar putea fi utilizate pentru a stabili o relație de simultaneitate fixă între două puncte spațio-temporale separate, deoarece trimiterea și recepția unor astfel de semnale nu au relații temporale fixe. Instanțele de emisie și de sosire ale unui semnal nonlocal nu pot fi utilizate pentru sincronizare, deoarece instanțele de emisie și de recepție sunt variabile dependente de traiectorie și de întârziere.

Altfel spus, conexiunile nelocale ale fotonilor încurcați se află de-a lungul unor linii ale lumii segmentate, asemănătoare luminii, care se transformă în mod corespunzător sub transformările Lorentz. Prin urmare, nu există niciun conflict între semnalizarea nelocală și invarianța Lorentz a relativității restrânse. Pe de altă parte, principiul cauzalității (cauza trebuie să preceadă efectul în toate ~~cadre~~ cadrelor de referință) pare foarte probabil să fie încălcat (sau cel puțin violat) dacă este posibilă semnalizarea nelocală.

Este posibil ca universul să aibă un cadru de referință preferat, poate cel stabilit de fondul cosmic de microunde sau cel implicat de principiul lui Mach* Poate, dar dacă ar exista un astfel de cadru preferat, existența sa nu ar putea fi stabilită prin comunicarea nelocală.

IV. Întrepătrunderea în domeniul momentului și EPR Experimente

Obiecția inițială a lui Einstein (Referința 4), conform căreia mecanica cuantică părea a fi nelocală, a fost formulată cu argumente bazate pe un *experiment de tip gedankenexperiment* în domeniul momentului. Cu toate acestea, aproape toate experimentele EPR moderne care testează Inegalitatea Bell și demonstrează nonlocalitatea cuantică au fost efectuate în domeniul polarizării (adică al momentului unghiular), de obicei cu fotoni polarizați liniar. În mod interesant, se pare că, dacă este

UNCLASSIFIED//

posibilă comunicarea cuantică nelocală, aceasta ar putea fi mai ușor de realizat în domeniul momentului de moment al obiectivului inițial al lui Einstein.

Procesul optic al conversiei parametrice spontane în jos (Referința 15) se dovedește a fi o modalitate foarte utilă de a genera perechi de fotoni încurcați fie în domeniul polarizării, fie în cel al momentului. În acest proces, un foton de la un "laser de pompare"

interacționează cu un cristal neliniar și este transformat în doi fotoni cu energii și momente vectoriale care se adaugă la cele ale fotonului de pompă inițial. În funcție de tipul de proces de conversie descendentă, există corelații de polarizare bine definite între fotonii încurcați. De asemenea, fotonii down-converțiți pot fi ușor pregătiți în stări de momentum-entangled, deoarece, în mediul neliniar, momentele vectoriale ale perechii de fotoni down-converțiți trebuie să se adune pentru a da cea a fotonului de pompă.

Prima măsurătoare care utilizează fotoni de conversie descendentă cu moment de energie care ar putea fi legată de comunicarea nelocală este experimentul Ghost Interference raportat în 1995 de grupul Shih (Referința 16), prezentat schematic în figura 2. Experimentatorii au utilizat conversia descendentă coliniară degenerată de tip II de

Radiația de pompă UV de 351 nm de la un laser cu ioni de argon a trecut printr-un cristal BBO ($\rho\text{-BaB}_2\text{O}_4$) de 3 mm lungime, care a fost tăiat cu axa optică la un unghi de potrivire de fază de $42,2^\circ$ față de fasciculul de pompă, pentru a produce o pereche de cristale de 702 nm coliniar, cu moment de impuls, cu unghiuri de 702 nm. fotonii cu polarizări opuse. Fotonii încurcați ies din foarte aproape paralel cu fasciculul de pompă. Fasciculul de pompă este apoi separat de pereche cu ajutorul refracției într-o prismă de cuarț (Prisma UV), iar fotonii încurcați sunt separați cu ajutorul unui separator de fascicule (BS) cu selectare a polarizării care reflectă fasciculul "extraordinar" fotonul polarizat vertical (e) și transmite fotonul "obișnuit" polarizat orizontal (o). Ambii fotoni sunt trecute prin filtrele 702 -L 10-nm selective în funcție de lungimea de undă (f ,z) și apoi detectate (D ,z).

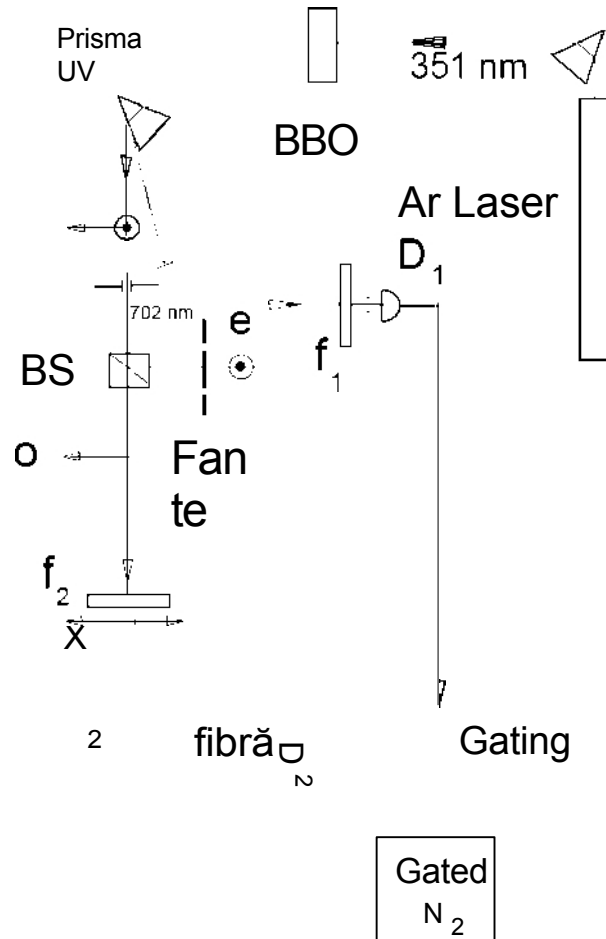


Figura 2. Schema experimentului de interferență cu fantome din 1995 (Referința 16) al grupului Shih

UNCLASSIFIED/

6

UNCLASSIFIED//

Experimentatorii au demonstrat că trecerea fotonului polarizat vertical (e) printr-un sistem cu două sau cu o singură fantă înainte de detectarea la D1 a produs o distribuție de interferență "pieptene" sau, respectiv, o distribuție de difracție "în formă de cucui" în poziția X2 a fotonului polarizat orizontal (o) detectat la D2 atunci când perechea de fotoni este examinată în coincidență. Cu alte cuvinte, distribuția de poziție a fotonului cu trecere directă prezintă modele caracteristice sistemului cu o singură sau dublă fantă prin care a trecut fotonul său geamăn încurcat. Figura 3 prezintă distribuțiile de poziție observate pentru cele două cazuri.

Din punctul de vedere al comunicării nonlocale, observăm că modificarea sistemului de fante înainte de D1 prin care trece fotonul reflectat, care poate fi considerată ca fiind acțiunea unui observator "expeditor", determină, în mod nonlocal, o schimbare observabilă în distribuția poziției X2 a fotonului nedezlipit, detectată de un observator "receptor" la

Dz. Acesta este un efect neclasic care demonstrează conexiunea nelocală dintre perechea încurcată și care ar putea sta la baza transmiterii unui semnal nelocal între cei doi observatori. Cu toate acestea, experimentul Ghost Interference *nu* demonstrează, în forma raportată, o comunicare nelocală, din cauza utilizării unei legături de comunicare clasice în impunerea cerinței de coincidență între fotonii detectați.

În lucrarea lor, autorii comentează faptul că, în absența coincidențelor, nu există distribuții observabile de modele de interferență cu două fante la D1 sau Dz. Ei atribuie această lipsă a unui "semnal" de interferență variației orizontale a poziției de creație a fotonilor convertiți în jos. Variația este suficientă pentru ca fotonii "e" să ajungă la cele două fante cu lungimi relative de drum care pot diferi cu mai mult de o lungime de undă, deplasând astfel aleatoriu și ștergând orice model de interferență. În plus, sursa lor de fotoni încurcați era foarte ineficientă și zgomotoasă. Doar aproximativ 1 din 10^{10} fotoni de pompă a produs o pereche încurcată, în timp ce mulți fotoni "zgomot" neincurcați de aceeași lungime de undă au fost creați de fluorescența din cristal. Prin urmare, chiar dacă cerința de coincidență ar fi fost în principiu eliminabilă (a se vedea mai jos), nu este surprinzător faptul că au fost necesare coincidențe pentru a observa efectele raportate.

