

# Telegarraio Kuantikoa

*I.L. Egusquiza*

*J. Urrestilla*

Fisika Teorikoaren Saila  
Euskal Herriko Unibertsitatea / Zientzi Fakultatea  
644 P.K., 48080 BILBO

**Laburpena:** Telegarraioa zientzia fikziozko ideia hutsa dela uste izan dugu beti, baina benetan hala ote? Mekanika kuantikoak telegarraioaren ateak ireki dizkigu. Artikulu honetan, telegarraioa definitzean egon daitezkeen arazoak zehazten saiatu gara; orobat saiatu gara adibide erraz baten bidez gaur egun egiten saiatzen ari diren esperimentuak azaltzen. Agian luze itxaron beharko dugu telegarraioaren erabilpen praktikoa edukitzeko, baina mekanika kuantikoaren bitxikerietan murgiltzen laguntzen digu.

## SARRERA

Imagina ezazu Donostiatik Bilbora liburu bat bidali nahi duzula. Gaur egun, postaz egingo zenuke. Baina - irudimena dohainik dela eta - behar bada mila urte barru beste aukera bat egongo da: liburua ordenagailuaren ondoan egongo litzatekeen kutxa batean sartuko zenuke, ordenagailuaren pantailan agertuko liratekeen zenbaki batzuk e-postaz zure Bilboko lagunari bidali, eta berak, berehala, liburua bere ordenagailuaren ondoko kutxatik hartuko luke.

Hori gertatzeari «telegarraioa» deritzogu, eta zientzia fikziozko ametsetan baino ez dugu inoiz ikusiko. Edo behar bada bai? Orain dela urte batzuk IBM-ko eta beste instituzioetako ikertzaile talde handi batek neurri batean sistema kuantikoen ezaugarri bereziak erabiliz posible izango zela proposatu zuen (Bennet et al. 1993): «telegarraio kuantikoa», hain zuzen ere.

«Kuantiko» izenondoa zergatik agertzen den argitzeko, zehaztasun batzuk aipatu behar ditugu. Hasteko, liburua bera edo liburuari dagokion informazio guztia garraiatzea gauza bera da: liburuari dagokion informazio guztia izanez gero, hasierako liburuaren kopia berdina egitea posible litzateke. Beraz, gaur egun telegarraioa jadanik badugu: zer ote da bada

fotokopiak ateratzea, edo faxak bidaltzea? Benetako telegarraioa osatzen ez dutela esateko bi arrazoi nagusi dauzkagu: lehenengoa, liburuaren informazio **guztia** lortu ez dugula; eta, bigarrena, hasieran geneukan liburua berreskuratu dugula.

Has gaitezen lehenengo arrazoia ikertzen: pentsa genezake liburuaren informazio guztia ezagutuko genukeela, liburuan agertzen diren hitz guztiak (eta euren ordena!) jakinez gero. Izatez, hori izango litzateke liburuak dakarren liburuaren gaiari buruzko informazio guztia, baina ez liburuari berari dagokion informazio guztia: zerez egina den, zein koloretakoa den ez dakigu. Ikusten den moduan, ez da erraza liburuaren informazio guztia zein den ondo zehaztea: orrialde bakoitzaren kolorea jakin behar dugu, edo beharbada paperaren ehundura? Fisikarion lehenengo erantzuna ondokoa da: liburua osatzen duten partikula guztien posizio eta abiadura une batean, eta partikulen arteko elkarrekintza deskribatzen duen potentziala jakinez gero, liburuari dagokion informazio guztia izango genuke. Argi utzi behar dugu hainbeste informazio lortzea ezinezkoa dela. Printzipioz, mekanika klasikoak ez digu oztoporik jartzen ezagutze hori eskuratzeko, baina bi motatako mugak agertzen zaizkigu: tenperatura, alde batetik, eta ziurgabetasunaren printzipio kuantikoa, beste aldetik.