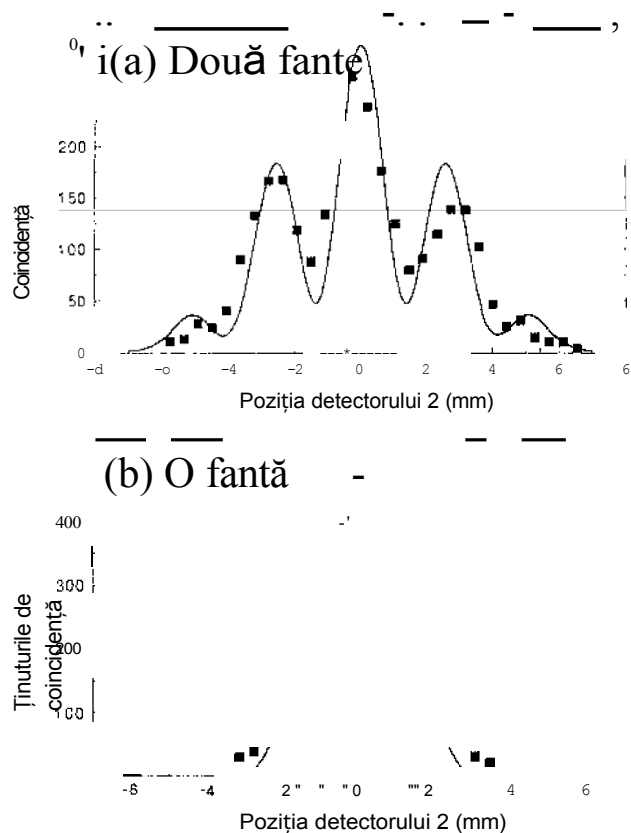


Figura 3. Distribuția pozițiilor de interferență fantomă la X,

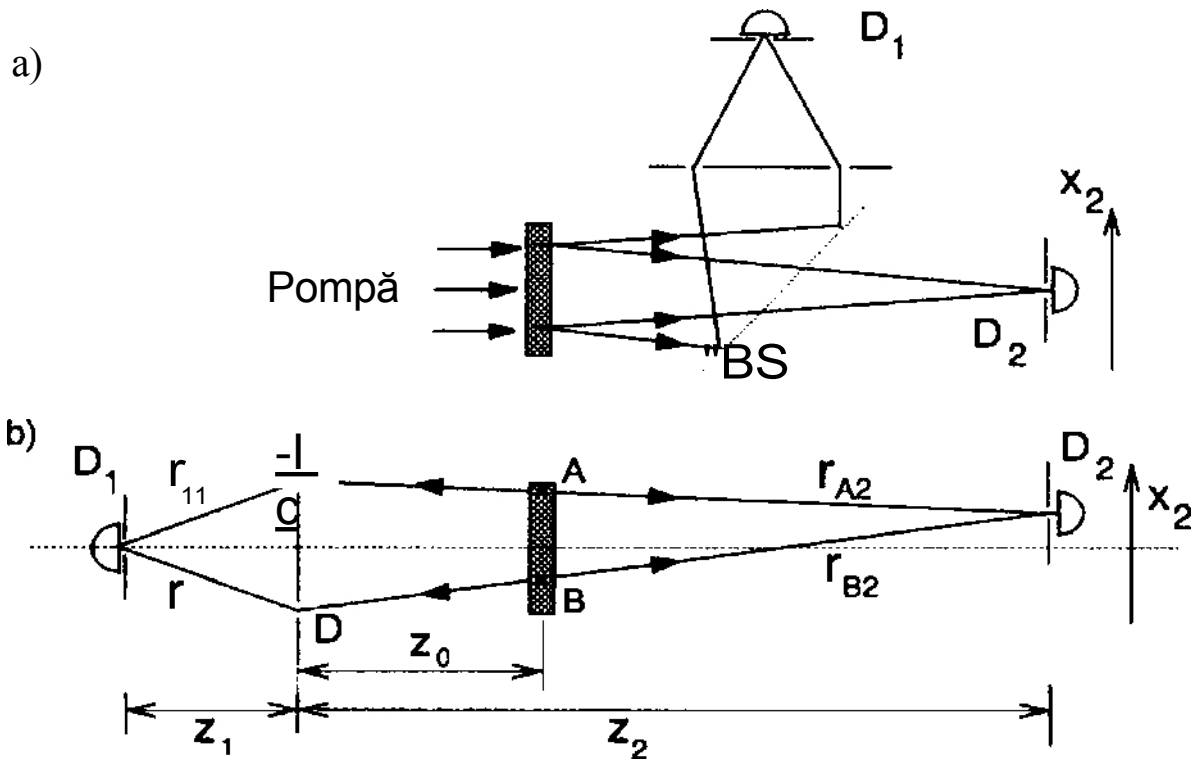


Figura 4. "Desfășurarea" experimentului de interferență fantomă

Autorii subliniază faptul că există o modalitate simplă de a gândi despre măsurătorile de entanglement de momentum care implică fotoni încurcați. Se poate demonstra, pe baza Legii lui Snell și a conservării momentului în cristal, că dacă un foton are un mic moment care îl face să fie ușor deviat la dreapta fasciculului de pompare cu un unghi θ , atunci fotonul gemă încurcat va fi deviat la stânga cu același unghi θ , o situație care amintește de reflecția într-o oglindă. Acest lucru permite ca experimentul să fie "desfășurat" prin înlocuirea reflexiei efective cu o traiectorie rectilinie, așa cum se arată în figura 4. Ideea desfășurării este că fotonii încurcați se comportă exact ca și cum ar fi cazul dacă direcția fotonului deviat ar fi fost inversată, astfel încât acesta să provină din punctul de detecție D1, să treacă prin una sau două fante la C și D și să producă un model de interferență cu una sau două fante la X2 detectat de D2.

De ce este necesară coincidența? În primul rând, ar trebui să fie clar din figura 2 că detectorul D2 detectează nu numai gemenii încurcați ai fotonilor care trec prin deschiderile fantelor, ci și gemenii încurcați ai numărului mult mai mare de fotoni care sunt opriți de părțile opace ale fantelor. Prin urmare, fără coincidențe, nu ar putea fi observat niciun model de interferență la X2. În plus, se poate observa în figura 4b că detectorul D1 din spatele fantelor primește lumină într-o regiune foarte localizată și, dacă ar fi mutat vertical în diagramă, modelul de interferență la D2 ar fi deplasat, maximele devenind minime și invers. Fără coincidențe care să necesite o anumită locație pentru detecția la D1, distribuția D2 ar trebui să facă o medie a tuturor pozițiilor D1 posibile, spălând modelul de interferență cu două fante. Prin urmare, din cauza geometriei utilizate, experimentul Ghost Interference a necesitat o coincidență pentru a

UNCLASSIFIED//

observa un model de interferență cu două fante precum cel prezentat în figura 3a.

Un alt experiment EPR cu momentum încurcat a fost teza de doctorat din 1998 a lui Birgit Dopfer (Referința 17), realizată la Universitatea din Innsbruck și prezentată schematic în figura S. În experimentul Dopfer, deplasarea unui detector într-un braț modifică în mod nelocalizat modelul de interferență observat în celălalt braț. Dopfer a utilizat radiația de pompare UV de 351 nm de la un laser cu ioni de argon cu conversie descendentă de tip I într-un cristal neliniar LiIO_3 tăiat cu axa optică la 90 față de fasciculul de pompare pentru a produce o pereche de fotoni de 702 nm cu moment de energie care au ieșit din cristal la unghiuri de $28,2^\circ$ la dreapta și la stânga față de axa de pompare, așa cum se arată în figura 5.

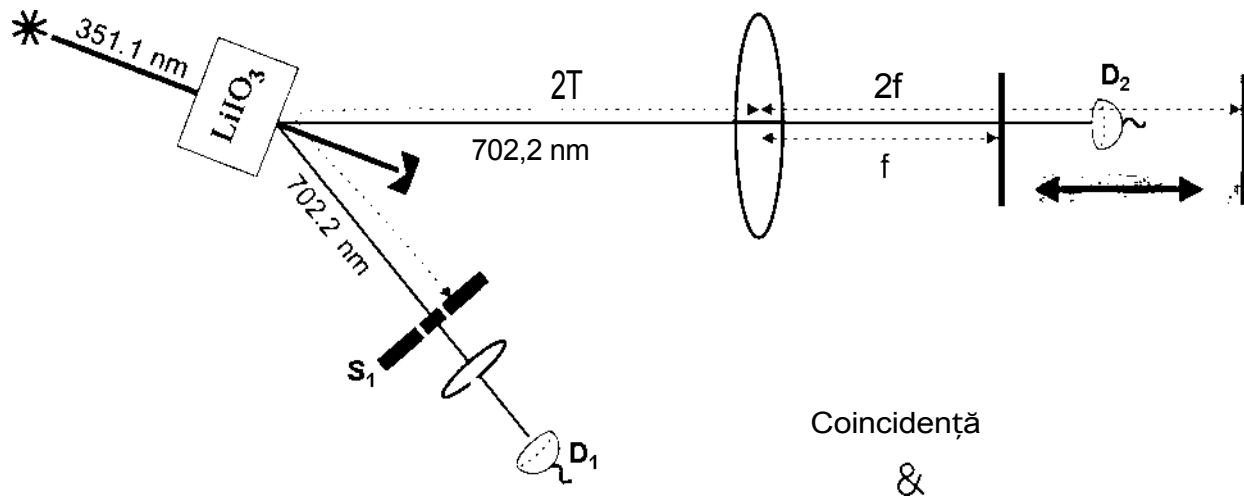


Figura S. Schema experimentului 199B **Dopfer** (Referința 17)

Fotonul inferior încurcat a trecut printr-o pereche de fante și a intrat într-un detector, în timp ce fotonul superior a trecut printr-o lentilă care ar putea crea o imagine a celor două fante pentru a efectua o măsurare "în ce direcție" dacă detectorul D_2 ar fi plasat la două distanțe focale în spatele lentilei ($2f$).

Cu toate acestea, dacă detectorul D_2 a fost plasat într-o poziție aflată la o distanță focală în spatele lentilei (f), fantele nu au fost imaginate, iar lumina de pe linia reflectată care trece prin oricare dintre fante ar putea ajunge la detector în punctele sale, producând un rezultat similar cu cel al experimentului Ghost Interference. Un model de interferență structurat cu două fante putea fi activat și dezactivat prin deplasarea unui detector în celălalt braț al experimentului între pozițiile f și $2f$.

Din nou, din punctul de vedere al comunicării nelocale, se observă că deplasarea detectorului D_2 , care poate fi considerată ca fiind acțiunea unui observator "emițător", determină o schimbare observabilă în mod nelocalizat în distribuția poziției celui de-al doilea foton, detectată la poziția "receptorului" D_1 . Cu toate acestea, experimentul Dopfer nu demonstrează comunicarea nelocală, deoarece, la fel ca și experimentul Ghost Interference, acesta necesită o legătură de comunicare clasică pentru a impune cerința de coincidență între fotonii detectați, din cauza geometriei experimentului.

Examinarea acestor două experimente ridică o întrebare foarte interesantă: Poate fi

UNCLASSIFIED/

elimină cerința de coincidență? Răspunsul nu este clar. În principiu, cei doi fotoni încurcați sunt conectați prin nonlocalitate, indiferent dacă sunt detectați în coincidență sau nu. Prin urmare, coincidența ar trebui să poată fi eliminată. Cu toate acestea, în ambele experimente, autorii raportează că nu se observă nicio distribuție de interferență cu două fante

atunci când cerința de coincidență este relaxată. Acest lucru poate fi explicat prin acțiunea complementarității coerență-încrucșare, după cum se discută în secțiunea următoare.

V. Coerență-încrucșare Complementaritate

După cum s-a discutat mai sus, se așteaptă ca extinderea finită a sursei să limiteze posibilitatea de a observa un model de interferență cu două fante, care ar fi "semnalul" dacă ar fi posibilă comunicarea nelocală. Figura 6 prezintă schematic (nu la scară) acest efect de "sursă grosă". Volumul sursei din stânga reprezintă regiunea cristalului nelinier care este iluminată de fasciculul laser de pompă UV direcționat de-a lungul axei u . Volumul sursei este un cilindru cu grosimea de câțiva mm și cu raza de aproximativ un mm, cu un punct central C . Se presupune că cilindrul sursă este înclinat cu un unghi θ față de axa orizontală z , pe care sistemul de fante și planul detectorului sunt centrate simetric. Se observă că $\theta = 0^\circ$ în experimentul Ghost Interference și $\theta = 28,2^\circ$ în experimentul Dopfer. La o distanță orizontală L_t față de sursă se află un sistem cu două fante, o pereche de deschideri a cu o separare între centre d . Lumina care trece prin sistemul de fante parcurge o distanță orizontală L_d și este detectată în planul detectorului în poziția X_1 .