## **EZAGUTZE AKASTUNA**

Ziurgabetasunaren printzipioak diosku ezin dugula partikula baten posizioa eta abiadura aldi berean zehaztu. Posizioa neurtzean sorturiko errorea  $\Delta x$  izanik, eta momentuari dagokiona  $\Delta p$  (momentua masa bider abiadura da), ziurgabetasunaren printzipioaren adierazpen matematikoa ondokoa da:  $\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$ , non  $h$  Planck-en konstantea den. Demagun atomo baten posizioaren errorea atomoaren neurria baino txikiagoa izatea nahi dugula. Horrek esan nahi du abiaduran neurturiko erroreak 300 metro segunduko ( $\sim 1000$  km/h) baino handiagoa izan beharko duela.

Nahiz eta errore honek handia iruditu, izatez, tenperaturagatik sorturiko errore estatistikoa bestea baino askoz handiagoa da. Tenperatura kontzeptua nahiko zaila da; nolabait esateko, ingurune eta sistemaren arteko elkarrekintza estaltzen du tenperaturak. Gorputz baten tenperatura  $27^\circ\text{C}$  dela esatean, gorputzak ingurunearekin elkaraldatzen duen energiari buruzko informazioa ematen ari gara.

Izatez, gorputz bat oso beroa dela esaten dugunean, azpian dagoen ideia hau da: bere osagaiak diren partikulen abiadurak oso handiak dira, eta partikulen arteko, eta ingurune partikulekin suertatzen diren talkak eta elkarrekintzak une guztietan gertatzen dira. Ondorioz, zehaztasun osoz partikulak non dauden jakitea ezinezkoa da.

Beraz, oztopo handiak daude sistema konplexu baten partikula guztien posizioak eta abiadurak ondo zehazteko, tenperaturagatik edo ziurgabetasun kuantikoagatik.

Beharbada hori, partikula guztien posizioak eta abiadurak zehaztea, ez da guztiz beharrezkoa: apalategian daukagun liburuaren egoera fisiko zehatza ez da berdina orain, zuk hau irakurtzen duzun momentuan, eta guk lerro hau idatzi dugun unean, baina ez genuke esango liburua aldatu denik. Hots, agian ez dugu lehen aipatutako informazio guzti hori behar liburuaren kopia sortzeko. Baina, edozein kasutan, sistema konplexu bat kopiatzeko edo berreskuratzeke behar izango dugun informazioa gehiegi izango litzateke guk erabiltzeko: Estatu Batuetako «National Institutes of Health» delakoak pertsona bati buruzko informazio guztia lortu nahi du, milimetro bateko bereizmenez, eta proiektu hori osatzeko 15 Gigabyte behar izango dituzte, hau da, 15 CD ROM behar izango dituzte informazio hori gordetzeko (Ikus ezazu [http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible\\_human.html](http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html)). Eta eskaturiko bereizmena nahiko murriztua da: ile bakoitzaren kokapena, esate baterako, guztiz okerra izango da.

Eztabaida honek frogatu nahi izan duenez, hiru motatako oztopoak ditugu telegarraioa lortzeko:

1. igorri nahi dugun gauzari buruzko informazio beharrezkoa zehaztea;
2. oztopo teknikoak: informazio kopurua handiegia izatea;
3. funtsezko arazoak:
  - i) tenperatura nulua ez izatea;
  - ii) ziurgabetasunaren printzipioa.

## SISTEMA ERRAZ BAT

Lehenengo oztopo motarekin lotuta dago aurrerago aipatutako telegarraioa lortu ez dugula esateko arazoia: hasieran geneukan liburua berreskuratuko genukeelako. Esango genuke garraiorik izan ez dela, leku berean hasierako objektua geratu delako. Baina hori esateko nolabait liburu horren izaera finkatu edo zehaztu dugula suposatzen dugu.

Ikusten den moduan, oso filosofiko bihur daiteke gai honi buruzko eztabaida. Horrexegatik, komenigarri gertatuko zaigu sistema oso erraz bat aztertzea: bi egoera posible dituen sistema bat. Hau da, piztua eta amatatua, beterik eta hutsik, edo gora eta behera. Lehenengo egoera  $|0\rangle$  ikurraz izendatuko dugu, eta bigarrena  $|1\rangle$  ikurraz. Sistema klasikoa bada, egoera posible bakarrak horiek dira,  $|0\rangle$  eta  $|1\rangle$ . Beraz, lehenengo eta bigarren motetako oztopoak alboratzen ditugu: sistemaren egoera zehazteko bit bat bakarrik behar dugu, hau da, soilik 0 edo 1 aukeren artean bereizi behar

dugu. Informazio hori ez da gehiegi garraiatzeko eta identifikatzeko. Zer gertatzen ote da 3. motako oztopoekin?

3 i) oztopoa ez dugu aurkituko sistema isolatua baldin bada. Lehenago esan dugun bezala, tenperatura nolabait sistemaren eta ingurunearen elkarrekin ondorioa da. Beraz, ikertu nahi dugun sistema benetan isolaturik dagoela jorik, ez dugu tenperatura kontuan hartzen. Beste modu batean esanez, egoera bien arteko energia diferentzia ingurunearen tenperaturari dagokion energia neurria baino askoz handiagoa bada, ez dugu tenperatura kontuan hartu behar ( $T$  tenperaturari dagokion energia neurria  $kT$  da, non  $k$  Boltzmann-en konstantea den,  $k = 1,38066 \cdot 10^{-23}$  J/K; beraz, 300 K tenperaturari  $4 \cdot 10^{-21}$  J dagokio).

3 ii), antzera, ez dugu kontuan hartu behar, sistema klasikoa denean. Berrero ere, eskalak konparatu behar ditugu. Orain, energiaren gain, sistemaren denbora eskala ezaugarriena kontuan hartu behar dugu. Denbora eskala hori bider egoera bien arteko energia diferentzia Planck-en konstantea baino askoz handiagoa bada, ahantz dezakegu ikuspuntu kuantikoa.

Beraz, sistema erraz honetan, klasikoki ikusita, dena ondo apaindurik daukagu informazioa garraiatzeko: sistemaren egoera neurtuz gero, gure lagunari irriti seinala bat bidaliko genioke (seinala luzea,  $|1\rangle$  egoerari legokioke, eta seinala laburra  $|0\rangle$  egoerari, adibidez), eta gure lagunak alboan prest zukeen sistema gure sistemaren egoera hartzera behartuko luke. Hori egin ondoren, ez legoke modurik hasierako sistema eta kopia desberdintzeko, hasierako sistemaren egoera neurtzean sistema bera aldatu ez badugu behintzat.

## SISTEMA KUANTIKOA

Alderdi kuantikoak kontuan harturik, bestalde, ezin dugu prozedura hau jarraitu, neurketak eta egoerak bat ez datozelako. Mekanika klasikoan neurketak egoera zehazten du: 0 neurketa egin ondoren, badakigu sistemaren egoera  $|0\rangle$  zela. Sistema erabili dugun moduan berrero prestatuz gero, neurketa, inolako zalantzarik gabe, berrero 0 izango da.

Sistema kuantikoetan, beste aldetik, neurketak ez du egoera zehazten: demagun sistema bat prestatu dugula, modu batean, eta neurketa egin ondoren, emaitza 0 dela. Demagun orain berrero prestatzen dugula, prestakuntzan ezer aldatu barik, eta berrero neurtzen dugula: emaitzak ez du (orokorrean) berrero 0 izan behar.

Baina **egoera** aipatzen dugunean, fisikariok pentsatzen dugu sisteman egin daitezkeen neurketa guztiak egoerak zehaztu behar dituela.

Nola esan dezakegu bada egoerak neurketa zehazten duela? Mekanika kuantikoaren erantzuna hau da: egoerak neurketaren emaitzen **probabilita-**

**teak** zehazten ditu, eta ez neurketa indibidualak. Egoera zehazteko, neurketa kopuru infinitu egin behar dugu, neurketa batek edo zenbaki finitu batek ez dute egoera zehazten.