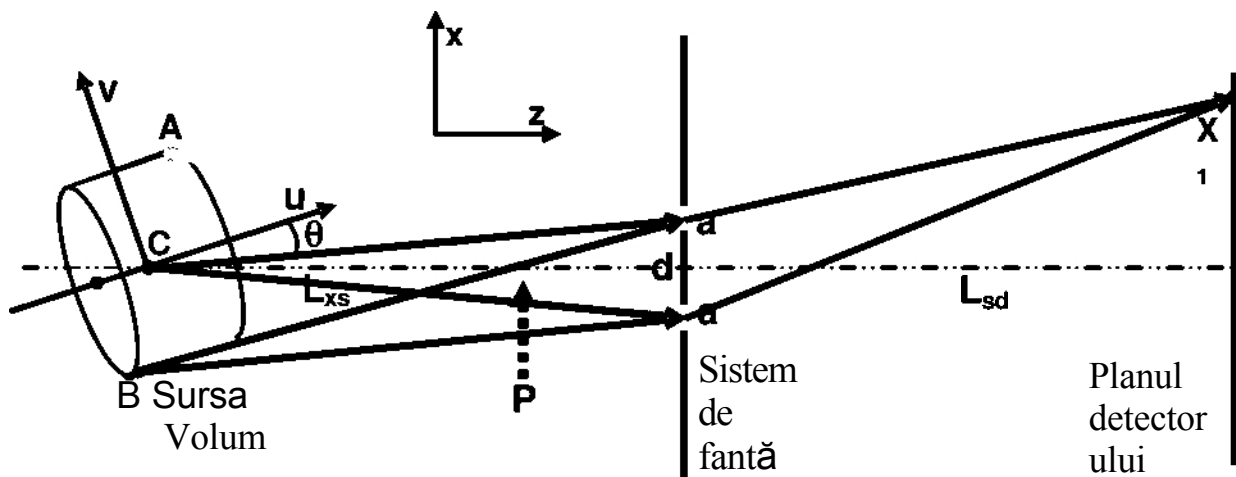


Figura 6. Efectul Thick-Source (nu la scară): Undele care sosesc la cele două fante de la punctele A și B, aflate la extremitățile volumului sursei, pot avea diferențe semnificative de lungime și fază, în timp ce undele din punctul central C sunt în fază la fante.

Dacă punctul de producere a fotonilor se află în afara axei z , va exista o diferență de lungime a traseului dintre unde în raport cu C, atunci când acestea ajung la cele două fante. În figura 6, undele din punctele A și B ar putea avea diferențe de lungime de drum mai mari de jumătate de lungime de undă și diferențe de fază mai mari de 180° . În linii mari, acest lucru schimbă modelul de interferență în raport cu undele create în punctul central C, astfel încât maximele devin minime și viceversa. Efectul net al calculării mediei în toate punctele din volumul sursei ar fi, prin urmare, acela de a șterge modelul de interferență cu două fante. Acest model de interferență cu două fante trebuie observat fără ambiguitate, deoarece acesta este "semnalul" care ar fi

UNCLASSIFIED/

utilizat în orice comunicare nelocală. Această operabilitate este cuantificată printr-o mărime observabilă numită "vizibilitate", care este legată de raportul dintre k și valoarea de fază a modelului de interferență.

Constanța fazei relative la cele două fante pentru fotonii care sosesc din diferite părți ale sursei se numește "coerență" și asigură o vizibilitate ridicată. Ar trebui să fie clar că o sursă punctiformă are o coerență perfectă, în timp ce o sursă cu un unghi solid mare ca

UNCLASSIFIED/

văzute dinspre fante vor avea o coerență redusă. Diferența de lungime a traiectoriei la fante este, cu o bună aproximație, invers proporțională cu L . Prin urmare, dacă L este mai mare - adică dacă se plasează fantele la o anumită distanță de volumul sursei - se poate reduce coerența

diferențele de lungime a traiectoriei până la o valoare care crește coerența și permite observarea unui semnal clar al modelului de interferență cu două fante la detectorul D . Alternativ, plasarea unei lentile divergente subțiri, dublu-concave, în punctul P din figura 6 poate avea același efect, determinând ca lungimile mai mici ale traiectoriei să treacă printr-o grosime mai mare de sticlă de lentilă. O astfel de lentilă ar demagnifica, de asemenea, sursa, producând echivalentul unei lungimi mai mari a traiectoriei și a unui unghi solid mai mic al sursei.

Cu toate acestea, creșterea coerenței sursei are o altă consecință. Întrepătrunderea momentului fotonilor de la sursă rezultă din conservarea momentului.

Restrângerea unghiului solid al sursei, așa cum este privit dinspre fante, înseamnă că mai puține perechi de fotoni pot fi încurcate și, în același timp, pot să satisfacă constrângerile geometrice ale configurației experimentale. Grupul lui Saleh de la Universitatea din Boston a demonstrat că există o relație complementară între coerența sursei și încurcarea cu doi fotoni (Referința 18). Pe măsură ce distanța dintre sursă și fantă L crește, există tranziții netede de la modele de interferență cu o singură fantă la modele de interferență cu două fante și de la o sursă foarte încurcată la o sursă foarte coerentă. Observăm, după cum s-a menționat mai sus, că tehnologia de conversie parametrică descendentă utilizată în experimentele Ghost Interference și Dopfer a fost destul de ineficientă și zgomotoasă, cu o producție destul de improbabilă de perechi încurcate care concurează cu producția mult mai probabilă de fotoni neîncurcați "zgomot" de aceeași lungime de undă din fluorescența pompată în cristal. Acest lucru ar avea tendința de a limita încurcarea sursei.

Comunicarea nelocală care utilizează încurcarea momentului necesită coerența sursei. Coerența sursei este necesară pentru a observa "semnalul" unui model de interferență cu două fante și încălcarea celor doi fotoni, astfel încât o măsurare a unuia dintre fotoni să se "conecteze" cu modelul de interferență produs de celălalt foton. În cazul în care există coerență fără încurcătură sau încurcătură fără coerență, nu este posibilă comunicarea nelocală cu fotoni încurcați în momentul respectiv. O problemă nerezolvată, care necesită o analiză teoretică și o testare experimentală suplimentară, este dacă există un "punct de convergență" în proiectarea experimentală care să cuprindă atât coerența parțială, cât și încurcarea parțială și care să permită transmiterea de semnale nelocale.

VI. Comunicare nelocală versus Semnalizare

Posibilitatea unei comunicări nelocale este o problemă nerezolvată. Poate că este probabil ca echilibrul dintre coerență și încurcătură să fie o modalitate a naturii de a preveni semnalizarea nelocală, dar acest lucru nu a fost demonstrat. În această secțiune, presupunem că semnalizarea nelocală este posibilă și vom examina implicațiile sale. După cum se va vedea, acestea sunt atât de profunde încât ar putea fi luate ca o indicație puternică a faptului că natura nu ar permite astfel de lucruri și, prin urmare, semnalizarea nonlocală trebuie să fie imposibilă.

UNCLASSIFIED/

Figura 7 prezintă o variație a experimentului Ghost Interference (Referința 16) în care se utilizează tehnica de imagistică a fantelor din experimentul Dopfer (Referința 17) pentru a se asigura perechile de fotoni încurcați care trec prin fante ajung la ambii detectori, iar cele interceptate de regiunile opace ale fantelor nu ajung la niciunul dintre aceștia. În special, o lentilă cu distanța focală f este plasată în calea după cristalul BBO și înainte de separatorul de polarizare, astfel încât ambii fotoni încurcați să treacă prin această lentilă. O pereche de fante S se plasează la o distanță f față de lentilă în calea fotonilor "o",

11

UNCLASSIFIED//

care sunt polarizate liniar pe orizontală (HLP) și sunt transmise de splitter. După cum a arătat Dopfer, din cauza încurcării momentului, o imagine a sistemului de fante S va fi formată de fotonii "e" polarizați liniar pe verticală (VLP) la o lungime de drum f dincolo de lentilă, pe traseul deviat în poziția S_z , unde se află o pereche de fante "de curățare" care lasă să treacă numai acei fotoni ai căror gemeni încurcați au trecut prin S. Observăm că, din cauza geometriei optice, această imagistică are loc chiar și pentru undele care trec prin ambele puncte de imagine și, în cele din urmă, interferează.

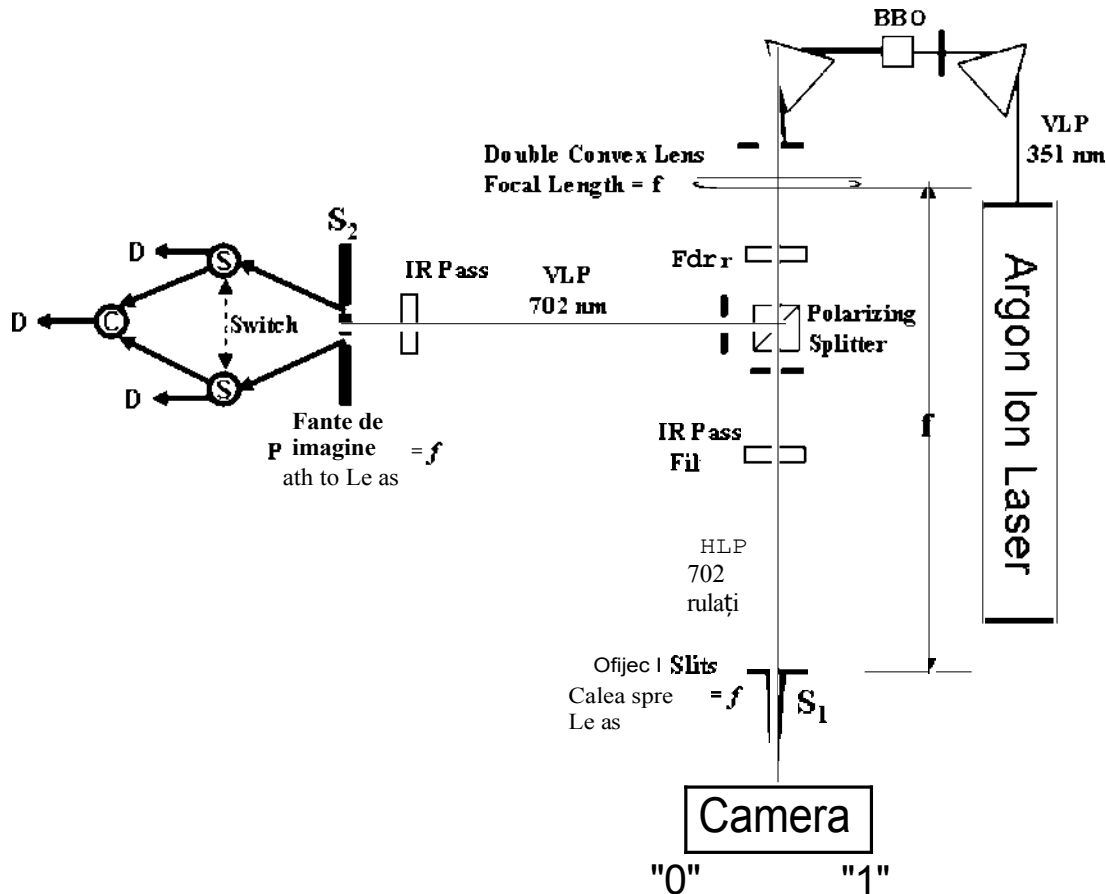


Figura 7. Versiunea fără coincidență a imaginii cu fantă a experimentului Ghost Interference pentru a demonstra comunicarea nelocală

În poziția imaginii fiecărei fante la S_z , plasăm o fibră optică, așa cum se arată. Fibrele conduc lumina către un comutator optic, la care lumina fie este trimisă direct către doi detectori cu fotodiode cu avalanșă D (furnizând informații despre care dintre fantele S prin care a intrat fotonul), fie este direcționată către un combinator optic C, ieșirea în față a combinatorului fiind apoi detectată, astfel încât undele care trec prin ambele fante pot contribui în mod constructiv la evenimentul de detecție. Observăm că acest sistem de comutare pe fibră este echivalentul pe fibră optică al unui interferometru Mach-Zehnder (referința 20), în care se poate activa și dezactiva ultima oglindă pe

UNCLASSIFIED/

jumătate prin comutare, astfel încât informația privind sensul de deplasare poate fi activată și dezactivată. (De asemenea, menționăm că o tehnologie similară de combinare a fibrelor și detectoare ar putea fi folosită după fantele S pentru a

determina prezența sau absența interferenței coerente, dar acest lucru nu va fi luat în considerare în continuare aici).