Horrexegatik, egoerak ez du  $|0\rangle$  edo  $|1\rangle$  bakarrik izan behar:  $|f\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$  gainezarmena (batura) ere posible da fisika kuantikoan, non  $a$  eta  $b$  zenbaki konplexuak diren, eta  $|a|^2 + |b|^2 = 1$  baldintza betetzen den.  $|f\rangle$  egoera aztertzean, 0 emaitza lortzeko probabilitatea  $|a|^2$  da, eta 1 lortzeko  $|b|^2$ . Hots, sistema kuantiko honen egoera deskribatzeko, bit bat ez da aski: bi zenbaki erreal behar ditugu<sup>1</sup>.  $|a|^2$  eta  $|b|^2$  zenbakiak probabilitateak direnez, neurketa kopuru infinitua egin behar dugu egoera guztiz zehazteko, eta egoera berreskuratzeko bi zenbaki erreal horiek bidali behar izango genituzke.

## ADIBIDE FISIKO ERRAZA

Kontzeptu hauek zailak direnez, saiaturako gara pixkat gehiago argitzen. Kontsidera itzazue hiru iragazki polarizatzaile; esate baterako, eguzkirako betaurrekoetan daudenen antzekoak. Polarizatzaile bat argi iturri arrunt baten aurrean jartzen dugu. Nabaria da argi guztia pasatzen ez dela, izatez, erdia bakarrik pasatzen da (horrexegatik hain zuzen ere erabiltzen ditugu polarizatzaileak elurrean edo hondartzan). Imagina dezagun orain beste polarizatzaile bat bestearen atzean jartzen dugula, lehenengoarekiko gurutzatua: argirik ez da pasatzen. Sar dezagun orain hirugarren polarizatzailea beste bien artean,  $45^\circ$  angeluaz besteekiko. Argia pasatzen da sistema honetatik! Zergatik ote? Sistema kuantikoa delako. Aukera dezagun norabide bat, gorakoa, adibidez. Norabide horri  $|0\rangle$  egoera dagokio, eta norabide horizontalari  $|1\rangle$  egoera. Argia fotoiek osatzen dute, argiaren partikulak direnak, eta fotoi bakoitzaren egoera  $a|0\rangle + b|1\rangle$  formakoa da, hau da, polarizazio bertikalaren eta horizontalaren gainezarmena. Lehenengo iragazki polarizatzaileak  $|0\rangle$  egoerari dagokion zatiari bakarrik uzten dio pasatzen, eta honekiko perpendikularra dena  $|1\rangle$  egoera bakarrik. Beraz, bi iragazki horiek daudenean fotoiek ez dute pasatzerik. Zer gertatu da hirugarren iragazkia tartean sartzean? Hirugarren iragazkiak onartzen duen egoera  $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$  da. Lehenengo iragazkitik pasatu diren fotoien egoera  $|0\rangle$  da. Horrek esan nahi du  $1/2$  probabilitatea duela fotoi bakoitzak  $45^\circ$  polarizatzailea pasatzeko, eta gero  $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$  egoeran geratuko dela. Azken egoera honetan dagoen fotoi batek  $1/2$  probabilitateaz pasatuko du  $|1\rangle$  egoerari dagokion polarizatzailea. Beraz, lehenengo polarizatzailea gainditu

<sup>1</sup> Fase orokorrak garrantzirik ez duenez,  $a$  zenbakia beti erreal aukera dezakegu, positiboa edo nulua, eta bat baino txikiagoa;  $b$  zenbakiaren modulua  $a$  zenbakiak finkatzen du, eta, ondorioz,  $b$  zenbakiaren fasea behar dugu egoera guztiz zehazteko.

duen fotoi bakoitzak 1/4 probabilitatea du beste biak gainditzeko, eta, horrexegaitik, argia ikusten dugu pasatzen: iragazki polarizatzailerak ez dira iragazki klasikoak, eta egoeren gainezarmena benetan gertatzen den zerbait dela ikusten dugu.