O cameră CCD răcită, sensibilă din punct de vedere cuantic, este înlocuită cu detectorul DI din experimentul Ghost Interference (Referința 11) și este setată pentru a măsura distribuții precum cele prezentate în figura 3. În aranjamentul din figura 7, comutarea traseului fibrei optice poate fi considerată ca fiind un act de transmitere a unui semnal binar 0 sau 1. Dacă comutatorul se află în poziția care duce la detectoarele exterioare, atunci sunt disponibile informații privind direcția de deplasare, iar modelul detectat de cameră ar trebui să fie un model de difracție cu o singură fantă etichetat "1" în figura 7. Dacă comutatorul se află în poziția care duce la combinatorul și la detectorul din mijloc, undele ambele fante contribuie la detecție, nu este disponibilă informația "which-way". Disponibil, iar modelul detectat de cameră ar trebui să fie modelul de interferență cu două fante etichetat "0" în figura 7.

În cazul în care modelul observat de camera de luat vederi poate fi într-adevăr modificat prin schimbarea traseului fibrei optice, atunci aceasta ar constitui o demonstrație directă a comunicării nelocale. O astfel de observație ar falsifica teoremele fără semnal menționate mai sus, care presupun că, într-un scenariu de necoincidență, nicio acțiune asupra unui foton încurcat nu poate produce un rezultat observabil "capabil de semnal" la detectarea celui alt foton încurcat din pereche.

Trebuie subliniat faptul că demonstrarea comunicării nelocale cu fotoni încurcați în impulsuri, așa cum a fost descrisă mai sus, nu este același lucru cu trimiterea efectivă a unui semnal. Ar trebui să fie clar că niciun semnal real nu poate fi comunicat cu o singură pereche de fotoni. Doar atunci când sunt detectați mai mulți fotoni, funcția de distribuție subiacentă poate deveni evidentă. Se poate estima că, dacă funcțiile de distribuție care trebuie distinse sunt un model "pur" de interferență cu două fante modulată de un înveliș de difracție și un model "pur" de difracție cu două fante, atunci ar fi necesare aproximativ 10 detecții de fotoni pentru o decizie de 3σ între aceste două posibilități.

Cu toate acestea, după cum s-a menționat în secțiunea anterioară, este probabil că, dacă este posibilă comunicarea nelocală, aceasta ar trebui să se realizeze într-o situație în care s-a ajuns la un compromis între încurcare și coerență, iar un astfel de compromis ar face în mod inevitabil ca cele două modele care urmează să fie distinse să fie mai asemănătoare și mai greu de separat. Prin urmare, detecțiile de 10 fotoni citate mai sus

trebuie să fie considerată o limită inferioară mai degrabă optimistă și este probabil că un număr semnificativ mai mare de detecții (poate 100 sau mai mult) ar fi necesar. Timpul necesar pentru a trimite un singur bit de informație ar fi atunci produsul dintre rata de detectare a fotonilor în cele două brațe ale experimentului și numărul de fotoni care trebuie detectați pentru a primi semnalul. În principiu, o astfel de rată de transmisie ar putea fi îmbunătățită (și zgomotul de fluorescență ar putea fi suprimat) prin pulsarea laserului de pompă, astfel încât "grupuri" de fotoni încurcați să fie recepționate cu fiecare puls.

VII. O analiză tranzacțională a nonlocalului

UNCLASSIFIED//

Test de comunicare

Acum se folosește interpretarea tranzacțională a mecanicii cuantice (Referința 19) pentru a analiza sistemul descris mai sus. Interpretarea tranzacțională descrie formarea unui eveniment cuantic ca fiind un proces în trei etape: (1) trimiterea de unde de "ofertă" întârziată (g) de la locația (locațiile) de emisie, (2) răspunsurile înapoi în timp de la locația (locațiile) de recepție a undelor de "confirmare" avansate (g) și (3) formarea unui spațiu-

UNCLASSIFIED/

UNCLASSIFIED/

undă staționară în timp (-) între locații (de exemplu, o sursă de fotoni și un detector de fotoni). După un schimb inițial de unde de ofertă și de confirmare, o anumită tranzacție este selectată în mod probabil din toate cele posibile, pe baza valorilor v_v -ale alternativelor. Schimbul de ofertă/confirmare continuă până când toate cantitățile conservate (energie, impuls, moment unghiular etc.) au fost transferate.

Pentru sistemul de testare a comunicațiilor nelocale descris mai sus, vom lua în considerare două cazuri:

- Căzul 1: Comutatorul este poziționat astfel încât fiecare fibră de la fanta să fie direcționată către un detector, producând o măsurătoare a fantei prin care a trecut fotonul VLP. În acest caz, fotonul HLP detectat de camera de luat vederi ar trebui să aibă o poziție înregistrată care să se încadreze într-o distribuție largă a modelului de difracție cu o singură fantă (*nu* un model de interferență cu două fante).
- Căzul 2: Comutatorul este poziționat astfel încât lumina de la cele două fibre să fie combinată înainte de detectare. Prin urmare, detecția nu produce nicio informație privind traseul fotonului VLP, care ar fi putut trece prin oricare dintre fante. În acest caz, fotonul HLP detectat de cameră ar trebui să se afle într-o poziție care să se încadreze într-o distribuție a modelului de interferență cu două fante.

Figura 8 prezintă tranzacția care se formează pentru sistemul de testare a comunicațiilor nelocale în configurația cazului 1. Aici, ca și în experimentul Ghost Interference, am tratat sursa de cristal neliniară de perechi încurcate ca pe un "reflector" eficient și am reprezentat razele cu traiectorii drepte pentru a "desfășura" sistemul, duplicând lentila pentru fiecare foton și reprezentând sistemul ca o imagine optică cu două lentile, cu raze aproape paralele între cele două lentile. Sistemele de fante S și S_z sunt situate la o distanță focală față de lentile. Se presupune că fotonul care pleacă spre stânga ajunge la fanta superioară a lui S_z și este detectat de detectorul superior (încercuit). Fotonul din dreapta, cu moment de energie, trebuie să ajungă apoi la S , care este sistemul optic

imagine a lui S_a , care va fi difractată de fantă și detectată de camera de luat vederi. Dacă figura 8 ar fi inversată pe verticală, aceasta ar oferi o diagramă similară pentru sosirea la fel de probabilă a fotonului care pleacă spre stânga la fanta inferioară a lui S_z și detectarea acestuia de către detectorul inferior. Sunt reprezentate cele trei etape de formare a tranzacției.

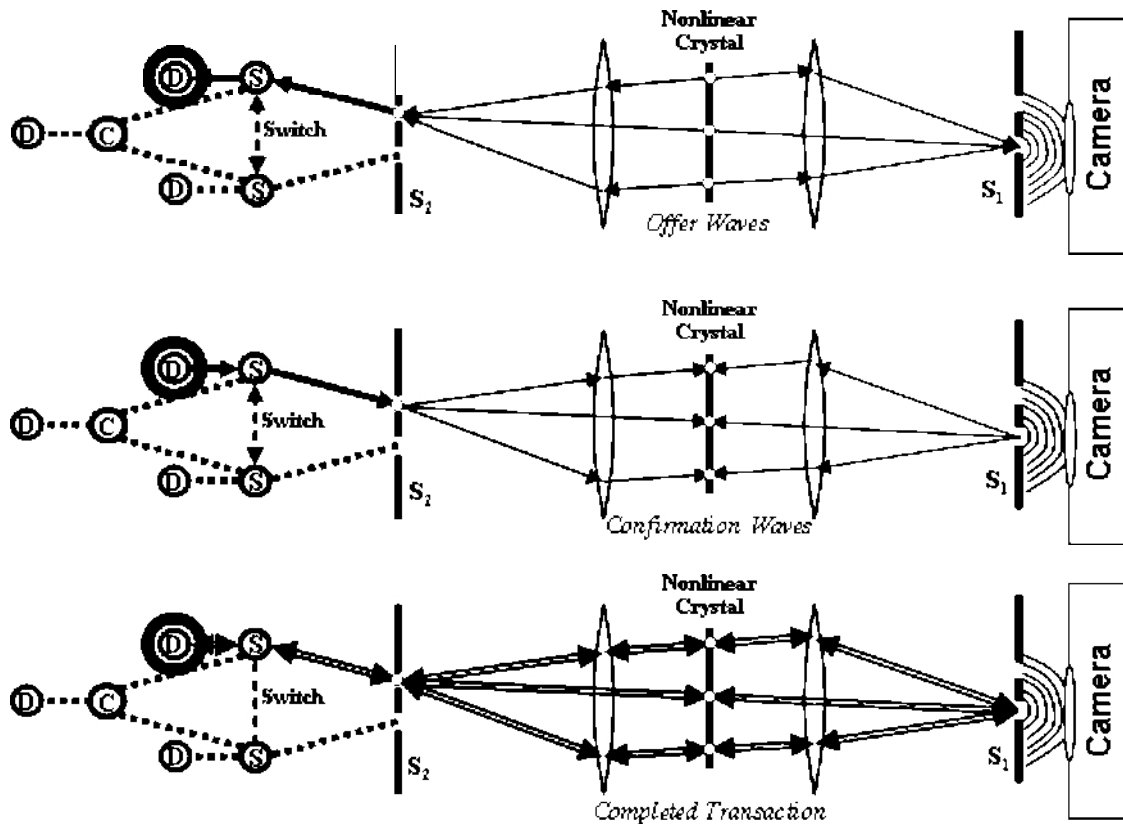


Figura 8. Diagramele de interpretare tranzacțională pentru cazul 1. Undele de ofertă care merg spre stânga trec prin fanta superioară a lui S_z și ajung la detectorul superior (ci rled). Undele ofertante din dreapta, cu momentul de impuls, trec doar prin fanta inferioară a lui S , care este imaginea optică a lui S_z superior, și sunt difractate către camera de luat vederi. Undele de confirmare se întorc, iar tranzacția cu o singură fantă se formează.

Figura 9 prezintă tranzacția care se formează pentru sistemul de testare a comunicațiilor nelocale în configurația cazului 2. Fotonul care pleacă spre stânga trece prin fantele superioară și inferioară ale lui S_z . Cele două trasee se conectează la un combinat și sunt detectate de detectorul central (încercuit). Fotonul din dreapta, cu moment de energie, trebuie să treacă apoi, de asemenea, prin ambele fante ale lui S_i , care sunt imaginile optice ale lui S_z , pentru a forma un model de interferență cu două fante, detectat de cameră. Sunt prezentate cele trei etape ale formării tranzacției.

UNCLASSIFIED//
UNCLASSIFIED/

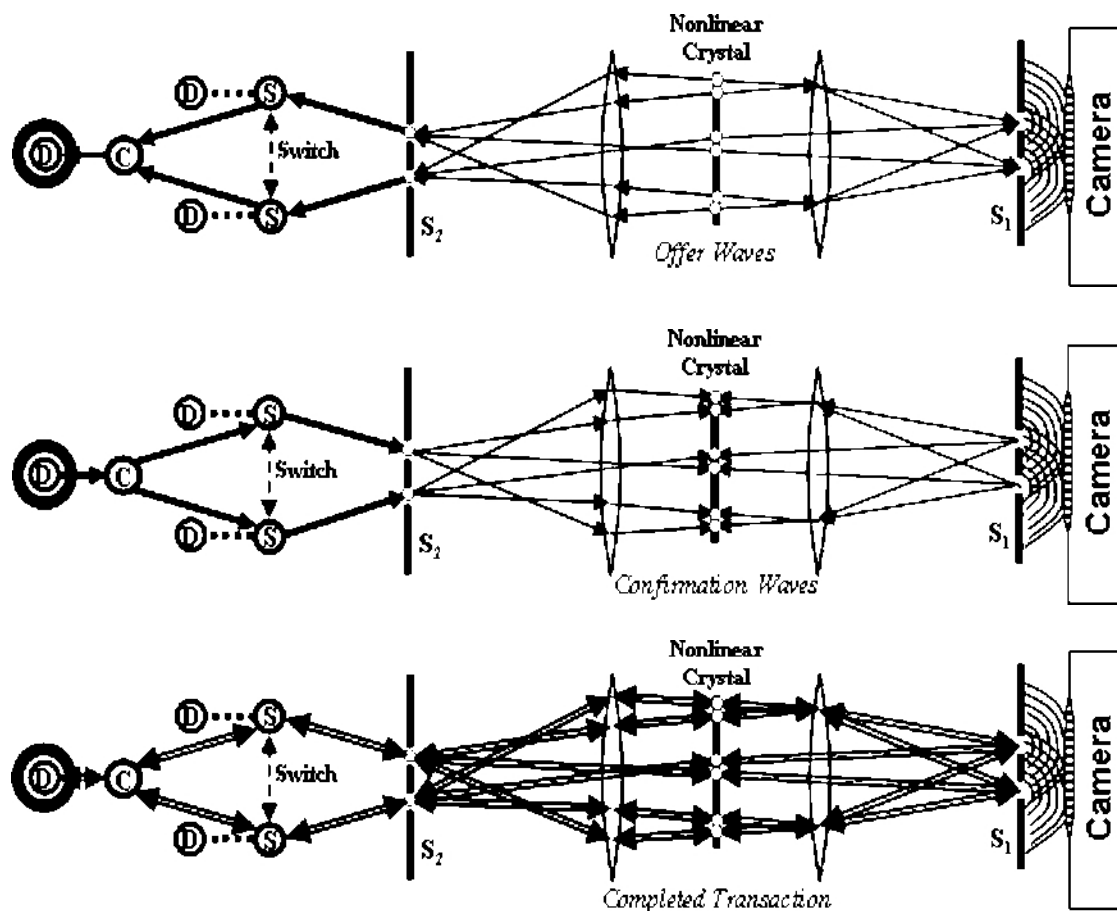


Figura 9. Diagramele de interpretare tranzacțională pentru cazul 2. Undele de ofertă care merg spre stânga trec prin ambele fante ale lui S_2 , unde unde undele sunt combinate și detectate de detectorul central (încercuit). Undele de ofertă right-going, cu momentul de moment, trec prin ambele fante ale lui S_1 , care sunt imaginile optice ale lui S_2 , și interferează la camera de luat vederi. Undele de confirmare se reușește în tranzacția cu două fante se formează.

Prin urmare, din punctul de vedere al interpretării tranzacționale a mecanicii cuantice (Referința 19), conexiunea nelocală dintre evenimentele de detecție de la cele două capete ale experimentului apare deoarece tranzacțiile de detecție pentru cei doi fotoni încurcați trebuie să împărtășească o "strângere de mână în ambele sensuri" la cristalul nelinier, o condiție care poate fi realizată numai atunci când momentele vectoriale însumate ale celor doi fotoni sunt egale cu cele ale fotonului laser de pompare care i-a creat. Acest punct de vedere explică observațiile lui Dopfer (Referința 19) și indică faptul că, în absența unui zgomot copleșitor sau a restricțiilor impuse de complementaritatea coerentă/încrucișare, nu ar trebui să fie nevoie de nicio coincidență între cei doi detectori din experiment pentru a observa acea schimbare a modelului observat la D atunci când detectorul Dz este deplasat. Acest lucru rămâne valabil în configurațiile discutate mai jos, atunci când fanta S_2 este prelungită cu mulți kilometri de

cablu de transmisie a luminii cu fibră optică pentru a permite transmiterea semnalului superluminal și retrocausal transmisie. Cu alte cuvinte, analiza sistemului de testare a comunicării nonlocale cu interpretarea tranzacțională nu relevă niciun aspect care să împiedice transmisia de

UNCLASSIFIED//

semnale superluminale și retro-cazale. Interpretarea tranzacțională este neutră în ceea ce privește posibilitatea ca astfel de semnale să fie posibile.

VIII. Superluminal și retrocausal nonlocal Comunicare

După cum s-a menționat în secțiunea anterioară, vom presupune, de dragul discuției, că este posibilă semnalizarea nelocală și vom analiza implicațiile acesteia asupra vitezei de transmitere a semnalelor. Din motive de claritate, schemele pentru a face acest lucru se bazează pe versiunea fără coincidență a imaginii cu fantă a experimentului Ghost Interference descris mai sus și prezentat în figura 7. În acest sistem, momentul în care este trimis un semnal nelocal este sosirea fotonului VLP la sistemul de fibră optică din stânga, iar momentul în care semnalul este recepționat este sosirea fotonului HLP la ca mera din partea de jos a diagramei. Presupunând că această schemă este funcțională, atât instanțele de emisie, cât și cele de recepție pot fi întârziate, în principiu, prin introducerea în sistem a unor căi de întârziere - de exemplu, trasee de cabluri de fibră optică.

În special, momentul "trimiterii" ar putea fi făcut să apară mult *după* momentul "primirii" în sistem, constituind o demonstrație directă a semnalizării retrocausale. Acest lucru este ilustrat în figura 10. Aici, sistemul de curățare cu două fante Sz devine intrarea pentru două trasee de fibre optice de 10 km lungime, care sunt atent adaptate pentru a avea faze de ieșire identice la $3\pi/2$, capătul traseelor de fibre unde lumina intră în dispozitivul de comutare optică descris mai sus. Dacă indicele de refracție al fibrei este de 1,5, lumina care tranzitează traseul de 10 km necesită aproximativ 50 ns. În prezența zgomotului de detecție sau a degradării vizibilității modelului din cauza compromisurilor dintre încurcare și coerență, ar putea fi necesare mult mai multe evenimente de detecție a fotonilor - să spunem 100 -.

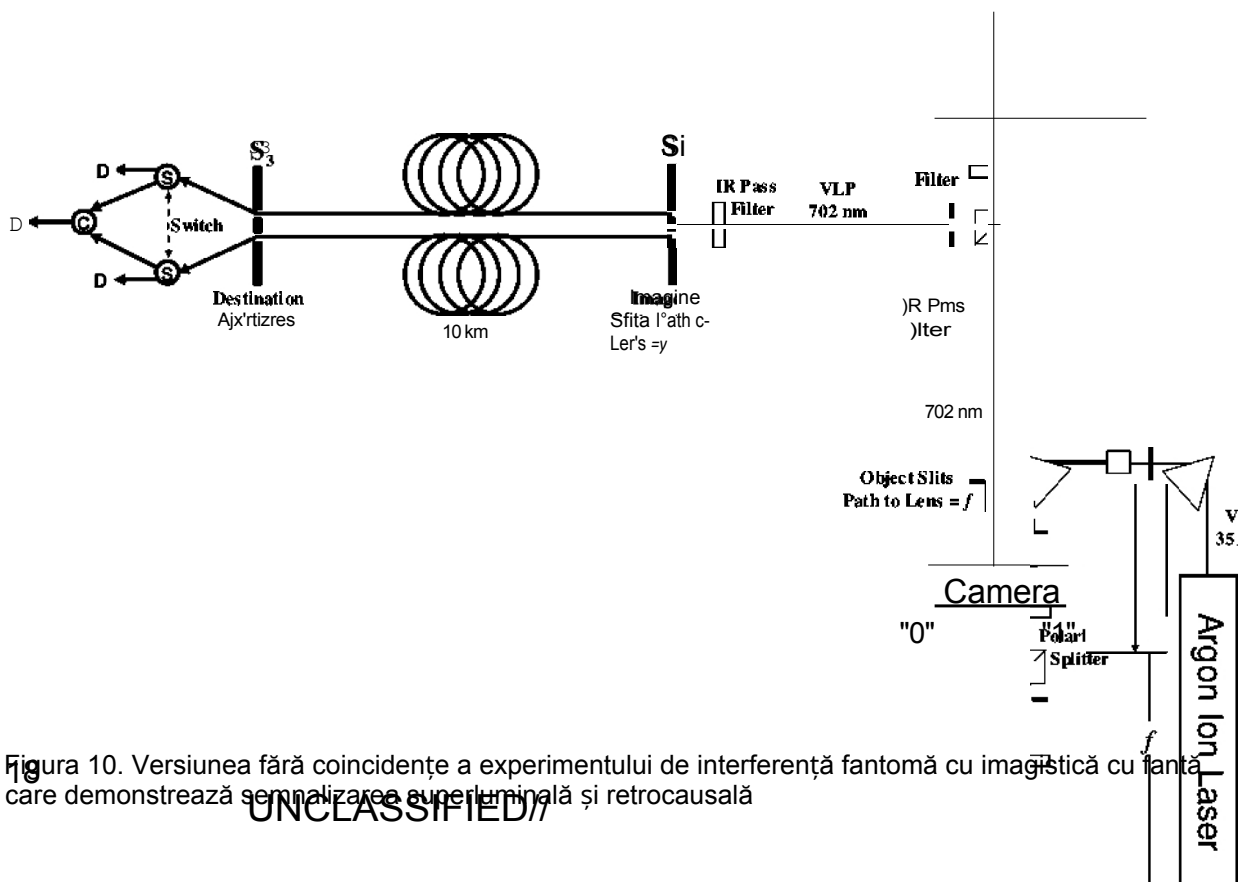


Figura 10. Versiunea fără coincidențe a experimentului de interferență fantomă cu imagistică cu fantă care demonstrează semnalizarea superluminală și retrocausală

Să presupunem că bobinele de fibră din figura 10 rămân înfășurate și depozitate într-un colț al laboratorului și că sursa poate fi suficient de puternică pentru ca rata medie la care sunt detectate perechile de fotoni încurcați să fie de 10 MHz (ceea ce ar corespunde detecției eficiente a aproximativ 3 nW de fotoni de 702 nm). Acest lucru ar necesita o sursă de fotoni încălciți considerabil mai puternică decât cea care poate fi obținută cu cristalele "de masă" BBO sau LiIO₃ utilizate în experimentele Ghost Interference și Dopfer, care produc o pereche de fotoni încălciți utilizabilă din doar aproximativ 1 din ¹⁰¹⁰ fotoni de pompare.