## NAHASKETA KUANTIKOA

Bi egoeren gainezarmenaren bidez deskriba dezakegun sistema bati, sistema kuantiko erraz horri, «qubit» («quantum bit») deritzogu. Qubit baten egoera garraiatzea posible ote da? Badirudi ezinezkoa dela, arestian esandakoaren arabera, baina mekanika kuantikoan agertzen den beste propietate berezi bat erabiliz, «entanglement» edo nahasketa izenekoa, posiblea badela frogatu zuten Bennet-ek eta bere lagunek.

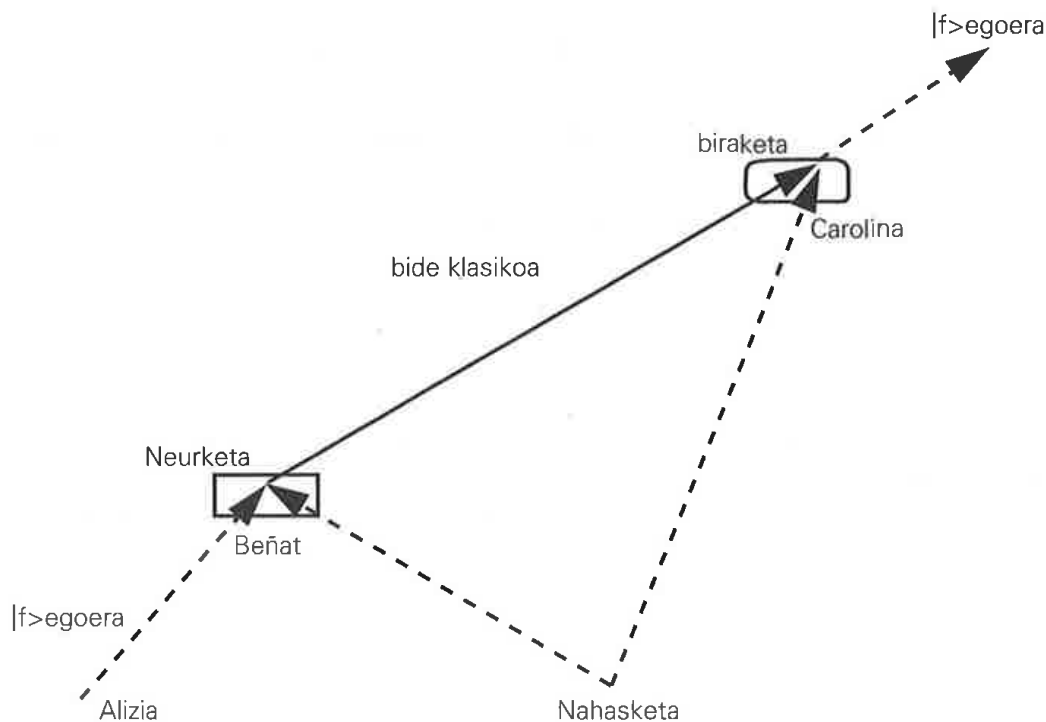
Nahasketa miresgarriaren ondorioek batzuetan intuizioaren aurkakoak diruditelako Einstein-ek seinatu zuen, EPR experimentu mentala («Gedanken Experiment») proposatzean. Demagun bi partikula ditugula, biak berdinak, biak qubit-ak. Partikula klasikoak izango balira, bi partikulen sistemaren egoera posibleak lau izango lirakeke bakarrik:  $|0\rangle|0\rangle$ ,  $|0\rangle|1\rangle$ ,  $|1\rangle|0\rangle$ , eta  $|1\rangle|1\rangle$ , non lehenengo zenbakia partikula bati dagokion, eta bigarrena besteari. Partikula kuantikoen kasuan, bestalde, gauza bitxiak gertatzen dira: egoera puruak ez dira bakarrik  $|f\rangle|g\rangle$  formakoak, baizik eta horien gainezarmena ere. Adibidez,  $(|0\rangle|1\rangle - |1\rangle|0\rangle)/\sqrt{2}$  egoera. Egoera honetan, lehenengo partikula neurtzerakoan 0 emaitza lortzeko probabilitatea 1/2 da, eta gauza bera 1 emaitza lortzeko. Baina demagun lehenengo partikula neurtzean 0 emaitza lortu dugula. Orduan, ziurtasun osoz badakigu bigarren partikularen egoera  $|1\rangle$  dela, eta bigarren partikula hori orain neurtzerakoan 1 lortuko dugula. Hau da, partikula bi hauen egoera guztiz korrelazionatuta edo elkarlotuta dago, nahiz eta beharbada oso urrun egon. Einstein-en iritziz ezinezkoa zen hemen neurketa bat ginez gero, aldi berean oso urrun partikula baten egoera jakitea.

Kontua ez da bakarrik kausalitatea eta korrelazioa berdinak ez izatea, hori mekanika klasikoan ere gertatzen da: demagun Donostiako epaile batek dibortzio epaia eman duela, gizona Marten dagoela, eta emakumea Donostian. Nahiz eta oso urrun egon, Marteko gizona dibortziatua da epaiaren momentu berean (hau da korrelazioa). Baina Marteko udaletxean ez luke berriro ezkondu ahal izango epaia hara heldu arte (kausalitatea), erregistro guztietan ezkondua bezala agertuko bailitzateke.

John Bell-ek frogatu zuen, bestalde, mekanika kuantikoan sortzen diren korrelazioen eta klasikoki sortzen direnen artean desberdintasuna dagoela, eta, neurri handi batean, fisikari esperimentalek frogatu dute benetan gertatzen direnak kuantikoak direla. Ondorioz, gaur egun fisikariok pentsatzen dugu nahasketa kuantikoa benetako fenomeno fisikoa dela.

## TELEGARRAIO KUANTIKOA

Hala izanik, nahasketa kuantikoa erabiliko dugu egoera bat garraiatzeko. Gaietik deskribaturik, imagina itzazu hiru pertsonaia, Alizia, Beñat, eta Carolina, eta bakoitzak partikula bat duela. Hiru partikulak berdinak dira, eta Beñaten eta Carolinaren partikulak lehenago aipatu dugun moduan nahastuak dira. Jo dezagun orain Aliziak bere partikula egoera zehatz batean prestatu duela, eta Beñati eman diola. Beñatek partikula hori bere partikulagaz nahastuko du, eta hori egin ondoren bikotearen neurketa jakin bat egingo du. Neurketa horren emaitza (bi bit-ekoa izango dena) Carolinari bide klasiko bat erabiliz bidaliko dio. Emaitza hori ikusirik, Carolinak botoi bat sakatuko du, eta momentu hartan Carolinak badaki, ziurtasun osoz, bere partikula Aliziak prestatutako egoeran dagoela. Azpimarratu behar da i) Carolinak egoera hori lortzeko Beñatek ez dituela neurketa infinituak egin behar; ii) izatez, Beñatek ez duela inongo informaziorik Alizia prestatutako egoerari buruz; eta iii) Aliziak hasieran zeukan partikula ez dela Carolinak azken puntuak duena. Prozedura irudian ikusten da eskematikoki.



Has gaitezen berriro, xehetasun gehiago emanez. Aliziak partikula bat  $|f\rangle_A = a|0\rangle_A + b|1\rangle_A$  egoeran prestatu du. Beñatek eta Carolinak lehenago

bikote nahastua prestatu dute  $(|0\rangle_B|1\rangle_C - |1\rangle_B|0\rangle_C)/\sqrt{2}$  egoeran. Bikote honen partikula bat Beñatek gorde du, eta bestea Carolinak. Aliziak bere partikula Beñati eman dio; beraz, Beñatek bi partikula ditu, eta berak ez daki zein egoeratan dauden.