Din fericire, o tehnologie recent apărută face ca producerea perechilor de fotoni încurcați să fie mult mai eficientă prin utilizarea de cristale neliniare "polarizate periodic". În cristalele neliniare "de masă" există un fenomen de "ieșire" care limitează distanța în interiorul cristalului pe care se menține potrivirea de fază, permițând producerea eficientă a perechilor încurcate prin conversie descendentă. Cu toate acestea, cristalele neliniare, cum ar fi fosfatul de titanil potasiu (KTiOPO₄ sau KTP), au coeficienți neliniari foarte mari și sunt, de asemenea, feroelectrice, cu un moment de dipol electric mare. Prin utilizarea unui câmp electric pulsatoriu mare în timpul producerii cristalelor, se poate "scrie" pe cristalele de KTP pentru a schimba orientarea momentului lor dipolar local pe distanțe mici (câteva zeci de lungimi de undă) periodic de-a lungul direcției de pompare prin cristal, astfel încât deriva de fază să se inverseze în mod regulat și să se anuleze pe măsură ce radiația de pompare progresa prin cristal. Acest lucru se numește "polarizare periodică". Cu acest tip de cristale, "walk-out-ul" este suprimat și se pot utiliza cristale foarte lungi care produc eficient perechi de fotoni încurcați pe întreaga lor lungime. Grupul IQOQI al lui Anton Zeilinger din Viena, care utilizează un cristal KTP cu polarizare periodică de 25 mm lungime, a măsurat rata de producție de perechi încurcate la $2,73 \times 10^5$ perechi pe secundă pe mW de radiație de pompare pe nm de lungime de undă⁰. O astfel de sursă ar trebui să poată produce cu ușurință rata de detecție de 10 MHz presupusă mai sus.

Acum, considerați că sistemul de detectare "emițător" și camera "receptoare" se află în aceeași cameră și sunt separate de o distanță de 1 metru sau mai puțin. Dacă întrerupătorul este setat pe poziția 0 sau 1, "mesajul" că se află în acea poziție începe să ajungă la cameră cu 50 ps *înainte ca* poziția întrerupătorului să fie mutată. Dacă 100 de fotoni reprezintă un semnal, atunci, chiar și în cazul în care se ia în considerare latența recepției semnalului, mesajul ar putea fi recepționat cu 40 ps *înainte de a* fi trimis. Aceasta ar fi o demonstrație directă a semnalizării retrocausale care utilizează comunicarea nelocală și ar constitui o încălcare directă a principiului cauzalității.

IX. Paradoxuri și comunicare nelocală Comunicare

Configurația descrisă mai sus, cu legătura sa de comunicare retrocausală, ridică unele paradoxuri de comunicare în timp. În primul rând, să luăm în considerare problema "înșelăciunii". Să presupunem că construim un milion de sisteme legate între ele de tipul celor prezentate în figura 10 (sau că folosim ¹⁰⁷ km de fibră neatensivă). Atunci, mesajul transmis ar fi recepționat cu 40 de secunde înainte de a fi trimis. Să presupunem acum

UNCLASSIFIED//

că un observator înșelător primește un mesaj de la el însuși cu 40 de secunde în viitor și apoi decide să nu-l trimită. Acest lucru produce o buclă temporală inconsecventă, care a ajuns să fie cunoscută sub numele de "paradoxul bilking". Se poate întâmpla acest lucru? Dacă nu, ce ar putea împiedica acest lucru?

În literatura de specialitate din domeniul fizicii există discuții despre astfel de paradoxuri de bilking de către Wheeler și Feynman (Referința 22), care aveau în vedere aspectele retrocausale ale undelor avansate ale teoriei absorbantului, și de către Kip Thorne și colegii săi (Referința 23), care aveau în vedere paradoxurile care ar putea apărea din găurile de vierme temporale. Consensul general al ambelor grupuri este că natura va interzice acest lucru și va necesita un set coerent de

condiții. Thorne și colaboratorii au arătat că "nea rby" la orice situație paradoxală inconsistentă care implică găuri de vierme temporale există întotdeauna o situație autoconsistentă care nu implică un paradox. După cum spunea Sherlock Holmes: "Când imposibilul este eliminat, ceea ce rămâne, oricât de improbabil ar fi, trebuie să fie adevărul". Aceste speculații afirmă că o defecțiune a echipamentului care produce o secvență coerentă de evenimente este mai probabilă decât producerea unei inconsecvențe între evenimentele de trimitere și cele de recepție. Implicațiile acestei afirmații sunt că înșelăciunea în sine este imposibilă, dar evenimente foarte improbabile ar putea fi produse, probabil, pentru a o evita.

Cealaltă problemă ridicată de semnalizarea retrocausală ar putea fi numită paradoxul "concepției imaculate". Să presupunem că folosiți configurația descrisă mai sus și că primiți de la dumneavoastră în viitor manuscrisul unui roman de succes cu numele dumneavoastră ca autor. Îți vindeți unui editor și deveniți bogat și faimos. Iar când, ulterior, vine momentul transmiterii, îți trimiți manuscrisul înapoi la tine însuși, închizând astfel bucla temporală și producând un set de evenimente complet coerent. Dar întrebarea este: cine a scris romanul? În mod clar, nu tu ai scris-o; tu doar ți-ai transmis-o ție însuși. Cu toate acestea, o informație foarte bine structurată (romanul) a fost creată din nimic. Și în acest caz, natura nu ar trebui să se opună, deoarece nu a existat niciun bilking și nu ați produs nicio buclă temporală inconsistentă.

Nu se știe cum se poate rezolva niciunul dintre aceste paradoxuri. Iată câteva posibilități:

- Dacă semnalizarea nonlocală este imposibilă, atunci paradoxurile nu au nevoie de rezolvare, dar ar fi nevoie de dovezi mai bune, mai "ermetice" ale imposibilității semnalizării nonlocale.
- Dacă semnalizarea nelocală este posibilă și poate fi folosită pentru a forma bucle temporale, atunci paradoxurile devin subiecte importante pentru teste experimentale, studii și tratamente teoretice suplimentare.
- După cum a sugerat Stephen Hawking (Referința 24), poate că natura "detestă" buclele temporale, astfel încât, dacă una este pe cale să fie creată, fluctuațiile vidului cuantic vor crește fără limite și vor distruge aparatul care încearcă să producă bucla. Chiar și în acest caz, utilizarea semnalizării nelocale ar putea fi posibilă, cu condiția ca buclele temporale să fie evitate cu grijă în astfel de sisteme. (A se vedea mai jos.)

X. Comunicare superluminală fără Paradoxuri

O cale de a evita paradoxurile retrocausale descrise mai sus ar fi să ne asigurăm că nu există bucle temporale în sistemul de comunicare. Acest lucru poate fi realizat prin aranjarea atentă a întârzierilor de propagare la capetele de emisie și de recepție ale comunicării nonlocale ipotetice.

Să considerăm intervalul spațiu-timp s , definit de ecuația: $s^* = x^* - (ct)^*$, unde x este distanța spațială care separă două evenimente (de exemplu, trimiterea și primirea), t este separarea lor în timp, iar c este viteza luminii. O valoare pozitivă a lui s^* înseamnă că

UNCLASSIFIED/

intervalul este spațial, iar $s=0$ reprezintă un interval asemănător luminii, iar o valoare negativă a lui s^2 înseamnă că intervalul este temporal. Intervalul s este o mărime invariantă Lorentz care, în special, își păstrează semnul independent de alegerea cadrului de referință inerțial din care sunt privite cele două evenimente.

Atâta timp cât sistemul de comunicare nelocală este aranjat astfel încât intervalul spațio-temporal dintre emițător și receptor să fie întotdeauna separat de un interval spațial sau

interval asemănător luminii și, în special, nu este niciodată separat de un interval temporal care poate merge înapoi în fluxul temporal, atunci buclele temporale sunt evitate, împreună cu paradoxurile pe care le implică.

Figura 11 prezintă un astfel de sistem. Fotonii încurcați din cele două brațe ale sistemului se propagă prin cabluri de fibră optică de lungime egală. Prin urmare, în cadrul de referință al sistemului, evenimentele de trimitere și de recepție sunt simultane și, în afară de latența asociată cu recepția unui număr suficient de fotoni pentru a stabili recepția unui bit de semnal, comunicarea este instantanee, dar nu creează o buclă temporală

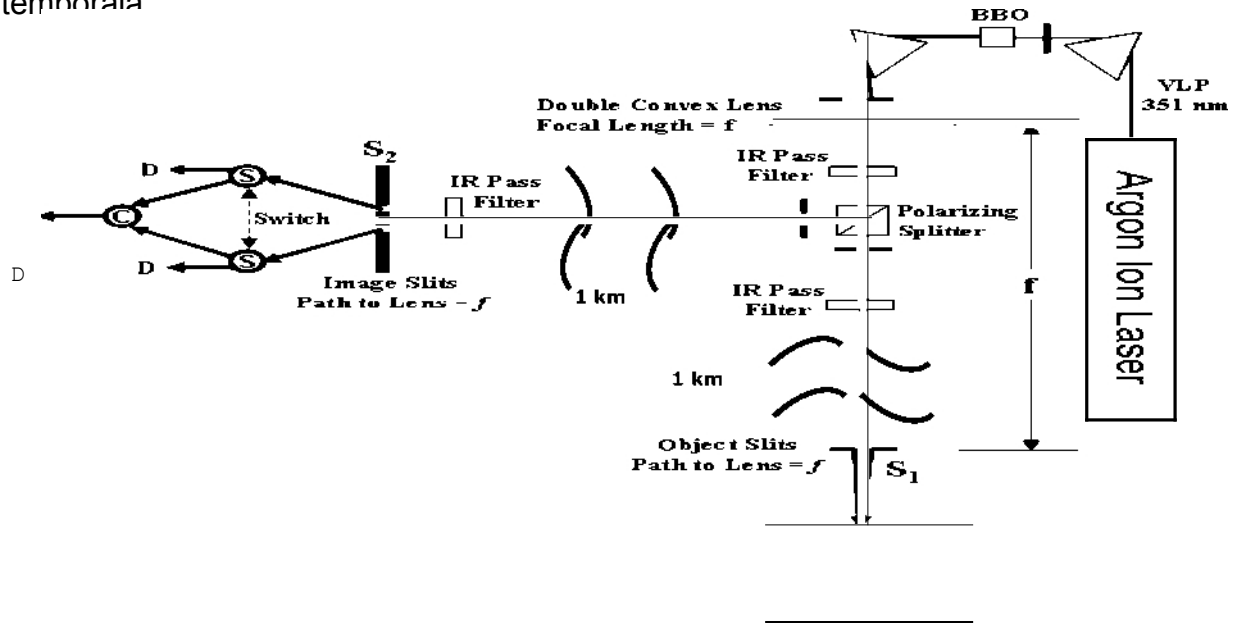


Figura 11. Un sistem de comunicație nelocală superluminal în care comunicarea se întinde pe un interval spațial

XI. Exemplu: Controlul în timp real de pe Pământ al Mars Rover

Să luăm acum în considerare aplicația unui "rover" operat la distanțe interplanetare, cu comunicații nonlocale utilizate pentru a asigura controlul în timp real al "realității virtuale" a dispozitivului mobil. Figura 12 prezintă o schemă a funcționării pe bază de energie electrică a unui "rover" pe Marte. O stație de bază de pe Marte ar conține o sursă de mare intensitate de perechi de fotoni încurcați.