Hiru partikulek sistema bat osatzen dute, eta hiru partikulen sistemaren egoera ondokoa daukagu:

$$\begin{aligned} |f\rangle_A (|0\rangle_B|1\rangle_C - |1\rangle_B|0\rangle_C)/\sqrt{2} &= (|f\rangle_A|0\rangle_B|1\rangle_C - |f\rangle_A|1\rangle_B|0\rangle_C)/\sqrt{2} = \\ &= (a/\sqrt{2})(|0\rangle_A|0\rangle_B|1\rangle_C - |0\rangle_A|1\rangle_B|0\rangle_C) + \\ &+ (b/\sqrt{2})(|1\rangle_A|0\rangle_B|1\rangle_C - |1\rangle_A|1\rangle_B|0\rangle_C). \end{aligned}$$

Bi partikulen sistemak ondo aztertzeko, John Bell-ek lau egoera bereziak proposatu zituen, euren bidez edozein bi partikulatako egoera idaztea posible delarik. Hauexek dira Bell-en egoerak:

$$|f\pm\rangle_{AB} = -(|0\rangle_A|1\rangle_{B\pm} - |1\rangle_A|0\rangle_{B\pm})/\sqrt{2};$$

eta

$$|g\pm\rangle_{AB} = (|0\rangle_A|0\rangle_{B\pm} + |1\rangle_A|1\rangle_{B\pm})/\sqrt{2}.$$

Beraz, hiru partikulen egoera Bell-en egoerak erabiliz idatz dezakegu:

$$\begin{aligned} &|f+\rangle_{AB} (a|0\rangle_C + b|1\rangle_C)/2 + \\ &+ |f-\rangle_{AB} (a|0\rangle_C - b|1\rangle_C)/2 + \\ &+ |g+\rangle_{AB} (b|0\rangle_C + a|1\rangle_C)/2 + \\ &+ |g-\rangle_{AB} (-b|0\rangle_C + a|1\rangle_C)/2. \end{aligned}$$

Beñatek ez daki berak dituen bi partikulen egoera zein den, Aliziak emandakoa zein egoeratan dagoen ez dakielako, lehenengoz, eta, bigarrenez, nahiz eta bikote nahasiarena ezagutu, hartu duen bikotearen partikularen egoera zehatza ez dakielako. Era berean, momentu honetan Carolinak ez daki berak alboan daukan partikularen egoera, bakarrik hasierako bikotearen osagaia dela daki.

Orain Beñatek neurketa bat egingo du. Lehenago aipatu dugu qubit bat neurtzean 0 edo 1 lortzen dugula. Era berean, bikote baten kasuan, neurtzen dugunean (00), (01), (10) edo (11) neurtuko dugu, edo, beste esperimentu mota batean, John Bell-ek proposatutako lau egoerak, Bell-en egoera bakoitza emaitza esperimental bati dagokiolarik. Beraz, Beñaten neurketaren emaitza hauetariko bat izango da:  $f+$ ,  $f-$ ,  $g+$ , edo  $g-$ .



Demagun Beñaten neurketan f+ agertu dela. Carolinak ez daki Beñatek f+ neurtu duela, eta, ondorioz, ez daki Aliziak prestaturiko egoera berreskuratu ote duen. Beste hiru aukera baditu.

Beñatek, bada, bere neurketaren emaitza Carolinari bidaliko dio. Horretarako bi bit bakarrik behar ditu, eta informazio hori bide klasiko bat erabiliz bidalio dio. Horrek esan nahi du informazioaren abiadura argiarena baino txikiagoa dela! Carolinak bi bit horiek jasoz gero, informazio guztia du Aliziaren egoera berreskuratzeko: informazio horren arabera, operazio txiki bat egingo du daukan partikularen egoera aldatzeko, errotazio baten bidez, edo antzeko zerbait (qubit horren azpian dagoen fenomeno fisikoa-ren arabera: espina denean, errotazioa; argiaren polarizazioa, polarizataile bat sartu behar du, etab.). Erabili behar duen errotazioa Beñatek bidalitako informazioaren arabera hautatuko du. Adibidez, Beñatek bidalitako seinalea f+ bada, Carolinak ez du ezer egin behar: badaki bere partikula Aliziak prestaturiko egoeran dagoela. Telegarraioa lortu dugu!

Azpimarratu egin behar ditugu telegarraio honen ezaugarri batzuk, Guillermo García Alcaine-k aurkeztu dituen bezala (García Alcaine, 1998):

- 1) Guztiz beharrezkoa dela Beñatek informazio klasikoa (bi bit) Carolinari bidaltzea.
- 2) Beñatek bidalitako informazioa klasikoa dela, argiaren abiadura baino txikiagoa dela informazio klasiko honena.
- 3) Beñatek ez duela inongo informaziorik Aliziak prestaturiko egoerari buruz: berak egindako neurketa bi partikulen sistemari buruzkoa izan delako, eta ezin du zehaztu Aliziarena zein den. Beraz, ez daki ezer Aliziak prestaturiko egoerari buruz. Beste modu batean esanda, Aliziak prestaturiko egoera desagertu da hasierako puntutik: partikula geratzen da, baina bere egoerak ez du zerikusirik hasierako egoerarekin.
- 4) Carolinaren posizioak ez du garrantzirik; informazio klasikoa har dezan bakarrik jakin behar izango genuke bera non dagoen.
- 5) Aliziak ez diola ezer Carolinari bidali, ez partikularik, ezta informazio klasikorik ere.

Arestian kontatutakoa Bennett-ek eta bere laguntzaileek proposatu zuten 1993. urtean. Nahiz eta prozedura erraza iruditu, esperimentalki gauzatzea ez da berehalakoa izan, eta 1997 eta 1998. urteetara arte ez da posible izan. Momentu hartan Innsbruck-en eta Erroman bi talde esperimentalek lortu zuten telegarraio partziala. Orain arte konpondu gabe geratzen den zailtasunik nagusia Bell-en egoerak neurtzean datza. Kontuan hartu behar da esperimentu hauek oso finak eta korapilatsuak direla: nahasketa lortzea eta (askoz zailagoa) mantentzea, Bell-en neurketak egitea eta, azkenez, hasierako egoera berreskuratzen dela konprobatzea problema oso larriak dira, eta esperimentu korapilatsu hauetan guztiak agertzen dira aldi

berean. Hots, lorturiko emaitza esperimentalak bat datoz proposamen teoriakoarekin, nahiz eta ziurtasun osoz ez frogatu.

## **ETA BIHARKO, ZER?**

Telegarraio kuantikoaren erabilpen praktikoa ez da biharko garapena izango. Hobeto esanda, fisikari gehienok ez dugu uste berehalako erabilpen praktikorik egongo denik. Hori bai, mekanika kuantikoa gehienetan natura deskribatzeko tresnarik egokiena dela berriro frogatu du, eta oraindino mekanika kuantikoaren ondorio asko ulertu gabe dugula.

## **BIBLIOGRAFIA**

- BENNETT, C.H., BRASSARD, G., CREPEAU, C., JOSZA, R., PERES, A. and WOOTTERS, W. (1993): «Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and EPR Channels», *Phys. Rev. Lett.* **60**, 1895-1899.
- BOSCHI, D., BRANCA, S., DE MARTINI, F., HARDY, L., and POPESCU, S. (1998): «Experimental Realization of Teleporting an Unknown Pure Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels», *Phys. Rev. Lett.* **80**, 1121-1125.
- BOUWMEESTER, D., PAN, J.-W., MATTLE, K., EIBL, M., WEINFURTER, H., and ZEILINGER, A. (1997): «Experimental Quantum Teleportation», *Nature* **390**, 575-579.
- CAVES, C.M. (1998): «A Tale of Two Cities», *Science* **282**, 637-638.
- COLLINS, G.P. (1998): «Quantum Teleportation Channels Opened in Rome and Innsbruck», *Physics Today* (Feb. 1998) 18-21
- EINSTEIN, A., PODOLSKY, B. and ROSEN, N. (1935): «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?», *Phys. Rev.* **47**, 777-780.
- GARCÍA ALCAINE, G. (1998): «Teleportación: realidad y ficción», *Revista Española de Física* **12**, 6-9.

## **Informazio gehiago:**

<http://www.research.ibm.com/quantuminfo/teleportation/>  
<http://www.research.ibm.com/quantuminfo/teleportation/braunstein.html>