Un flux de fotoni din perechile încurcate, după ce trece prin fantele de imagine, ar fi transmis de la sondă la o stație de control de pe Pământ, permițând "trimiterea" unui semnal nelocal de la stația de control printr-o secvență de timp în care se alege dacă să se detecteze fluxul de fotoni care sosesc ca unde sau particule. Celălalt flux de fotoni de la perechile încurcate, după ce trece prin fantele obiectului, ar fi detectat local la stația de bază de pe Marte din apropierea sursei și ar fi analizat prezența sau absența

UNCLASSIFIED/

unui model de interferență, "primind" astfel semnalul nelocal ca un "0" sau, respectiv, un "1" logic.

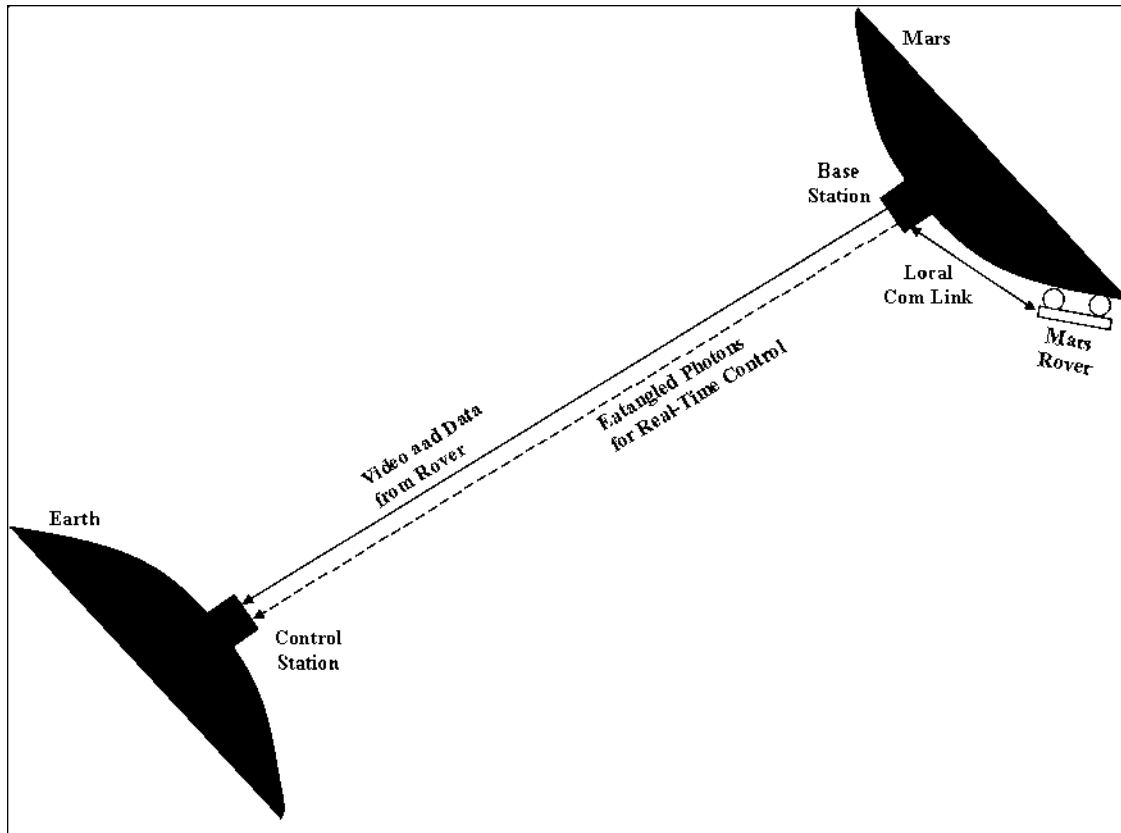


Figura 12. Schema de control în timp real Pământ-la-liare a unui rover

Pentru a evita necesitatea de a transmite două fluxuri de fotoni încurcați, echivalentul celor două legături de fibră optică din figura 10, la stația de bază, fotonii de la o fantă a imaginii vor fi polarizați orizontal, iar cei de la cealaltă fantă vor fi polarizați vertical înainte de transmitere. Apoi, la stația de control de pe Pământ, detectarea polarizării fotonilor din flux ar constitui măsurători de "particule", în timp ce separarea, rotirea la aceeași stare de polarizare și recombinarea undelor astfel încât acestea să poată interfera înainte de detectare ar constitui o măsurătoare de "unde".

În paralel cu această legătură nelocală, o legătură convențională cu microunde sau optică ar fi utilizată pentru a comunica imagini video și alte date către stația terestră. Imaginile video și datele ar suferi o întârziere de propagare egală cu distanța de transmisie împărțită la viteza luminii și ar ajunge la stația terestră la câteva secunde, minute sau ore după ce au fost transmise. Fotonii încurcați ar suferi aceeași întârziere, dar semnalul de control nelocal ar fi trimis înapoi în fluxul temporal, ajungând la sonda în momentul în care semnalele video și datele sunt transmise, astfel încât semnalul nelocal ar putea dirija și controla sonda în timp real, iar un operator de pe Pământ ar putea "conduce" roverul pe Marte folosind tehnici de realitate virtuală. Ne putem imagina conducerea Roverului Plars în jurul planetei, în mod activ ocolirea obstacolelor, activarea în timp real a instrumentelor de analiză pe măsură ce erau găsite obiecte interesante și controlul activ al echipamentelor de reparații pentru a rezolva problemele apărute.

O astfel de buclă de comunicație (convențională + nelocală) ar fi o buclă

asemănătoare luminii, cu punctele de emisie și recepție bidirecționale situate pe conul de lumină. Ca atare, ea nu ar

UNCLASSIFIED/

duce la probleme de cauzalitate sau paradoxuri, dar ar aduce la distanță părțile îndepărtate ale sistemul solar și poate universul până aici și acum.

XII. O altă posibilitate superluminală: cuantică neliniară Mecanică

Până în prezent, accentul a fost pus pe posibilitatea comunicării nelocale în cadrul mecanicii cuantice standard. Cu toate acestea, chiar dacă comunicarea nonlocală se dovedește imposibilă în cadrul mecanicii cuantice standard, ar putea exista o altă cale către comunicarea nonlocală.

Teoremele fără semnal descrise în partea III de mai sus se bazează pe formalismul mecanicii cuantice standard. Astfel de "demonstrații" devin invalide dacă mecanicii cuantice i se permite să fie ușor "neliniară", un termen tehnic care înseamnă că atunci când undele cuantice sunt suprapuse, ele pot genera un mic termen încrucișat care nu este prezent în formalismul standard. Steven Weinberg, laureat al premiului Nobel pentru activitatea sa teoretică în unificarea interacțiunilor electromagnetice și slabă, a investigat o teorie care introduce termeni mici, neliniari, în mecanica cuantică standard (Referința 25). Apariția comportamentului neliniar este observată în alte domenii ale fizicii - de exemplu, lumina laser în anumite medii - și, a sugerat el, ar putea fi prezentă, dar neobservată, și în mecanica cuantică însăși.

Mecanica cuantică neliniară a lui Weinberg modifică subtil anumite proprietăți ale teoriei standard, producând noi efecte fizice care pot fi detectate prin măsurători precise.

La doi ani după ce a fost publicată teoria mecanicii cuantice neliniare a lui Weinberg, Joseph Polchinski a publicat o lucrare în care demonstrează că corecțiile neliniare ale lui Weinberg au perturbat echilibrul mecanicii cuantice care împiedică comunicarea superluminală, folosind experiențele EPR (Referința 26). Prin intermediul noilor efecte neliniare, măsurători separate asupra aceluiași sistem cuantic încep să "vorbească" între ele, iar semnalizarea mai rapidă decât lumina și/sau înapoi în timp devine posibilă. Polchinski descrie un astfel de aranjament drept un "telefon EPR".

Lucrarea lui Weinberg/Polchinski a avut implicații devastatoare pentru reprezentarea funcției de undă ca "cunoaștere a observatorului" în cadrul Interpretării de la Copenhaga. Polchinski a arătat că o mică modificare neliniară transformă nonlocalitatea "ascunsă" a formalismului standard al QM într-o proprietate manifestă care poate fi utilizată pentru comunicarea nelocală de la observator la observator. Acest lucru este complet incompatibil cu interpretarea "cunoașterii" din Interpretarea de la Copenhaga.

Predicțiile experimentale ale lui Weinberg au condus la un număr mare de teste experimentale care au căutat efectele prezise. Din păcate, toate aceste încercări experimentale de a observa efectele neliniare au eșuat, producând doar limite superioare foarte scăzute. Aparent, dacă există efecte neliniare care modifică formalismul cuantic, acestea sunt extrem de mici în laboratoarele de pe Pământ. Totuși, aceste rezultate negative nu sunt surprinzătoare, deoarece tranzițiile atomice utilizate implică doar câțiva electron-volți de energie. Dacă mecanica cuantică are într-adevăr proprietăți neliniare, este de așteptat ca acestea să depindă de masa-energie și să apară doar la o scară

UNCLASSIFIED/

UNCLASSIFIED/

energetică foarte mare, în special la cele mai mari densități de energie sau în câmpuri gravitaționale foarte mari. În lumea de zi cu zi a gravitației slabe și a spațiului destul de plat, această cale către comunicarea nelocală pare să fie blocată, deoarece "vehiculul" de transmitere a semnalului nu este observabil.

22

UNCLASSIFIED/

Cu toate acestea, lucrările privind gravitația cuantică oferă posibilitatea unei forme explicit neliniare a mecanicii cuantice care se reduce la mecanica cuantică liniară în cazul limită al gravitației slabe sau inexistente. Utilizând imaginea ondulatorie, este posibilă formularea unei ecuații de undă Laplace-Beltrami pentru spațiul curbat gravitațional. Operatorul Laplace-Beltrami din partea stângă conține informații despre geometria spațiu-timp (tensorul metric) și operează asupra funcției de undă. În partea dreaptă se află același termen care se găsește în ecuația de undă Klein-Gordon a spațiului plat. În spațiul plat (fără gravitație), această ecuație de undă "a spațiului curbat" se reduce la ecuația de undă Klein-Gordon, dar în spațiul curbat este neliniară într-un mod care ar putea facilita comunicarea nelocală. Astfel, într-un mediu în care se așteaptă o curbura puternică a spațiului - de exemplu, în vecinătatea unei stele neutronice sau a unei găuri negre - ar putea exista o neliniaritate cuantică suficientă pentru a facilita comunicarea nelocală.

XIII. Concluzie

În cele din urmă, întrebarea dacă este posibilă comunicarea nonlocală este una experimentală. Problema ar trebui să poată fi rezolvată prin testarea comunicării nonlocale și prin observarea limitelor experimentale care apar. În special, sunt limitele complementarității coerență/încrucisare atât de severe încât să împiedice semnalizarea. În prezent, cel puțin un experiment în curs de desfășurare are ca scop producerea unei versiuni fără coincidență a experimentului Ghost Interference. Așteptăm rezultatul unor astfel de teste.

Apendice: Glosar

Baza: În mecanica cuantică, alegerea unei mărimi observabile care poate fi complementară cu o altă variabilă, astfel încât ambele nu pot fi măsurate în același timp. Un exemplu este alegerea măsurării poziției, care împiedică măsurarea simultană a impulsului. În experimentele EPR, trebuie să se aleagă o bază de polarizare (de exemplu, polarizarea liniară care poate fi verticală sau orizontală). Deoarece atât polarizarea circulară, cât și polarizarea de 45° stânga/dreapta sunt suprapuneri liniare ale polarizării verticale/orizontale, acestea nu pot fi măsurate simultan. În mecanica cuantică, măsurarea face ca funcția de undă să se prăbușească la o anumită valoare de bază, excluzând alte valori posibile.

Teorema lui Bell: O demonstrație matematică realizată de John S. Bell (Referința 8) care demonstrează că, într-un experiment EPR bazat pe polarizare, scăderea corelațiilor pe măsură ce unghiul de bază al unei măsurători de polarizare este diferit din punct de vedere calitativ, așa cum prevăd teoriile locale cu variabile ascunse și mecanica cuantică standard. În special, teoriile locale cu variabile ascunse prevăd o scădere liniară, în timp ce mecanica cuantică prevede o scădere pătratică. Această diferență în predicții este reprezentată ca o inegalitate în raporturile de intensitate a măsurătorilor pe care toate teoriile locale cu variabile ascunse trebuie să o satisfacă, în timp ce mecanica cuantică nu o satisface. S-a constatat că testele acestor predicții sunt conforme cu mecanica cuantică și falsifică teoriile locale cu variabile ascunse.

Mulsul Paradox: Un tip de comunicare back-in-time pe radox în care se creează o buclă cauzală inconsecventă. Un exemplu bine cunoscut este Paradoxul bunicii, un scenariu de călătorie în timp din science fiction în care un călător în timp călătorește în trecut și își ucide bunica înainte ca aceasta să aibă copii. Se pune întrebarea: Cum ar fi putut să se nască dacă bunica sa nu a avut copii? Mai multe lucrări din literatura de specialitate în domeniul fizicii (referințele 17, 18) au ajuns la concluzia că o astfel de înșelăciune transtemporală este imposibilă, că natura nu va permite bucle temporale inconsistente și că este mai probabil ca un aparat să dea greș decât să se poată realiza o "înșelăciune" a naturii.

Cauză/itate: Observația, care este considerată o lege a fizicii, conform căreia o cauză trebuie să preceadă efectele sale, privite în toate cadrele de referință. Uneori menționată ca "cauză și efect" sau "legea cauzei și efectului".

Corelații: Legătura matematică dintre două variabile sau două mărimi măsurate. De exemplu, într-o măsurătoare EPR, se selectează polarizarea de bază a unui foton, se variază polarizarea de bază a fotonului gemelar încurcat și se măsoară rata de numărare a coincidențelor în funcție de unghiul variat pentru a stabili corelația dintre cele două polarizări.

Coerența: Descrie dacă două unde (de exemplu, cele care ajung la o pereche de fante sau la un detector) au o relație de fază definită (caz în care sunt complet coerente), au o relație de fază aleatorie (caz în care sunt complet incoerente) sau au o relație intermediară.

UNCLASSIFIED/

Complementaritatea coerență-încrucișare Complementaritate: Așteptarea teoretică și observația experimentală (Referința 15) conform căreia coerența perfectă și încurcarea perfectă nu pot fi obținute în același timp pentru o pereche de fotoni încurcați.

UNCLASSIFIED/

Superpoziție coerentă: Formarea unei stări de mecanică cuantică (de exemplu, polarizarea circulară dreaptă) prin adăugarea de componente ale altor stări (de exemplu, polarizarea dreaptă și stângă) cu o fază complexă definită între stările adăugate.

Colaps: Se spune că o funcție de undă mecanică cuantică se prăbușește la o anumită valoare de bază atunci când se face o măsurătoare în baza respectivă. De exemplu, dacă un foton este emis izotrop (cu probabilitate egală în toate direcțiile), funcția sa de undă este distribuită uniform pe o sferă cu o rază care crește cu viteza luminii până când este detectat. În momentul detectării, funcția de undă a fotonului este localizată în punctul de detecție și dispare peste tot în rest.

Încurcate: Părțile separate ale aceluiași sistem cuantic se spune că sunt încurcate atunci când fiecare dintre părți poate fi descrisă numai prin referire la starea celorlalte părți. Acesta este unul dintre cele mai contraintuitive aspecte ale mecanicii cuantice, deoarece, în mod clasic, părțile sistemului care nu au contact "local" ar trebui să fie complet independente. Astfel, încălcarea reprezintă un fel de "conectivitate" cuantică, în care măsurătorile efectuate asupra unei părți izolate a unui sistem cuantic încâlcit au consecințe neclasice asupra rezultatelor măsurătorilor efectuate asupra altor părți (eventual foarte îndepărtate) ale aceluiași sistem.

EP? Experiment: O clasă de experimente cu particule încurcate, de obicei fotoni, care demonstrează nonlocalitatea cuantică. Un astfel de experiment a fost sugerat pentru prima dată în celebra lucrare din 1936 a lui Einstein, Podolsky și Rosen (Referința 4), în care au fost prezentate o serie de critici ale mecanicii cuantice.

Teorii ale variabilelor ascunse: Un set de alternative la mecanica cuantică menite să satisfacă obiecțiile din lucrarea EPR, în care principiul incertitudinii nu se aplică și un sistem cuantic poate avea simultan valori definite ale unor variabile complementare, cum ar fi poziția și impulsul, cu condiția ca una dintre aceste valori să fie cumva "ascunsă". Teoriile ascunse variabile sunt de obicei și "locale" (a se vedea mai jos) pentru a face față obiecției lui Einstein privind nonlocalitatea mecanicii cuantice.

concepție imaculată Paradox:: Un tip de comunicare back-in-time pe radox în care o buclă causală complet coerentă produce informații fără origine cunoscută. Un exemplu este Paradoxul cărții, în care un autor primește o carte într-un mesaj din via. O publică, iar la momentul potrivit își transmite manuscrisul în trecut. Se pune atunci întrebarea: Cine a scris cartea? În acest caz, nu sunt implicate bucle temporale incoerente, iar argumentele împotriva lui bil king (vezi mai sus) nu se aplică în acest caz.

Localitate: Ipoteza conform căreia corelațiile dintre părțile unui sistem pot fi stabilite numai în timp ce subsistemele se află în contact (sau comunicare cu viteza luminii) și că, odată ce nu mai sunt în contact, nu mai sunt posibile modificări ale acestor corelații.

Nonlocalitatea: Situația, aparent prezentă în mecanica cuantică, în care corelațiile dintre părțile unui sistem pot fi stabilite independent de separarea părților în timp și spațiu.

UNCLASSIFIED/

Retro-Causa/: Situații teoretice sau din lumea reală în care efectul precede cauza, încălcând principiul cauzalității.

- S. 1. Freedman și 1. F. Clauser, Phys. Rev. Letters, 2fi, 938-942 (1972).
- ²A. Aspect, 1. Dalibard și G. Roger, Phys. Rev. Letters, d9, 91-95 (1982); A. Aspect, 1. Dalibard și G. Roger, Phys. Rev. Letters, d9, 1804 (1982).
- Erwin Schrödinger, Proc. of Cambridge Philosophical Society, 3J, 555-563 (1935); 32, 446-451 (1936).
- A. Einstein, B. Podolsky și N. Rosen, Physical Review. V2', 777-785 (1935)
- ^o Jon P. Barrett, Nous, is, s6g (i 984).
- " Abner Shimony, *Concepte cuantice în :fipace și Time*, R. Penrose și C. 1. I șamd, eds., capitolul 12, pp. 182-203, Clarendon Press, Oxford (1986).
- C. S. Wu și I. Shanknav, Phys. Rev., 77, 136 (1950).
1. S. Bell, Physics, vol. 1, ig s 964); Rev. of Modern Physics, 3fi, 447 (i g66 .
- W. Tittel, . Brendel, H. Zbinden și N. Gisin, Phys. Rev. Letters, BJ, 3563-3566 (1998) .
- ^o Anthony 1. Leggett, Foundations of Physics 33, 1469 (2003)
- " S. G röblacher, T. Paterek, R. Kaltenbaek, C. Brukner, M. Zukowski, M. Aspelmeyer și A. Zeilinger, "An experimental test of non-local realism", Nature 4d6, 871-875 (2007).
- ^{*2} Heinz Pagels, *FAe Cosmic Code*, Simon & Schuster, NY (1982).
- ^{*^} P. H. Eberhard, Nuovo Cimento B 3B, 75 (1977), ibid. B d6, 392 (1978); G. C. Ghirardi, A. Rimini, și T. Weber, Lett. Nuovo Cimento 27, 293-298 (1980); U. Yurtsever și G. Hockney, Classical and Quantum Gravity 22, 2g s-31 2 (2005), g r-qc/0409 112.
- ^{*^} K. A. Peacock și B. Hepburn, Proceedings of the Meeting of the Society of Exact Philosophy (1999), quant-ph/9906036.
- " L. Handel și E. Wolf, *Coerența optică și optica cuantică*, capitolul 22.4, Cambri 9e University Press. (1995).
- ^{*6} D. V. Strekalov, A. V. Sergienko, D. N. Klyshka, și Y. H. Shih, Phys. Rev. Letters, 7d, 3600-3603 (1995) .
- ^{*1} B. Dopfer, teza de doctorat, Univ. Innsbruck (1998); A. Zeilinger, Rev. Modern Physics 7J, 5288-5297 (1999).
- [^] A. F. Abouraddy, M. B. Nasr, B. E. A. Saleh, A. V. Sergienko și M. C. Teich. Phys. Rev. A, 63, 063803 (2001).
- ^o John G. Cramer, Reviews of modern Physics SB, 647 (1986); Io hn G. Cramer, International Journal of Theoretical Physics 27, 227 (1988); Bahn G. Cramer, Foundations of Physics Letters J9, 63-73, (2006).
- ^{2°} A. Fed rizzi, T. Herbst1, A. Pappé, T. Jennewein1 și A. Zeilinger, Optics Express JS, 15377 (2007).
- ²¹ Ludwi9 Zehnder, Z. I nstrumentenkunde ££, 275 (1891); Ludwig nach, Z. Instrumentenkunde :t2, 89 (1892).
- ^{*2} 1. A. Wheeler și R. P. Feynman, Rev. Tod. Physics, 2s, 425-433 (1949).
- ^{*^} F. Eschenerria, G. Klinkhammer, și K. S. Thorne, Phys. Rev. D, dd, 1077-1099 (1991).
- ^{2^} S. W. Hacking, Phys. Rev. D d6, 603-611 (1992).
- ^{2*} Steven Weinberg, Physical Review Letters, 62, 485-490 (1989).
- ^{*6} Joseph Polchinski, Physical Review Letters, 66, 397-401 (1991).